

А. С. Ющенко, д-р техн. наук, проф., robot@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи

Создание нового класса робототехнических систем — коллаборативных роботов требует решения ряда проблем, связанных с взаимодействием человека и робота. Деятельность человека-оператора сводится к наблюдению за функционированием робототехнической системы и к постановке текущих задач в режиме речевого диалога. От непосредственного управления движениями человек переходит к постановке текущих задач, как если бы он сотрудничал с человеком-ассистентом. При этом интерфейс оператора должен обеспечить человеку адекватное восприятие текущей сцены, а его команды должны быть "понятны" роботу-ассистенту. Существенную роль при этом играет система навигации, поскольку робот должен самостоятельно оценивать окружающую обстановку и планировать свой путь, в том числе и при наличии других движущихся объектов в рабочей зоне. Наиболее важные проблемы, которые нашли отражение и в программе первой международной конференции по коллаборативной робототехнике, состоявшейся в 2016 году, рассмотрены в данной работе.

Ключевые слова: коллаборативные роботы, человек-оператор, система навигации, лингвистические переменные, нечеткий логический вывод, речевой диалог, восприятие информации, многомодальный интерфейс

Введение

Основная тенденция современной робототехники — все более широкое внедрение робототехнических устройств во все сферы деятельности человека, включая медицину, космонавтику, работы в экстремальных ситуациях. Анализ мирового рынка робототехники показывает тенденцию преобладания темпов роста именно сервисной робототехники, предназначенной для содействия человеку в его деятельности. Отметим, что робототехнические системы (РТС), управляемые человеком, возникли уже на первом этапе становления робототехники. Это были системы копирующего, затем полуавтоматического и, наконец, супервизорного управления, назначением которых было обеспечение безопасности оператора в экстремальных условиях работы. Сегодня возник термин "коллаборативные роботы" (КР, collaborative robots, или co-robots), означающий совместную деятельность человека и робота, при которой человек становится партнером-руководителем, а робот — партнером-ассистентом. Основное отличие КР от разрабатываемых ранее робототехнических систем, управляемых человеком, — это определенная степень их автономности, предполагающая применение принципов искусственного интеллекта. Благодаря этому максимально упрощается задача управления роботом, решение которой становится доступным пользователю-непрофессионалу. Предполагается, что это обстоятельство должно привести к массовому применению робототехники в самых различных сферах деятельности человека, а по существу, к роботизации общества. По результатам первой международной конференции по коллаборативной робототехнике [1], а также обзоров научной литературы [2] можно составить следующую предварительную классификацию РТС, относимых сегодня к КР, по сфере применения:

- манипуляторы, работающие в той же рабочей зоне, что и человек, в целях оказания ему помощи, например, на сборочном конвейере или при обслуживании инвалидов. Именно для таких систем первоначально и был введен термин

"коллаборативный робот". Очевидно, что такой манипулятор должен быть адаптивным к условиям работы, включая поведение самого человека;

- мобильные роботы, обладающие автономной системой управления и выполняющие определенные операции по указаниям человека в помещениях — производственных или в сфере обслуживания, при условии, что в этих помещениях могут находиться и перемещаться другие люди. Сюда же можно отнести роботы, сопровождающие человека, в том числе в качестве гида или охранника;
- манипуляторы и мобильные роботы в составе робото-технологического комплекса (РТК), обеспечивающие безопасность пользователя и работу с интерфейсом, доступным практически без специальной подготовки. Здесь примером может служить гибкая производственная система Baxter [2];
- группы роботов, управляемых человеком (мульти-агентные коллаборативные робототехнические системы), например, при патрулировании территории или помещений, при мониторинге местности в целях поиска взрывоопасных объектов [3, 4].

Заметим, что коллаборативные роботы по определению являются эргатическими (человеко-машинными) комплексами, что их отличает от традиционной робототехнической системы, предназначенной для автоматизации труда человека. Поэтому при их классификации необходимо учитывать и характер участия человека. По этому признаку можно выделить:

- роботы-ассистенты, выполняющие вспомогательные действия в рабочей зоне по речевым или иного характера (жестикуляция) указаниям человека;
- роботы-партнеры, сопровождающие человека и выполняющие по его указаниям функции либо наблюдения, либо воздействия на объекты внешнего мира;
- роботы-аватары, обеспечивающие оператору эффект присутствия в рабочей зоне с использованием систем виртуальной реальности.

Несмотря на различные области применения и конструктивные особенности, можно выделить ряд свойств, общих для всех коллаборативных РТС. Важнейшее требование, предъявляемое к КР, — это обеспечение безопасности взаимодействия с человеком-компаньоном в процессе совместной работы. В контексте промышленных роботов был введен термин *soft robotics* (мягкие роботы), характеризующий как конструкцию робота, включая манипуляторы с эластичным покрытием, так и, в первую очередь, особенности системы управления, обеспечивающие быстрый аварийный останов робота при опасности столкновения с препятствием в рабочей зоне или автоматический обход препятствия. Такие же требования предъявляются и к мобильным сервисными роботами, функционирующим в пространстве, в котором могут находиться подвижные препятствия — люди, другие роботы, транспортные средства. Для выполнения этого требования КР должен получать информацию о действиях человека в рабочем пространстве робота, о его текущем положении. Если речь идет о мобильных роботах-партнерах, то требование безопасности распространяется и на других людей, которые могут встретиться на пути робота.

Другим важным требованием является возможность для человека, не обладающего специальными знаниями, управлять действиями КР с учетом объективных ограничений психофизиологического характера, в том числе возможностей рецепторов человека, ограничения времени реакции и оперативной памяти, сложности воспринимаемых органами чувств образов ситуации. Это можно было бы назвать условиями "эргатической управляемости" КР. По аналогии с общей теорией управления здесь можно было бы ввести и термин "эргатическая наблюдаемость", имея в виду способность человека, наблюдающего за работой КР с помощью компьютерного интерфейса, включающего и речевой диалог, составить в своем сознании достаточно полную с точки зрения достижения поставленной цели картину мира.

Наконец, робот должен обладать в достаточной мере способностью к автономной работе. Как правило, он обладает трехмерной системой технического (компьютерного) зрения (СТЗ). Его база знаний позволяет распознавать объекты в пространстве рабочей сцены. В отличие от полностью автономных роботов решение задач навигации мобильных КР, задач распознавания и анализа состояния рабочей сцены в данном случае предполагает двусторонний обмен информацией с человеком. При использовании речевого управления этот обмен приобретает форму диалога человека-пользователя с роботом-партнером ("диалоговое управление"). В случае непосредственного включения человека в рабочий процесс (роботы-аватары) существенно усложняются требования к интерфейсу, который теперь должен включать систему стереозрения на стороне оператора и расширенные средства обратной связи — по силам и моментам, действующим на КР, тактильные ощущения

и др. Во всех случаях КР должен обладать возможностями самодиагностики, чтобы своевременно сообщать оператору о возможных нарушениях в системе управления, связи, обработки информации, ограничениях энергопитания.

Общими являются и требования информационной защиты системы управления КР, исключающей "перехват управления" со стороны других лиц. Здесь, помимо обычных средств кодирования управляющих действий и команд, могут быть применены такие средства, как анализ особенностей речи основного оператора, распознавание его лица. Эти средства могут быть использованы и для оценки состояния оператора в процессе работы системой управления КР, что также может быть необходимо для оценки его усталости, эмоциональной напряженности, адекватности команд, особенно в экстремальных ситуациях.

Наконец, развитая система управления КР, предназначенного для выполнения определенных операций в определенной среде, например КР для разведки пожара, должна накапливать как процедурные знания ("ситуация—действие"), так и знания об особенностях работы своего оператора, если это "персональный КР". В отличие от традиционного робота-автомата важнейшей функцией КР является помощь человеку-пользователю, которая может иметь как характер непосредственных действий КР в рабочей среде, так и характер информационной поддержки с помощью экспертных систем и баз знаний.

Представление ситуации в системе управления КР

Для представления информации о текущей ситуации в КР целесообразно использовать пространственно-семантическое представление. Так, в работе [5] вводится многомодальное представление окружающего пространства в виде многослойной карты рабочей зоны робота, которое включает топографический план, зоны ограничения движения, связанные с выполнением заданных операций, и данные бортовых сенсоров. Карта, полученная от лазерного сканирующего дальномера, используется для локализации робота на топографическом плане, а карта зоны безопасности, полученная с помощью комплексирования данных от лазерного сканирующего дальномера и массива сонаров, расположенных по периметру робота, позволяет оценивать наличие объектов вокруг робота в процессе его движения.

В общем случае пространственно-семантическое представление пространства включает описание объектов рабочей сцены и пространственно-временных отношений между ними. Особенность КР заключается в том, что это представление создается с участием человека — либо заранее, либо непосредственно в процессе работы. Поэтому для его описания целесообразно использовать нечеткие отношения.

К пространственным относятся нечеткие отношения положения и ориентации объектов, задаваемые функциями принадлежности, которые соответствуют восприятию этих отношений человеком [6], например "объект a_1 далеко, впереди справа и не-

много выше объекта a_2 ". Для полноты описания к таким отношениям добавляются так называемые интенциональные отношения, такие как R_1 — соприкасаться; R_2 — быть внутри; R_3 — быть на одной плоскости и т.д. Используя заранее сформированные в базе знаний функции принадлежности и средства наблюдения (СТЗ, лазерные дальномеры), КР самостоятельно может описывать ситуацию в терминах естественных пространственных отношений и сообщать об этом оператору в лингвистической форме. Эти же отношения могут использоваться оператором при формировании заданий роботу в процессе диалога. Заметим, что из совокупности элементарных пространственных отношений, используя формальные логические правила конъюнкции и дизъюнкции, можно получить практически любые отношения, встречающиеся на практике.

Текущая ситуация, включающая M объектов, в том числе робота или внешнего наблюдателя, описывается системой бинарных фреймов ($\langle \text{объект } m \rangle$, $\langle \text{отношение} \rangle$, $\langle \text{объект } n \rangle$), $m, n = 1, 2, \dots, M$. Если заранее установлены нечеткие бинарные отношения между всеми объектами, которые могут наблюдаться роботом в процессе движения, то мы получим нечеткую пространственно-семантическую сеть, или нечеткую карту. Используя такую карту, можно, в частности, осуществлять навигацию робота по наблюдаемым реперам, т.е. по объектам, положение которых было заранее известно.

Объекты рабочей сцены, в свою очередь, описываются субфреймами, содержащими их геометрические и физические признаки P_j , выраженные с использованием лингвистических переменных: $\langle \text{объект } m: P_1, P_2, \dots, P_m \rangle$. Нечеткие признаки объектов (протяженный объект, большая высота, большой размер и т.п.) задаются функциями принадлежности соответствующих лингвистических переменных, которые известны заранее [7]. Функции принадлежности этих лингвистических переменных, как и функции принадлежности, описывающие пространственные отношения, должны быть согласованы с техническими характеристиками мобильного робота и системы технического зрения. Тем самым обеспечивается согласование характеристик информационной системы КР с характеристиками пространственного восприятия человека.

Важная особенность задачи управления с использованием нечеткой модели рабочей сцены мобильным роботом, снабженным системой технического зрения, состоит в том, что в процессе движения меняется масштаб изображения, воспринимаемого телекамерой, установленной на роботе. Этот эффект приводит к необходимости введения двумерной функции принадлежности для определения текущего положения робота на плоскости. Например, функция принадлежности по курсовому углу ("немного справа", "справа" и т.п.) зависит также и от дальности D . Эта особенность системы технического зрения соответствует закону пространственной перспективы, свойственному зрительному восприятию пространства человеком [7].

Поскольку внешний мир непрерывно изменяется как за счет движения наблюдаемых объектов, так и за счет движения самого робота, то и описание ситуации изменяется во времени. Это обстоятельство требует учета в общем случае не только пространственных, но и временных отношений во внешнем мире, таких как "быть одновременно", "быть раньше", "следовать за". Такие отношения приходится использовать, в частности, при управлении мобильными роботами, перемещающимися в пространстве, содержащем другие движущиеся объекты [8]. Они позволяют обеспечить автоматическое сопровождение подвижных объектов или избежать столкновения с ними. Например, для того чтобы избежать столкновения с движущимся объектом, нужно предсказать его будущую траекторию и, в том случае, если она пересекает траекторию движения КР, ввести указание "быть раньше" в точке пересечения. Указание "следовать за" означает движение КР на расстоянии, не превышающем установленного от объекта сопровождения.

В общем случае ситуация S определяется фреймом, слотами которого служат имена объектов внешнего мира, естественные отношения между объектами, как пространственные, так и временные, а также другие признаки, характеризующие ситуацию. Получаемая таким образом оценка ситуации роботом представляет собой не что иное, как формализованную и осредненную оценку аналогичной ситуации человеком.

Совокупность обозначений (имен) заданных объектов в пространстве рабочей сцены и нечетких отношений между ними составляет словарь формального языка описания ситуации. Для того чтобы получить описание ситуации на этом языке, нужно определить синтаксис этого языка и семиотическое представление предположений. Используя введенную Д. А. Поспеловым терминологию, можно назвать язык используемых для описания ситуаций формально-логических отношений ситуационным языком. На ситуационном языке может быть организован диалог между роботом и человеком при анализе ситуации.

Структура и состав системы управления КР

Перечисленные выше требования позволяют составить представление об обобщенной структуре КР. Они, в определенной степени, отражены в структуре коллаборативного мобильного робота (КМР), рассмотренного в работе [5] (рис. 1). Робот оснащен сканирующим лазерным дальномером Hokuyo UTM-30LX, массивом ультразвуковых сонаров, размещенных по периметру основания робота, системой управления на базе одноплатного компьютера ODROID-XU4 и программно-аппаратным комплексом ST-Robotics для автономной навигации внутри помещений.

Система управления КМР имеет двухуровневую архитектуру, состоящую из базового блока и блока расширения. Базовый блок системы управления

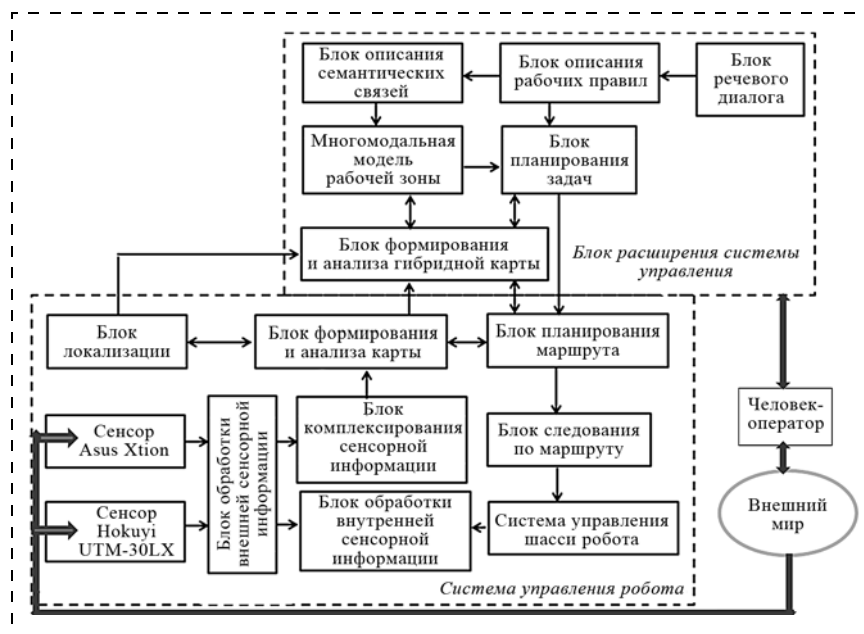


Рис. 1. Функциональная схема системы управления КМР

осуществляет сбор и анализ сенсорной информации, формирование карты рабочей зоны, локализацию робота и окружающих объектов, а также планирование маршрута и управление движением робота. По существу, это структура системы управления автономным сервисным мобильным роботом. Однако в структуру системы управления КР введен блок расширения системы управления, который обеспечивающий взаимодействие робота с человеком-оператором путем диалога на естественном языке, с помощью которого человеком формируется последовательность рабочих задач робота.

Блок расширения системы управления обеспечивает планирование маршрута движения робота на основании анализа данных гибридной карты рабочей зоны (см. ниже). Система управления содержит дополнительные обратные связи, включающие зрительную обратную связь, датчики безопасности, а также речевую обратную связь, реализуемую в форме речевого диалога КР с оператором. Заметим, что это уже нетрадиционная система управления, поскольку в ней отсутствуют как управляющий субъект, так и объект управления. Эта система управления при работе партнеров, один из которых является ведущим, партнером-руководителем, а второй — партнером-ассистентом.

Учитывая необходимость постоянного обмена информацией с оператором, целесообразно и программно-алгоритмическую часть системы формировать на базе естественных пространственно-временных отношений, нечеткого логического вывода и гибридных нейронечетких сетей.

Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Эти стереотипы поведения имеют вид продукционных правил: "если ситуация есть S_i , то тактика T_i ". Под тактикой мы понимаем совокупность правил поведения, выраженных с помощью лингвистических

переменных и определяемых поставленной целью. Эти правила ставят в соответствие типовой ситуации заранее определенное типовое движение робота. В свою очередь, каждое типовое движение также представляется совокупностью нечетких правил, связывающих показания датчиков робота и управляющие сигналы [9]. Типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота. С использованием этой базы можно составить набор правил поведения (тактик), соответствующих преследованию нового объекта, выходу в определенную точку, заданную на многомодальной карте, проходу в дверной проем, обходу внезапно появившегося препятствия на пути к цели, сопровождению движущихся объектов и т.п. Наличие тактик, полученных роботом заранее или в процессе обучения, существенно упрощает задачу оператора, избавляя его от управления робо-

том при решении рутинных задач. При этом сами тактики могут быть заложены в базу знаний робота путем обучения нейронечеткой сети, являющейся основой нечеткого контроллера.

В общем случае тактика поведения робота определяется фреймом задачи, который можно представить в следующем виде: $\langle \text{текущая ситуация } S_i \rangle \langle \text{объект управления } a_0 \rangle \langle \text{имя операции} \rangle \langle \text{сопутствующие объекты } j \rangle \langle \text{условия выполнимости операции} \rangle$. Объектом управления по умолчанию является сам мобильный робот, возможности которого имеются в базе данных. Эти возможности (габаритные размеры, масса, мощности двигателей, скорость, маневренность и т.п.) определяют условия выполнимости операции с учетом текущей ситуации и свойств рабочей среды (рельеф, сцепление колес с грунтом, несущие свойства грунта, характер препятствий). Условия выполнимости операции могут включать в себя и проверку постулов, которые должны быть выполнены после завершения операции. В случае, если задача, поставленная оператором, невыполнима, робот вступает в состояние уточняющего диалога с оператором.

Оператор может сообщить роботу только конечную цель движения в пространстве с частично известной структурой. В этом случае возникает проблема автономного планирования движения. Эта задача может быть решена методами нечеткого логического вывода с использованием принципа разрешения противоречий [10, 11].

Специфика управления мобильным роботом в динамической среде состоит в том, что движение препятствий нельзя рассчитать заранее. Чтобы избежать столкновений с движущимися препятствиями, необходимо знать их положение и предсказывать траекторию их движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр и

объехать препятствие. В работе [12] предлагается алгоритм управления роботом в динамической среде, основанный на трассировке подвижных препятствий. На первом этапе решается задача планирования маршрута по построенной методом сеточных функций карте помещения. Для этого используется хорошо известный алгоритм A*. Далее решается задача трассировки подвижных препятствий — определения текущего вектора состояния препятствия в каждый момент времени, синхронизированный с получением нового скана. Для построения списка препятствий сначала выполняется классификация и кластеризация точек скана. Кластеризация в данном случае проводится по евклидовому расстоянию между точками скана. Пороговое значение вычисляется исходя из расстояния до точки и углового разрешения лазерного дальномера.

Разработанный алгоритм предсказывает новое положение подвижного объекта на основе предположения, что наблюдаемый объект является твердым телом, перемещающимся по плоскости, и известен предыдущий вектор его состояния. Затем, используя полученное предсказание и параметры габаритной окружности, определяется новая оценка положения объекта, включающая оценку перемещения и курсового угла.

Задачи следования вдоль спланированного маршрута и обхода подвижных препятствий решаются совместно, так как при движении по заданной траектории подвижные объекты могут оказаться вблизи этой траектории. В этом случае необходимо совершить маневр обхода.

Для наведения КР на подвижный объект и его преследования или сопровождения могут быть использованы методы пропорциональной навигации. Так как движение робота осуществляется в среде с препятствиями, то на тактическом уровне предлагается использование нечеткого контроллера, допускающего лингвистическое описание ситуации при возникновении препятствий и позволяющего осуществлять управление роботом с использованием лингвистических команд. Основными правилами в разработанной базе правил являются правила пропорционального наведения и правила, обеспечивающие безопасность движения при возникновении препятствий в зоне действий робота [13].

При сопровождении роботом человека-оператора или при полуавтоматическом управлении движением КР может произойти потеря связи робота с оператором. В этом случае возникает задача движения КР в пространстве рабочей сцены с автоматическим возвращением робота к пользователю при потере связи. Для решения этой задачи может быть использована визуальная одометрия — метод оценки линейного и углового смещения робота с помощью анализа последовательности изображений, снятых установленной на нем парой камер [14]. Текущие координаты робота оцениваются при счислении смещений по положению и ориентации КР относительно особых точек. Вычисление пространственных координат особых точек, в свою очередь,

выполняется при решении задачи триангуляции с использованием разницы положения изображений одной и той же точки с двух телекамер. Чтобы вычислять смещение робота, отслеживается изменение положения особых точек с течением времени. Когда особые точки пропадают из поля зрения телекамер, они исключаются и заменяются на новые, что позволяет измерять координаты робота в изменяющейся среде. Определение координат робота дает возможность построить траекторию автоматического возвращения к оператору с помощью сплайнов третьей степени. Экспериментальные исследования показали, что наилучшие результаты могут быть получены путем комплексирования данных визуального одометра с данными колесной одометрии и с данными инерциального измерителя угловой скорости. При этом обеспечивается решение задачи возвращения в сумерках и темноте, на однотонных подстилающих поверхностях.

Речевой интерфейс и организация диалога

Речевой интерфейс является основным способом задания управляющей информации для диалоговой системы управления когнитивным роботом. Речевой интерфейс включает в себя модуль распознавания и лингвистический модуль. Модуль распознавания представляет собой устройство для преобразования речевых сигналов и их интерпретации в качестве отдельных слов или фраз. Лингвистический анализатор осуществляет синтаксический и семантический разбор высказывания, в результате которого должны быть заполнены слоты фрейма для описания действий.

Высказывания, представленные на языке ситуационного управления, могут быть выражены на внутреннем семиотическом языке, т.е. сведены к последовательности символов. В свою очередь, команда оператора, поступающая от модуля распознавания речи, также является последовательностью символов. Таким образом, взаимодействие модуля распознавания и лингвистического модуля сводится к преобразованию одной последовательности символов в другую на базе грамматики, построенной экспертом. При этом сам лингвистический анализатор может быть представлен в форме конечного автомата [15].

Практически все используемые в настоящее время способы распознавания речи основаны на сравнении произносимых слов с эталоном. Учитывая, что словарь языка ситуационного управления ограничен, целесообразно предварительно составить базу используемых слов и иметь возможность в реальных условиях дополнять базу робота (дообучать его) новыми словами, которые отсутствуют в базовом словаре. В большинстве работ, использующих такую концепцию, предполагается реализация модуля распознавания с помощью нейронных сетей. Так, в работе [16] для распознавания слов естественного языка используется трехслойная сеть Хэминга. Сеть предварительно обучается на произношение базовых слов команды определенным поль-

зователем. Этим, в частности, решается и задача обеспечения информационной безопасности системы управления, т.е. устраняется возможность доступа постороннего пользователя к управлению КР.

Диалог представляет собой последовательность речевых сообщений, которыми обмениваются робот и оператор. Исходным состоянием диалога служит команда оператора, структура которой была рассмотрена выше. Чаще всего развитие диалога происходит по одному из следующих сценариев: уточнение состава команды или уточнение операции. Сам сценарий описывается протофреймом, а конкретная реализация диалога фиксируется в виде фрейма-экземпляра. Например, для сценария "уточнение состава команды" протофрейм имеет следующий вид: <исходный текст команды>, <недостающий компонент>, <фокусирующий запрос оператору>, <вторичный текст команды>, <число итераций>, <окончательный вид команды>.

Одной из реализованных моделей диалога человека и робота оказалась модель, основанная на использовании сетей Петри. Эти сети позволяют осуществить моделирование асинхронного диалога, они удобны для формализации задачи машинного обучения [15]. Позициям сети Петри соответствуют состояния или текущие процессы в робототехнической системе, а переходам — поступающие события от других модулей системы диалога. Менеджер диалога в процессе своей работы в разработанной системе речевого диалогового управления обращается к модулю планирования и запрашивает предсказания дальнейшего состояния модели мира и решения по дальнейшим действиям вплоть до достижения цели.

Наличие моделей диалога повышает эффективность речевого интерфейса, так как дает возможность прогнозирования последующих действий оператора в рамках речевого взаимодействия. В самом простом случае прогнозирование может быть основано на данных, удовлетворяющих уточняющему запросу системы, имеющихся в самой системе, но не указанных оператором при инициации диалога. Перечень наиболее вероятных ответов можно использовать, например, в качестве "опорной" информации на этапе распознавания речевого сигнала.

Интерфейс КР может иметь многомодальную структуру и не сводиться к обмену речевыми сообщениями, но включать также и жесты. Дальнейшим развитием многомодального интерфейса является его дополнение системой двусторонней оценки эмоционального состояния оператора и имитации такого состояния роботом-партнером [17]. Для воспроизведения эмоций предлагались различные способы — чаще всего это либо компьютерная графика, либо антропоморфная конструкция, обтянутая искусственной кожей и, как правило, являющаяся копией лица конкретного человека. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) в качестве примера приведены фотографии лица робота, разработанного Х. Ишигуро [18], рядом со своим прототипом, и робота Алиса [19] ("Нейроботикс", Зеленоград, РФ).

Лицо последнего робота оснащено девятнадцатью актуаторами (сервоприводами), которые деформируют силиконовую кожу головы и тем самым управляют мимическим аппаратом лица робота.

Вопросы формализации эмоций изучались П. Экманом, предложившим описание мимического состояния лица человека в виде массива "показателей движения" (*action unit*, AU), характеризующих определенное эмоциональное состояние [20]. Формализовав это состояние, можно реализовать адаптивную нейросеть, основанную на системе нечеткого вывода и позволяющую определить эмоциональное состояние по наблюдаемому мимическому состоянию лица. Может быть решена и обратная задача — воспроизведение определенного мимического состояния на "лице" робота. Поскольку КР предусматривает интерактивное речевое общение с человеком, то "эмоциональное" состояние необходимо моделировать с помощью сервисного робота не только при оценке той или иной ситуации, но и в качестве артикуляции речи, т.е. ее "эмоционального сопровождения". Такая поддержка речевого диалога существенно облегчает понимание сообщений человеком, что особенно важно в экстремальных ситуациях.

Заключение

Роль оператора — пользователя КР существенно изменяется. Теперь оператор управляет не отдельными движениями, а предметной деятельностью или поведением робота путем постановки задач подобно тому, как он работал бы с человеком-ассистентом. Сходство еще более усиливается при использовании речевого общения. Диалоговый способ управления существенно упрощает задачи оператора и практически не предъявляет к нему никаких специальных требований, за исключением знакомства с общими синтаксическими правилами проблемно-ориентированного языка диалога. Такой способ делает доступным управление роботом пользователем, не имеющим специальной подготовки. Большое значение для обеспечения эффективности управления приобретает и анализ психологических проблем взаимодействия человека и "интеллектуальной" робототехнической системы, связанных с "взаимным" пониманием ситуации и задачи, а также выбор наиболее целесообразного поведения для достижения поставленной цели.

Планирование роботом своих действий с учетом непрерывно изменяющейся рабочей среды обеспечивает безопасность его применения в людном помещении. В перспективе применение гибридной нейронечеткой сети позволит обеспечить обучение КР на основе наблюдения за работой самого человека. Задача "взаимопонимания" человека и КР может быть существенно облегчена за счет средств имитации "эмоционального состояния" КР и анализа состояния самого оператора. К новым задачам, которые требуют внимания исследователей КР, следует отнести задачу "смешанного" многоагентного управления, т.е. задачу управления коллекти-

вами, включающими и людей, и группы роботов. Особую роль в изучении проблем управления КР должны играть проблемы психологии взаимодействия человека и робота [21].

Список литературы

1. **Interactive Collaborative Robotics.** First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812, 254 p.
2. **The Robot Report.** URL: <http://www.therobotreport.com>
3. **Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M.** Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 199–207.
4. **Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С.** Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2 (175). С. 48–67.
5. **Kharlamov A., Ermishin K.** Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 225–233.
6. **Ющенко А. С.** Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Тр. Междунар. конф. "Экстремальная робототехника". 2015. С. 143–146.
7. **Володин Ю. С., Михайлов Б. Б., Ющенко А. С.** Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы пространственного зрения // Сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". 2011. Т. 1. С. 372–380.
8. **Воротников С. А., Ермишин К. В.** Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Вып. 6. С. 50–59.
9. **Ющенко А. С.** Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики // Экстремальная робототехника. Сб. докладов всеросс. науч.-техн. конф. СПб: Политехника-сервис, 2015. С. 143–146.
10. **Ющенко А. С.** Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18.
11. **Магазов С. С.** Когнитивные процессы и модели. М.: Изд. ЛКИ, 2007. 248 с.
12. **Герасимов В. Н.** К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 44–51.
13. **Ющенко А. С., Тачков А. А.** Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. выпуск № 6. Робототехнические системы. С. 106–111.
14. **Девятчиков Е. А., Михайлов Б. Б.** Визуальный одометр // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. выпуск № 6. С. 68–82.
15. **Жонин А. А.** Алгоритм обучения менеджера диалога речевой диалоговой системы управления роботом // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов международной конференции. М.: Физ. мат. лит, 2011. С. 395–406.
16. **Majewski M., Kacalak W.** Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes // First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 89–98.
17. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication // Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 / Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 133–142.
18. **Hiroshi Ishiguro Laboratories — Robots.** URL: <http://www.geminoid.jp/en/robots.html> (date of access 01.08.2014).
19. **Нейроботикс — Алиса Зеленоградская.** URL: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorphic-robots/alice> (дата обращения 01.08.2014).
20. **Ekman P., Friesen W., Hager J.** Facial Action Coding System (FACS). URL: <http://www.paulekman.com/facs/>, 2002 (date of access 01.08.2014).
21. **Ющенко А. С.** Состояние и перспективы диалогового управления роботами // Труды Института психологии РАН. Актуальные проблемы психологии труда инженерной психологии и эргономики. Вып. 7. М.: Изд-во Института психологии РАН, 2015. С. 408–423.

Collaborative Robotics — State of Art and New Problems

A. S. Yuschenko, robot@bmstu.ru, Educational Center "Robototekhnika" of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 105037, Russian Federation

Corresponding author: **Yuschenko Arkady S.**, Professor, D. Sc., Educational Center "Robototekhnika" of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 105037, Russian Federation, e-mail: robot@bmstu.ru

Accepted on September 01, 2017

The new branch of robotics has been formed nowadays as a collaborative robotics. It seems as a natural result of the developments in the area of manipulation and mobile robots controlled by human operator. Evolution of robotics intended to enlighten human's work resulted in creation of autonomous robots with multimodal interface which make it possible to control a robot for a human without special training. The safety of such robotic systems is to be guaranteed as for operator himself as for other humans in the working area of robotic system. Development of collaborative robotic systems is connected with the problems of human-robot interaction. The human operator can only observe the behavior of the robotic system and state the new tasks in the form of speech dialogue. From the tasks of movement control the operator comes to the tasks formulation as if he collaborates with a human — assistant. So the interface of operator has to propose him an adequate perception of the current situation and his instructions are to be "clear" for robot — assistant. Important part in the autonomous robot control is the navigation system proving the robot to appreciate the environment and to plan its own way in presence of other moving objects. One of the tasks of control is the robot return in case of communication loss with the operator. The task is more complicated for operator if it is necessary to control a group of autonomous robots to fulfil the tasks of the environment monitoring, radiation or chemical reconnaissance etc. Dialogue control may be enlightened for human by "emotional" support of speech communication by demonstration of mimic expression of robot's face. The mutual "understanding" demands also the analysis of the human state by the robot. It is also necessary to pay attention at human possibilities to perceive information and adopt the necessary decision. The possible way of coordination of human-robot possibilities are the linguistic variables application and fuzzy logic inference as on the stage of information perception as on the stage of actions planning and decision adoption. The "natural" relation of space and time make it more close the human-robot dialogue to the dialogue between human-master and human-assistant. The most important problems of mentioned above were under discussion at the first international conference on collaborative robotics on 2106 and are reflected in the paper.

Keywords: collaborative robots, human-operator, navigation system, linguistic variable, fuzzy logic inference, robotic systems, speech dialogue, speech emotional support, information perception, multimodal interface

For citation:

Yuschenko A. S. Collaborative Robotics — State of Art and New Problems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 812–819.

DOI: 10.17587/mau.18.812-819

References

1. **Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R.** ed. *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Springer, LNAI 9812, 254 p.
2. **The Robot Report**, available at: <http://www.therobotreport.com>
3. **Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M.** Smart M3-Based Robot Interaction Scenario for Coalition Work, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 199–207.
4. **Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yuschenko A. S.** *Avtonomnye mobil'nye roboty — navigatsiya i upravlenie* (Autonomous mobile robots- navigation and control), *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2016, no. 2 (175), pp. 48–67 (in Russian).
5. **Kharlamov A., Ermishin K.** Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics, *Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 225–233.
6. **Yuschenko A. S.** Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic, *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
7. **Volodin Yu. S., Mikhailov B. B., Yuschenko A. S.** *Nechetkaya klassifikatsiya prepyatstviy mobil'nym robotom s ispol'zovaniem televizionnoi sistemy prostranstvennogo zreniya* (Fuzzy classification of obstacles by mobile robot with 3D computer vision system), *Proceedings of International Conference "Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence"*, 2011, vol. 1, pp. 372–380 (in Russian).
8. **Vorotnikov S. A., Ermishin K. V.** *Mul'tiagentnaya sensornaya sistema servisnogo mobil'nogo robota* (Intelligent Control System of a Service Mobile Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 50–59 (in Russian).
9. **Yuschenko A. S.** *Dialogovoe upravlenie robotami na osnove nechetkoi logiki* (Dialogue Mode of Robot Control on the Base of Fuzzy Logic), *Transaction of the Conference Extreme Robotics*, S-Pb., Politechnika service, 2015, pp. 143–146 (in Russian).
10. **Yuschenko A. S.** *Intellektual'noe planirovanie v deyatel'nosti robotov* (Intelligent Planning of Work of Robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).
11. **Magazov S. S.** *Kognitivnye protsessy i modeli* (Cognitive processes and models), Moscow, LKI, 2007, 248 p. (in Russian).
12. **Gerasimov V. N.** *K voprosu upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v dinamicheskoi srede* (To the problem of a mobile robot control in the dynamic environment), *Robototekhnika i Technicheskaya Kibernetika*, 2014, no. 1 (2), pp. 44–51 (in Russian).
13. **Yuschenko A. S., Tachkov A. A.** *Integrirovannaya sistema upravleniya pozharным razvedyvatel'nym robotom* (An integrated Control System of a Fire Reconnaissance Robot), *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 106–111 (in Russian).
14. **Deveterikov E. A., Mikhailov B. B.** *Vestnik BMSTU Priborostroenie*, 2012, Special iss. 6 "Robotic Systems", pp. 68–82 (in Russian).
15. **Zhonin A. A.** *Algoritmy obucheniya menedzhera dialoga rechevoi dialogovoi sistemy upravleniya robotom* (Training Algorithm for dialogue manager of a speech dialogue system), *Integrated Models and Soft Calculations in Artificial Intelligence, Proceedings of International Conference*, 2011, pp. 395–406 (in Russian).
16. **Majewski M., Kacalak W.** Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes, *First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 89–98.
17. **Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. *Interactive Collaborative Robotics, First international Conference, ICR 2016*, Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov, Springer, LNAI 9812, pp. 133–142.
18. **Hiroshi Ishiguro Laboratories** — Robots, available at: <http://www.geminoid.jp/en/robots.html> (date of access 01.08.2014).
19. **Neurobotiks** — *Alisa Zelenogradova*, available at: <http://neurobotics.ru/robotics/antropomorfic-robots/alice> (date of access 01.08.2014).
20. **Ekman P., Friesen W., Hager J.** Facial Action Coding System (FACS), available at: <http://www.paulekman.com/facs/>, 2002 (date of access 01.08.2014).
21. **Yuschenko A. S.** *Sostoyaniye i perspektivy dialogovogo upravleniya robotami* (The state of art and perspectives of robot dialogue control), *Proceedings of Institute of psychology RAN "Actual problems of trade psychology and ergonomics"*, iss. 7, ed. Oboznov A. A. and Zhuravlev A. L., Moscow, Institute of psychology RAN, 2015, pp. 408–423 (in Russian).

УДК 531.8

DOI: 10.17587/mau.18.819-824

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,

И. Л. Ермолов, д-р техн. наук, проф. РАН, ст. науч. сотр.,

М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Е. А. Семенов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. Н. Суханов, мл. науч. сотр.,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва

Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом¹

Исследованы силовые взаимодействия с различными грунтами как отдельного нагруженного мобильного робота, так и группы роботов. Рассмотрено взаимодействие с грунтом через колесную систему корпуса робота с грузом и взаимодействие отдельного нагруженного колеса с грунтом. Приведены результаты моделирования взаимодействия нагруженного робота с различными грунтами.

Ключевые слова: мобильный робот, грунтовая поверхность, силовое взаимодействие, система сил, особенности движения, проскальзывание

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 16-29-04199 офи_м.