

For citation:

Pritykin F. N., Nebritov V. I. Virtual Motion Control of an Android Robot Hand Using a Knowledge Base During Synthesis of Movements with Account of the Positions of the Exclusion Zones, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 452–458.

DOI: 10.17587/mau.18.452-458

References

1. **Wihtney D. E.** The mathematics of coordinated control of prosthetic Arms and Manipulators, *Tpons. ASME, Ser G, J Dymamic, Just, Meas and Control*, 1972, vol. 94, no 4, pp. 19–27.
2. **Kobriniskij A. A., Kobriniskij A. E.** Manipulacionnye sistemy robotov (Manipulation of robots), Moscow, Nauka, 1985, 343 pp. (in Russian).
3. **Pratt J., Dilworth P., Pratt G.** Virtual model control of a bipedal walking robot, *Proceedings of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1997, vol. 1, pp. 193–198.
4. **You B., Zou Y., Xiao W., Wang J.** Telerobot control system based on dual-virtual model and virtual force, *Int. Forum on Strategic Technology*, 2010, pp. 246–250.
5. **Hrr J., Pratt J., Chew C.-M., Herr H., Pratt G.** Adaptive virtual model control of a bipedal walking robot, *Proceedings of Int. Joint Symp. on Intelligence and Systems*, 1998, pp. 245–251.
6. **Tsukamoto H. K., Takubo T., Ohara K., Mae Y., Arai T.** Virtual impedance model for obstacle avoidance in a limb mechanism robot, *Int. Conf. on Information and Automation*, 2010, pp. 729–734.
7. **Hasegawa T., Suehiro T., Takase K.** A model-based manipulation system with skill-based execution, *IEEE Trans. Rob. and Autom.*, 1992, no. 5, pp. 535–544.

8. **Pritykin F. N., Nebritov V. I.** Issledovanie razmerov i formy oblasti v mnogomernom prostranstve obobshhjonnyh skorostej, zadajushhej dopustimye mgnovennye sostojanija mehanizma androidnogo robota (The study of size and shape of the area in the multidimensional space of generalized velocities defining permissible instantaneous state of android robot mechanism), *Omskij nauchnyj vestnik*, 2016, no. 5, pp. 29–34 (in Russian).

9. **Pritykin F., Gordeev O.** Defining a Service Angle for Planar Mechanisms of Manipulators based on the Instantaneous States Analysis, *MEACS2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 124 (2016) 012025, doi:10.1088/1757-899X/124/1/012025, available at <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/124/1/012025>

10. **Pritykin F. N., Tevlin A. M.** Procedure for construction of manipulator motions from a given local grip path in the presence of obstacles. Soviet machine science, Allerton press ins. New York, 1987, no. 4, pp. 30–33.

11. **Pritykin F. N., Nebritov V. I.** Creation of a working zone of the mechanism of a hand of the androidny robot taking into account the provision of prohibited zones, *Omskij nauchnyj vestnik*, 2017, no. 1, pp. 5–9 (in Russian).

12. **Galechan V. K., Salamandra B. L.** K postroeniju algoritma roboty manipulyatora v srede s prepyatstvijami (Construction of the algorithm of the paddle in an environment with obstacles), *Mashinovedenie*, 1984, no. 2, pp. 40–47 (in Russian).

13. **Korendjasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I.** Manipulacionnye sistemy robotov (Manipulation of robots), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 472 p. (in Russian).

14. **Zenkevich S. L., Yushchenko A. S.** Control of robots. Bases of management of handling robotic systems, Moscow, Publishing house of, MVTU, 2000, 400 p. (in Russian).

УДК: 004.896:629.78

DOI: 0.17587/mau.18.458-468

С. Э. Чернакова, науч. сотр., s_chernakova@rambler.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО,

Л. А. Станкевич, канд. техн. наук, проф., stankevich_lev@inbox.ru,

С. В. Хлопин, канд. техн. наук, доц., hlserg@mail.ru,

Институт компьютерных наук и технологий

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,

А. И. Нечаев, нач. отдела, a_nechaev@rambler.ru,

ОАО "Научно-испытательный институт эргатических систем", Московская область, г. Жуковский

Взаимодействие оператора и роботов при обучении показом и телеуправлении гетерогенными робототехническими системами на основе модели формы движения¹

Рассматриваются задачи взаимодействия оператора и роботов, обучения и телеуправления группой различных по функциональному назначению (гетерогенных) роботов. Используется обучение показом, обеспечивающее распознавание формы естественных движений человека-оператора. Приводятся результаты экспериментальных исследований по коррекции сценариев поведения команды роботов. Предложенные подходы к обучению и телеуправлению предполагается использовать для роботов-ассистентов и антропоморфных сервисных роботов, в том числе работающих в группе.

Ключевые слова: робот, групповое управление, коррекция сценариев, реконфигурация, обучение показом, телеуправление, гетерогенные роботы

Введение

В настоящее время большой интерес вызывает задача управления автономными роботами и бес-

пилотными аппаратами в спасательных, военных или космических миссиях, а также промышленными и сервисными роботами, выполняющими различные задачи индивидуально и в группе, в том числе при непосредственном взаимодействии с человеком.

Также известны компьютерные моделирующие комплексы, игровые программы с виртуальными

¹ Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (Проект 16-08-01277-а) и Программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг. (0073-2015-0003).

роботами, которые могут рассматриваться как роботы-агенты, решающие совместно индустриальные, экономические и социальные задачи, или агенты-игроки, участвующие в виртуальных командных играх роботов.

Взаимодействие операторов и роботов, работающих в группе, возможно на индивидуальном и групповом уровнях. На индивидуальном уровне взаимодействие оператора и робота реализуется первоначально в процессе обучения, при котором оператор формирует сообщение, состоящее из инструкции (команды) для робота и описания формы рабочего движения.

Контроль и коррекция оператором хода выполнения команды и рабочих движений роботом может выполняться с использованием канала видеонаблюдения и приема ответного сообщения от робота о выполнении данной команды или рабочего движения в процессе телеуправления.

На групповом уровне оператор в процессе обучения может определить (назначить) стратегию (тип группового поведения и распределение функций роботов) и тактику (пути и последовательности реализации сценариев). В процессе телеуправления оператор должен оценивать качество реализации и при необходимости корректировать поведение группы роботов.

Опыт эксплуатации систем телеуправления роботами, накопленный авторами, позволяет сделать следующий вывод: чем естественней для человека общение с роботом, тем эффективнее и надежнее будут использоваться роботы в реальной миссии, в том числе в заранее непредсказуемых условиях.

Предполагается, что при взаимодействии оператора и роботов в процессе проведения миссии с использованием группы различных по конструкции и функциональному назначению (гетерогенных) роботов необходимо решать следующие задачи:

- обучение каждого робота необходимым для выполнения миссии индивидуальным навыкам и рабочим движениям;
- обучение групповому поведению и возможности реконфигурации группы;
- контроль (тестирование) достоверности результатов обучения;
- телеуправление с возможностью коррекции миссии и сценариев в режиме реального времени.

В данной статье рассматриваются принципы и методы взаимодействия операторов и роботов в целях их обучения и телеуправления при функционировании индивидуально и в группе.

Ниже рассмотрены принципы взаимодействия операторов с роботами, основанные на использовании модели формы движения (МФД), в процессе обучения роботов показом рабочих движений и сценариев поведения, а также в процессе телеуправления групповым поведением роботов.

Экспериментально были исследованы процедуры обучения и телеуправления на примере команды роботов-футболистов типа *NAO*. Показана воз-

можность коррекции типовых движений в режиме реального времени при телеуправлении группами разных по функциональному назначению (гетерогенных) роботов.

Обзор основных космических проектов телеуправления роботами

В 1993 г. в проекте *ROTEX (DLR)* впервые были опробованы в космосе методы телеуправления с Земли очувствленным роботом-манипулятором [1—3]. Была предложена и реализована информационная технология телесенсорного программирования для обучения и последующего телеуправления космическими манипуляторами.

По проекту 1992р *ESA* в СПИИРАН в 2001—2003 гг. был разработан и изготовлен стендовый комплекс отработки информационных технологий обучения и телеуправления космическими роботами [4, 5] с использованием роботов-манипуляторов, макета фрагмента космической станции и компьютерных моделей.

В России реализован международный космический эксперимент *Контур-2* [6] по телеуправлению наземными роботами, выполняемому космонавтами, находящимися на борту МКС, с использованием двухкоординатной рукоятки с отражением усилий.

В рамках подготовки проекта *METERON* и лунных миссий специалисты *NASA* провели эксперимент, в ходе которого астронавты с борта МКС управляли роботом, который работал на полигоне в Калифорнии [7—9].

Надо отметить, что полигон, где двигался робот, имитировал лунную поверхность. Это не случайно — данную технологию управления планируется использовать прежде всего для исследования Луны, а также Марса и других планет.

Как известно, в течение длительного времени три марсохода США успешно работают на поверхности Марса [10]. Выполняется программный автоматический обход препятствий и пооперационное планирование и воспроизведение движений, которые команда экспертов ЦУП готовит заранее с ожиданием (остановкой) движения "марсоходов" при нештатных ситуациях.

Осуществляется визуальный и сенсорный контроль операций и движения. Манипуляторы успешно выполняют функции по сбору и анализу физико-химического состава образцов, дополняют возможности наблюдения и обследования объектов телекамерами.

Однако в указанных работах не реализовано силовомоментное телеуправление рабочими операциями космического или наземного робота. Актуальная проблема телеуправления при задержках времени более 0,5 с до настоящего времени не решена.

Не проводилось обучение роботов естественным для человека методом показа рабочих движе-

ний или сценариев выполнения операций, в том числе при телеуправлении группой роботов.

Сложные технологические и сборочные операции в космосе роботами не выполняются, оперативное телеуправление сменой сценариев и последовательности рабочих операций не предусмотрено.

По заказу NASA фирма *General Motors* разработала андроидный робот *Робонавт-2*, который в настоящее время находится внутри МКС [11]. Управление роботом *Робонавт-2* осуществляется астронавтами с пульта дистанционного управления, соединенного кабелем с системой управления роботом, размещенной на базовой платформе.

Проект андроидного робота *Justin (DLR)* [12] предусматривает копирующее телеуправление в основном с помощью экзоскелетона. Используется силомоментное очувствление и управление с обратной связью по силе и моменту. Реализовано так называемое податливое управление взаимодействием робота с человеком и предметами внешней среды.

Аналогичные российские проекты космических роботов *SAR-400* (ЦНИИМаш) [13] и *Косморобот* (РКК "Энергия") [14], выполняемые в настоящее время по заказу Роскосмоса, также предусматривают непосредственное управление космонавтами от дистанционного пульта или экзоскелетона.

Опытный образец робота *SAR-400* смог выполнить в условиях стенда около 50 типовых операций, моделирующих работу космонавта в открытом космосе: открытие/закрытие выходного люка, перемещение по поручням, осмотр и инспекцию поверхности станции, замену оборудования, операции с научной аппаратурой и специальным инструментом. Аналогичные операции под контролем космонавтов планируется выполнять и с помощью *Косморобота* при осуществлении внекорабельной деятельности (ВнеКД) на МКС.

Робот должен выполнить заданное движение в условиях возможных ошибок сенсоров и неточности описания компьютерной модели внешней среды. Проверяется возможность автоматической коррекции движений робота с использованием специальной моделирующей среды.

В нашей разработке, представленной в данной статье, в отличие от использования экзоскелета оператор получает возможность естественного обучения рабочим движениям, не учитывая особенности кинематики и динамики робота.

Предложенная фрейм-структурированная система представления рабочих движений, сценариев реализации операций и группового поведения позволяет осуществлять достоверный контроль знаний робота и оперативно корректировать поведение группы роботов при надежном и гарантированном выполнении миссий на основе прогноза развития ситуации в сложных условиях применения.

Принципы взаимодействия оператора и роботов

В плане индивидуального взаимодействия человека и робота наиболее интересным является взаимодействие с антропоморфным или гуманоидным роботом. Гуманоидные роботы являются мобильными роботами нового класса, имеющими не только антропоморфную форму, но и человекоподобное поведение. Эти роботы должны быть способны целенаправленно действовать в динамической неструктурированной среде и взаимодействовать с человеком, который может не иметь навыков управления роботами.

Поэтому разработка дружественного естественного интерфейса взаимодействия человека с такими роботами является одной из главных задач для эффективного, безопасного и надежного взаимодействия в реальных динамических условиях применения.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки такого интерфейса на базе перспективных мультимедиа технологий, позволяющих роботу распознавать и "понимать" жесты, рабочие движения и мимику человека, распознавать голосовые команды и естественные движения (позы) "хозяина".

В плане группового взаимодействия особенно интересной и плохо изученной проблемой является взаимодействие человека и группы роботов при выполнении совместной (командной) работы, требующей выработки и согласования общих намерений и поведения у всех членов команды (людей и роботов) на пути к достижению общей цели.

В данной статье представлены методы обучения и телеуправления группой роботов с использованием команды реальных роботов-футболистов и специальной виртуальной игровой среды для отработки основных принципов взаимодействия человека и роботов в команде.

Такая реальная команда роботов и виртуальная игровая среда могут быть универсальным средством для моделирования и исследования взаимодействий оператора и группы роботов, имеющих сложное коллективное и индивидуальное поведение.

Разработанная авторами трехмерная среда виртуального футбола и баскетбола дает возможность оперативно управлять стратегией и тактикой командной работы роботов. Визуализация игры на мониторе компьютера оператора позволяет ему контролировать поведение роботов как агентов команды. Использование соревновательной среды позволяет исследовать разные стратегии и тактики командной работы и выбирать лучшие из них.

Такое сочетание реальной группы роботов и виртуальной игровой среды может использоваться не только для исследований методов обучения, но и для моделирования процессов телеуправления реальными роботами (беспилотными аппаратами) из центров группового управления, например, для эффективного выполнения сервисных, медицинских, транспортных и других задач.

В нашем случае для моделирования группового взаимодействия (оператор — робот) используются игровые 3D-среды футбола или баскетбола. Например, в работе [15] описан 3D-вариант среды симуляции баскетбола роботов-агентов, названный *RoboNBA* (*National Basketball Association*). В этой среде, а также в среде футбола роботов *Robocup Soccer* авторами данной работы было проведено моделирование стратегии и тактики взаимодействий автономных интеллектуальных роботов-агентов между собой и с человеком [16].

В системах группового (командного) управления оператор может ввести инструкции по изменению стратегии и тактики командной работы реальных роботов через терминальный компьютер, в котором должна находиться специальная программа агента-супервизора, имеющего доступ к виртуальной игровой среде моделирования и каналам связи с группой реальных роботов.

Виртуальная игровая среда моделирования представляет собой сервер и группу интеллектуальных агентов, моделирующих роботов. Такая среда является многоагентной по определению. Структура системы взаимодействия оператор — группа роботов-агентов представлена на рис. 1.

Мультиагентный подход в последнее время все чаще применяется для организации совместного решения сложных задач группой взаимодействующих агентов [17]. Развитие такого подхода привело к разработке мультиагентной технологии, которая позволяет реализовать мощные открытые распределенные робототехнические системы на базе автономных роботов-агентов, взаимодействующих друг с другом. Для того чтобы действия таких роботов были подобными человеческим, они должны иметь интеллектуальные или когнитивные системы управления [18, 19].

В многоагентных игровых средах агенты моделируют роботов, и они реализуются как автономные интеллектуальные агенты с добавленными функциями координации действий в группе. Каждый

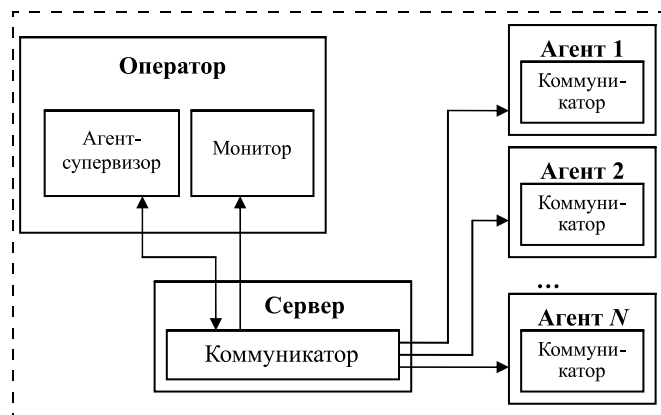


Рис. 1. Схема виртуальной среды для организации взаимодействия оператора и группы роботов

агент реализует набор функций, которые обеспечивают индивидуальное и коллективное поведение роботов. Агенты в модельной среде строятся на основе слоистой реактивной архитектуры, позволяющей реализовать поведение роботов, подобное человеческому.

Наиболее сложные роботы-агенты строятся как когнитивные, т.е. способные к автоматическому накоплению знаний в процессе функционирования и рациональному принятию решений на основе ментального вывода [20, 21].

Взаимодействие роботов-агентов определяется их верхним уровнем коллективного поведения. При этом должны использоваться специальные функции, которые реализуют механизмы координированного поведения. Они обеспечивают способность роботов-агентов кооперироваться или соревноваться при выполнении целенаправленных действий.

Модель формы движения

Основной подход к моделированию формы движений в процессе обучения роботов изложен в работах [22—24]. Авторами данной статьи предложено использовать модели формы движений (МФД), основанные на системе фреймов М. Минского [25], для хранения формы рабочих движений, а также сценариев поведения в виде семантико-топологической системы фреймов.

Основной особенностью разработанной МФД является сочетание семантического моделирования различных объектов (и движений как объектов) с моделированием топологических отношений между объектами и классами объектов внешней среды (ВС) [26].

Язык описания, используемый в МФД, представляет собой многоуровневую иерархическую систему фреймов, содержащих одновременно семантическое описание элементов формы и топологические (метрические) характеристики, а также методы и процедуры, характерные для выполнения различного типа движений и сценариев поведения.

МФД оперирует со множеством объектов (понятий) $\{B\}$, под которыми понимаются как отдельные движения, так и фрагменты траекторий сложного движения или последовательности действий (рабочего сценария).

Множества отношений $\{R\}$ между объектами подразделяются на логические (семантические) $\{R_S\}$ и топологические (метрические) $\{R_T\}$ (такие как: разделены, внутри, прикасаются, равны, покрывает, перекрывает).

Объекты МФД могут быть объединены в классы $\{K_B\}$, отношения на уровне классов можно также разделить на семантические $\{R_S^k\}$ (наследования, включения и др.) и топологические отношения $\{R_T^k\}$ (локальные, связанные, многозвенные и т.п.).

Совокупность указанных отношений можно представить следующим образом:

$$\{R\} = \langle \{R_S\}, \{R_T\}, \{R_S^k\}, \{R_T^k\} \rangle.$$

В общем виде фрейм-структурированное описание МФД может быть представлено следующим образом:

$$\text{МФД} = \langle \{B\}, \{K_B\}, \{R\}, \{T\}, \{M_B\} \rangle,$$

где $\{B\}$ — множество объектов = движений (рабочих сценариев); $\{K_B\}$ — множество классов объектов = движений и сценариев; $\{R\}$ — множество отношений объектов = движений и их классов; $\{T\}$ — множество задач, решаемых с использованием движений; $\{M_B\}$ — множество методов применения объектов.

Семантика объекта МФД (фрейма движения) определяется как совокупность имени, полей, атрибутов и методов. Будем считать, что класс K_B порождает название или имя фрейма движения, а поле семантических параметров F_S определяет основные отличительные признаки движения.

Для связи фрейма объекта с типовым методом использования движения M_B вводится понятие "атрибут метода" A_M . Таких атрибутов метода A_M может быть несколько для различных задач из множества $\{T\}$, в которых используется данное движение — объект B .

Для структуризации иерархической системы фреймов, т.е. организации перекрестных связей фреймов различных уровней между собой, вводятся понятия "атрибут предка" A_F и "атрибут потомка" A_C .

Для организации параллельных связей фреймов различных классов объектов МФД может быть организована горизонтальная связь в виде "атрибут соседей" A_N .

Таким образом, семантическое описание объекта МФД (B_S), формируемого и запоминаемого при обучении в виде фрейма, может выглядеть следующим образом:

$$B_S = \langle N_B, F_S, A_S, \text{Sign}_B \rangle,$$

где B_S — семантическое описание объекта МФД; N_B — имя объекта; F_S — поле семантических параметров; $A_S = \langle \{A_M\}, \{A_F\}, \{A_C\}, \{A_N\} \rangle$; Sign_B — условное обозначение объекта.

Для представления классов МФД может быть использовано, по аналогии, следующее описание:

$$K_B = \langle N_K, F_K, A_K, \text{Sign}_K \rangle,$$

где K_B — описание класса объектов МФД; N_K — название класса объектов; F_K — поле признаков класса объектов; $A_K = \langle \{A_M^K\}, \{A_F^K\}, \{A_C^K\}, \{A_N^K\} \rangle$; Sign_K — символическое обозначение класса.

Топологическое описание (конфигурация) движения (B_T) также запоминается в МФД в виде сис-

темы фреймов при обучении показом и может быть представлено следующим образом:

$$B_T = \langle N_B, F_T, A_T, \text{Ex}_B \rangle,$$

где B_T — топологическое описание объекта МФД; N_B — имя объекта (движения или рабочего сценария); F_T — поле геометрических (метрических) параметров; A_T — атрибуты конфигурации траектории движения (схемы сценария); Ex_B — геометрическая модель, образное представление движения.

Воспроизведение движения (рабочего сценария) роботом после обучения показом выполняется на основе множества типовых движений (фрагментов сценария), форма которых была сохранена в виде системы фреймов МФД.

Особенность воспроизведения движения (рабочих сценариев) в реальной ВС заключается в том, что фрагменты движений, которым обучен робот (рабочих операций), могут быть использованы в разных последовательностях в зависимости от внешних условий.

Число элементарных движений (рабочих операций), запоминаемых в МФД при обучении, возрастает при увеличении объема задач, решаемых роботом, однако этот рост будет несоизмеримо меньше, чем возрастание числа сценариев и вариантов поведения (миссий), для выполнения которых используется робот.

В этом заключается одно из существенных преимуществ предложенной семантико-топологической модели формы движений.

Эффективность предложенных методов обучения подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментов с роботами-манипуляторами [27, 28].

При этом человек не надевает на себя экзоскелет, ему важно надежно передать свой опыт (навыки) и достоверно проверить качество и достоверность этих знаний, полученных в процессе обучения системой управления роботом, различных по конструкции и функциональному назначению [29, 30].

Обучение робота показом движения

Обучение показом движений может рассматриваться как передача знаний о моторных, сенсорных и поведенческих навыках от человека-оператора к роботу для реализации надежного, безопасного и эффективного поведения робота на основе адекватного восприятия действий человека-оператора.

При обучении может использоваться телекамера робота, которая "наблюдает" движение руки (или головы) человека (рис. 2). При этом системой управления робота определяются пространственные координаты движения человека и выполняется распознавание формы траектории обучаемого движения.

Необходимо отметить, что во время распознавания движений человека у робота формируется опыт движений с сохранением одновременно мет-

рической и семантической информации, содержащейся в данных, получаемых от сенсоров (в данном случае — телекамеры).

Отличительной чертой предложенных методов обучения является естественность представления и передачи знаний о движении от человека к роботу, которая, в свою очередь, обеспечивает:

- свободу движений человека без ограничений, связанных с какими-либо техническими приспособлениями (рукоятками и экзоскелетами);
- максимальное использование интуитивного опыта и профессиональных навыков человека;
- доступность метода обучения, так как не требуется длительная тренировка человека-оператора и углубленное (детальное) изучение каких-либо технических средств;
- наглядность хранения опыта движений, простота и надежность проверки результатов обучения.

Обучение робота показом (демонстрацией) рабочих операций включает следующие этапы:

- индивидуальное обучение рабочим движениям (навыкам, рабочим сценариям);
- отработка команд приема и передачи информации роботом;
- показ типового набора рабочих операций (сценариев), которые должен уметь выполнять данный робот в конкретных условиях и миссиях.

Рассмотрим простой и наглядный пример обучения робота движению обхода препятствия с использованием МФД.

Геометрические параметры топологии F_T формы движения обхода могут быть представлены, например, в следующем виде (рис. 3):

- X_B, Y_B, Z_B — координаты некоторой центральной точки траектории движения в заданной системе координат;
- DM_B — средний размер траектории движения, определяемый по некоторому базовому расстоянию: среднему, максимальному или заранее выбранному между определенными точками элементов траектории движения M_i и M_j ;
- αM_{ij} — угол между осями симметрии или базовыми (опорными) линиями отдельных фрагментов траектории (LM_i и LM_j);
- $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ — углы ориентации в пространстве центральной оси симметрии LM_{ij} конфигурации движения.

Для реализации обучения методом показа формы движения на основе МФД требуется в процессе

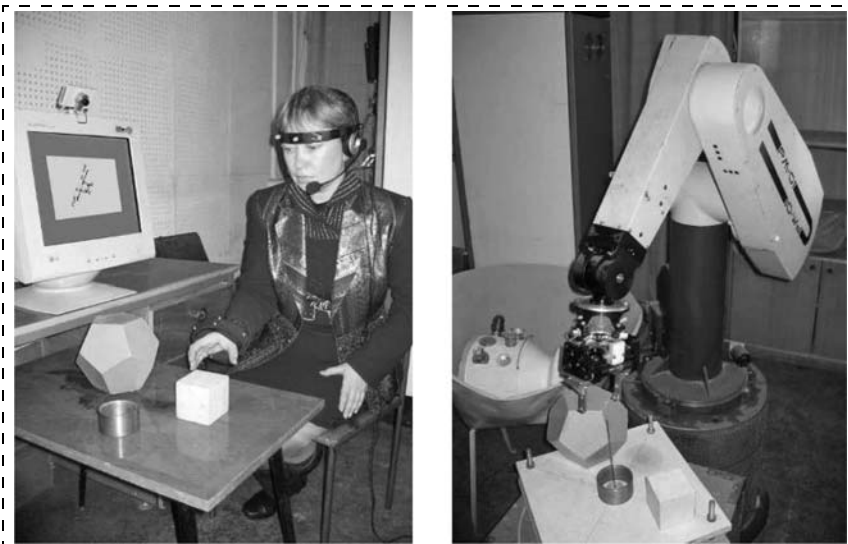


Рис. 2. Обучение взятию объектов показом движений руки и головы

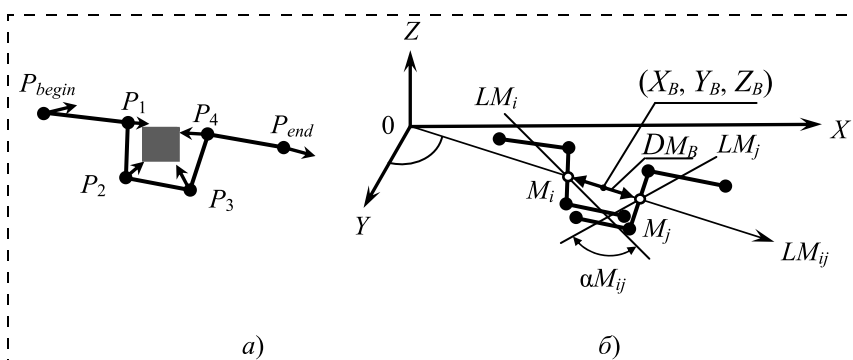


Рис. 3. Пример топологии движения обхода препятствия:

a — пример формы движения при обучении обходу препятствия; *б* — топология движения обхода в заданной системе координат

работы оператора с роботом формировать знания, необходимые для последующего выполнения движения (рабочей операции) роботом, которые автоматически записываются в формализованном виде в базу знаний (БЗ) системы управления робота. Авторами данной работы были реализованы несколько вариантов БЗ, в том числе с формированием знаний в нечетко-логическом базисе (рис. 4) [7].

В данном обобщенном методе формирования БЗ оператор ведет наблюдение за поведением робота с формированием вектора параметров обратных связей X и вектора управления U , которые преобразуются блоком ручного управления (РУ) в вектор сигналов управления Y .

Параллельно работает обучающий алгоритм, который обрабатывает векторы X и U и в случае подтверждения правильности управления от оператора формирует правило в виде отображений $X_p \rightarrow Y_p$.

Нечетко-логический вариант системы обучения БЗ робота основан на нечетком представлении входных и выходных переменных с использованием шкал, показывающих наборы термов (поименованных квантов переменных) и соответствующих им функций принадлежности. На рис. 5 показаны

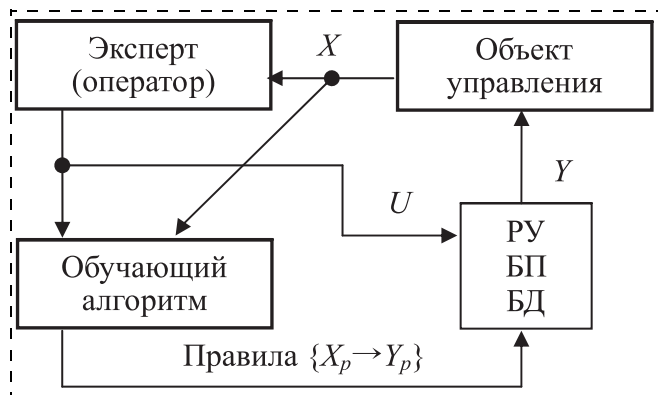


Рис. 4. Схема формирования БЗ в нечетко-логическом базисе

шкалы и функции принадлежности треугольной формы для термов входной X_p и выходной Y_p нечетких переменных на примере $X_p \rightarrow Y_p$:

- М — терм "малое";
- С — терм "среднее";
- Б — терм "большое".

Конкретные значения переменных проектируются на соответствующие оси двух функций принадлежности $\mu(X)$ и $\mu(Y)$, и в результате получают степени принадлежности конкретных значений входных и выходных переменных к соответствующим термам.

На их основе в БЗ системы управления робота формируются четыре лингвистических правила (БП) и соответствующие им отношения степеней принадлежности (БД), которые связаны с обрабатываемым примером:

$$\text{БП: } \begin{cases} x_M \rightarrow y_M; \\ x_M \rightarrow y_C; \\ x_C \rightarrow y_M; \\ x_C \rightarrow y_C; \end{cases} \quad \text{БД: } \begin{cases} \mu_{X_p}^M \rightarrow \mu_{Y_p}^M; \\ \mu_{X_p}^M \rightarrow \mu_{Y_p}^C; \\ \mu_{X_p}^C \rightarrow \mu_{Y_p}^M; \\ \mu_{X_p}^C \rightarrow \mu_{Y_p}^C. \end{cases}$$

Так могут быть обработаны все последовательно формируемые при обучении робота примеры движений, показанные, например, естественными движениями руки человека.

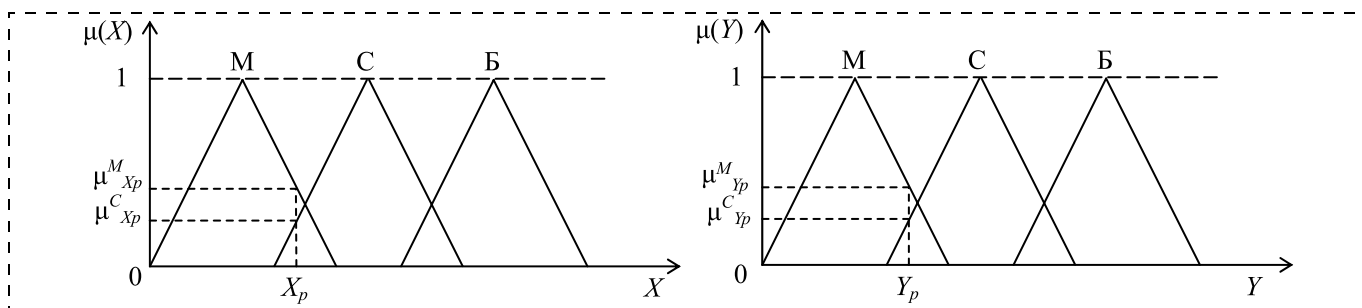


Рис. 5. Функции принадлежности входной и выходной переменных БЗ

Конечная цель работы обучающего алгоритма — обобщить все полученные БП и БД и убрать избыточность в общей БЗ системы управления робота после обучения.

Обучение роботов групповому поведению с реконфигурацией

Обучение группы гетерогенных (разнородных по функциональному назначению) роботов возможно по общему сценарию с коррекцией поведения в процессе телеуправления при передаче команд от робота к роботу.

Обучение группы роботов показом (демонстрацией) необходимых взаимодействий и сценариев коллективной работы включает следующие этапы:

- обучение группы роботов типовым взаимодействиям (операциям);
- совместная отработка команд передачи информации;
- показ примеров реконфигурации группы;
- показ типового набора сценариев работы группы.

На примере команды роботов-футболистов (3...5 роботов типа *NAO*) покажем варианты сигналов взаимодействия, передачи функций и реконфигурации группы.

В примерный перечень возможных вариантов коррекции поведения группы роботов на примере роботов-футболистов входят:

- сигналы роботов о повреждениях и необходимости замены;
- сигналы обнаружения непредвиденной ситуации и/или условий на поле;
- сигналы передачи функций в группе и передачи управления;
- сигналы смены сценариев поведения при возникновении новых ситуаций;
- сигналы капитана (робота) тренеру о новой ситуации и запроса помощи;
- сигналы коррекции миссии от тренера и сигналы подтверждения робота;
- сигналы информации о поведении команды противника и/или их намерениях;
- ложные, отвлекающие команду противника и их тренера сигналы и знаки.

Возможности передачи функций и реконфигурации группы роботов-футболистов для выполне-

ния миссии на основе заранее обученных вариантов сценариев и их комбинаций следующие:

- смена капитана при замене, удалении с поля и/или по команде тренера;
- передача функций вратаря, защитника, полузащитника и нападающего;
- увеличение числа защитников, нападающих, полузащитников;
- изменение схемы расстановки роботов на поле (позиционной схемы);
- коррекция динамической схемы атаки (защиты, отбора мяча, другой тактики);
- выполнение нескольких функций одними и теми же роботами;
- ложные, отвлекающие расстановки и схемы движения роботов на поле.

Для передачи управления, например функции капитана команды, в процессе выполнения миссии (игры на поле) необходимо передать команду всем роботам в команде непосредственно от человека (тренера) или последовательно от одного робота на поле к другому роботу.

В качестве такой команды, воспроизводимой (транслируемой) человеком и роботами, может быть жест, звуковой сигнал или "сигнальная поза" (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Необходимость оперативной коррекции сценария (миссии) команды роботов-футболистов может быть обусловлена целым рядом заранее предполагаемых, а также непредвиденных ситуаций, в том числе:

- повреждение (невозможность движения) одного из роботов;
- потеря управления и/или связи с тренером одного (нескольких) роботов;
- замена робота на запасного согласно правилам игры;
- удаление с поля одного из роботов;
- наличие нескольких мячей и/или посторонних предметов на поле;
- силовое воздействие (нападение) одного (нескольких) роботов противника;
- выключение света, появление солнечных и других световых помех;
- появление неожиданных объектов и препятствий на поле.

При возникновении новых ситуаций реконфигурация и передача управления в группе роботов выполняется роботом-капитаном в автономном режиме с передачей сообщений тренеру и получением от него, в случае наличия связи, дополнительных инструкций (коррекции).

Для реализации возможностей передачи команд коррекции сценариев необходимо предварительное обучение роботов распознаванию жестов и "сигнальных поз" тренера и движений других роботов, например методом показа движений.

Рассмотрим пример применения МФД для описания сценария атаки группой роботов-футболистов с целью забить гол в ворота противника.

Объекты МФД — координированные действия игроков нападающей группы (формации) $\{B\}$, включающие: (1) ведение мяча, (2) удар по воротам, (3) пас партнеру, (4) занятие позиции для принятия паса, (5) захват мяча при пасае.

Выделим два класса объектов $\{K_B\}$: траекторные движения и действия.

Семантика объекта $\{B_S\}$: имя игрока (нападающий, полузащитник, защитник, вратарь), маркеры поля (разметка, ворота, игроки партнеры и противники), атрибуты связей (видение мяча, партнер и противника, передача сообщений).

Топология объекта $\{B_T\}$: номер игрока, геометрия поля и позиция игрока, атрибуты действий (наличие мяча, позиция партнера, позиция противника, содержание сообщения).

Отношения между объектами $\{R\}$: (1) дать пас партнеру, (2) получить пас от партнера и другие.

Такое описание МФД является своеобразной спецификацией, позволяющей четко реализовать сценарий атаки. При этом должны быть программно определены процедуры выполнения соответствующих действий и взаимосвязей игроков (рабочие сценарии).

Телеуправление поведением группы роботов

Результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием группы реальных роботов *NAO* и виртуальной игровой среды, подтвердили возможность телеуправления роботами различного функционального назначения на основе типового набора заранее обученных рабочих движений.

Телеуправление группой, например роботов-футболистов, выполняется в зависимости от ограничений (правил игры) миссии следующим образом:

- ведется оперативное наблюдение и анализ ситуации и состояния команды;
- непрерывно уточняется прогноз развития ситуации, состояния команды и хода выполнения миссии;
- всеми возможными способами (жестами, знаками, звуками) тренер корректирует действия отдельных роботов и подсказывает им варианты индивидуального поведения;
- отдельно капитану команды тренер заранее предусмотренными или любыми другими способами передает сигналы смены сценариев и коррекции хода миссии;
- капитан команды (или любой другой робот) передает тренеру сообщения о состоянии группы роботов, принятые решения о реконфигурации группы и другую информацию.

Телеуправление может выполняться при наличии моделирующих средств (карты прогноза миссии) с учетом заранее обученных наборов сценариев (рабочих операций).

На основе заранее обученных рабочих операций, типовых методов и вариантов сценариев возможна коррекция хода выполнения миссии авто-

номно капитаном команды при взаимодействии (телеуправлении) с человеком-оператором (тренером) (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Коррекция рабочих операций, выбора и комбинации фрагментов из набора сценариев группы роботов осуществляется по специальному "Протоколу коррекции миссии" по различным каналам связи, в том числе посредством сети Интернет.

Протокол коррекции миссии может быть представлен на стандартном языке типа *XML* в семантическом и графическом виде и включает в себя следующие объекты:

- "Схема" = коррекция позиционной и динамической схем группы;
- "Работа" = перераспределение и объединение функций роботов в группе;
- "Резерв" = введение резервов функций и "домашних заготовок" в действия группы;
- "Смена" = смена тактики, темпа и техники выполнения функций группы и отдельных роботов;
- "Переход" = переход от одного сценария к другому, выбор вариантов достижения цели миссии;
- "Передача" = передача от капитана новой информации о ситуации на основе известных сценариев;
- "Прием" = прием капитаном новых (составной схемы, комбинации) схем и сценариев.

Для обеспечения телеуправления предлагается на каждом роботе реализовать алгоритмы передачи визуальной и аудиоинформации с автоматическим управлением качеством изображения в зависимости от фактической полосы пропускания каналов связи.

Основные отличия предлагаемых методов телеуправления группами роботов:

- 1) адресный доступ к узлам системы телеуправления;
- 2) работа системы с использованием различных физических методов передачи в каналах связи (акустический, визуальный, оптический, радиотехнический);
- 3) работа системы с различными скоростями передачи данных в широком динамическом диапазоне;
- 4) автоматическая реконфигурация системы телеуправления при изменении статуса доступности связи между узлами сети;
- 5) защищенный шифрованный канал передачи данных между узлами сети.

Этот же стандарт может быть эффективно использован для обмена видео и акустической информацией человека-оператора (тренера) с командой роботов-футболистов.

В качестве основы для создания информационной системы предлагается принять семейство Интернет-протоколов *IPv4* [31], которое отвечает всем поставленным задачам. Кроме того, протокол *IPv4* имеет хорошую документацию.

Использование семейства протоколов *IPv4* позволяет программным образом получать отладочную информацию о текущем состоянии информационной сети.

Это дает возможность осуществлять "обратную связь" в информационной сети телеуправления роботами для адаптивного управления типом и размером корректирующего сигнала, выбором маршрута и способа доведения коррекции до каждого робота в команде.

Кроме того, текущее состояние информационной сети телеуправления необходимо знать для реконфигурации ресурсов сети, ее отладки и управления.

Для обеспечения безопасных каналов передачи данных предлагается осуществлять объединение узлов в виртуальную частную сеть.

На узлах сети должно быть размещено программное обеспечение, способное отслеживать работоспособность различных каналов связи и реконфигурировать текущее состояние использования каналов связи с прогнозом по заранее заданным сценариям (миссиям) группы роботов.

Заключение

Эффективность предложенных подходов к обучению и телеуправлению для группы роботов подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментов с андроидными роботами-футболистами.

Телеуправление поведением группы андроидных роботов возможно как по общему сценарию для группы, так и по индивидуальному сценарию для коррекции (дообучения) поведения с возможностью передачи (трансляции) знаний от робота к роботу.

Результаты проводимых исследований могут найти применение при создании перспективных технологий обучения и систем телеуправления промышленными, космическими и сервисными роботами.

В настоящее время авторами выполняются проекты по созданию интеллектуальных роботов-ассистентов для медицины и телемедицины в помощь врачу и пациенту, а также для домашнего и офисного применения.

Список литературы

1. **Hirzinger G.** Sensor-based space robotics — ROTEX and its telerobotic features // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993. Vol. 9, N. 5.
2. **Kim W. S., Schenker P. S., Bejczy A. K., Leake S., Ollendorf S.** An Advanced Operator Interface Design with Preview/Predictive Displays for Ground Controlled — Space Telerobotic Servicing // SPIE Conference 2057, Telemanipulator Technology and Space Telerobotics. Boston, MA, Sept. 1993. P. 96—107.
3. **Hirzinger G., Brunner B., Knoch S., Koeppel R., Schedl M.** Towards a new Robot Generation. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V. (DLR) Oberpfaffenhofen, Wessling // The 8th International Symposium, Schohan, Japan, 4—7 Oct. 1997.
4. **Kulakov F.** Methodology of Virtual Body Immersion into Real Environment // Proc. 4th International Workshop CSIT'2002, Patras, Greece, 2002.
5. **Kulakov F. M., Nechaev A. I.** Advanced man-machine interface for telerobotic based on man-operator's motions and gaze

direction tracking // 6th International seminar "Science and computing", Moscow, 15—17 September, 2003.

6. **Силиненко А. В.** Российско-германский космический эксперимент "Контур-2". URL: http://knts.tsniimash.ru/ru/src/Conf_InfRes/Силиненко%20А.В.

7. **METERON.** URL: robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2011/.../03_schiele.pdf.

8. **Заборовский В. С., Кондратьев А. С., Мулюха В. А., Силиненко А. В., Ильяшенко А. С.** Управление группировками напланетных роботов с борта пилотируемой орбитальной станции в рамках проекта "METERON" // Труды СПбПУ, 2012. 6 (162).

9. **С МКС** управляют наземным роботом. URL: www.Vesti.ru (дата обращения 05.07. 2013).

10. **Remote telepresence** A new tool for space exploration. American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace America, February 2013. P. 38—44.

11. URL: <http://knts.tsniimash.ru/ru/src/bulletin/ВЫПУСК%20%2016.pdf/> Проект "Робонавт"

12. URL: www.kyb.tue.mpg.de/.../ICRA09_1027_FI_%5B0%5D.pdf. Проект "Justin" DLR.

13. **Андроидный** робот SAR-400, Новости ВПК, Внекорабельную деятельность скоро будут осуществлять роботы, 02.07.2014, URL: vpk.name.

14. "Создание роботов космического назначения для поддержки внекорабельной деятельности космонавтов", ТЗ на ОКР № 56/9/16 "ПЛОИ (Косморобот)" Федеральная космическая программа России на 2016—2025 годы, Приложение 4, раздел 1, подраздел 4.

15. URL: <http://www.fiba.com.> (Official rule of basketball in FIBA).

16. **Станкевич Л. А.** Многоагентная программная среда футбола роботов и разработка программных агентов для RoboCup // Труды международной конференции "Искусственный интеллект в 21-м веке" (ICAI 2001). Т. 3. М.: Физматгиз, 2001.

17. **Gorodetski V. I. and Lebedev A. N.** Multi-agent Technology for Planning, Scheduling, and Resource Allocation // In Third Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Paris, France, 1998.

18. **Stankevich L. A.** A cognitive agent for soccer game // Proc. of First Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-agent Systems (СЕЕМАС'99), Printed by "Anatoliy", S-Petersburg, 1999.

19. **Станкевич Л. А.** Многоагентная технология для когнитивных систем управления автономными роботами. "Экстремальная робототехника" // Труды X конференции, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 1999.

20. **Станкевич Л. А.** Когнитивная робототехника // Экстремальная робототехника. Тр. X конф., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2002.

21. **Станкевич Л. А.** Когнитивные структуры и агенты в интеллектуальных системах управления роботов // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 1. С. 41—55.

22. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Нечаев А. И.** Обучение робота методом показа с использованием "осязательной перчатки" // Тр. Первой Международной конференции по мехатронике и робототехнике "МиР-2000". Т. 2. 2000. С. 155—164.

23. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Часть I. Концепция и принципы моделирования движений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 7. С. 23—28.

24. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Часть II. Алгоритмы и реализация модели формы движения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 24—29.

25. **Минский М.** Фреймы для представления знаний: Пер. под ред. Ф. М. Кулакова. М.: Энергия, 1979, 152 с.

26. **Алферов Г. В., Кулаков Ф. М., Нечаев А. И., Чернакова С. Э.** Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике: учеб. пособ. СПб.: Изд-во С.-Пб. ун-та, 2009. 168 с.

27. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Крючков Б. И., Усов В. М.** Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в инженерно-психологическом проектировании (на примере дистанционного управления манипуляционным роботом методом показа движений) // Труды Института психологии РАН. 2014. Вып. 6. С. 54—73.

28. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Крючков Б. И., Карпов А. А., Нечаев А. И., Усов В. М.** Включение робота-ассистента в совместную с космонавтами деятельность методом "обучения показом движений" // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2 (3). С. 29—32.

29. **Чернакова С. Э., Крючков Б. И., Усов В. М., Кулаков Ф. М.** Построение "тренажера-интерфейса" как способ планирования телеуправления манипуляционным роботом // Сб. тр. XII Всероссий. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). Москва, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 16—19 июля 2014 года. С. 3991—3997.

30. **Chernakova S. E., Kulakov F. M.** Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation // River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Chapter 5. "Information Technology for Interactive Robot Task Training Through Demonstration of Movement". P. 95—123.

31. **Протокол IPv4** — Вычислительные сети. URL: just-networks.ru/seti-tcp-ip/protokol-ipv4

Human — Robot Interaction During Learning and Telecontrol of the Heterogenic Robotic Systems Based on a Movement Shape Model

S. E. Chernakova, s_chernakova@rambler.ru✉,

St-Petersburg ITMO University, St-Petersburg, 199034, Russian Federation,

L. A. Stankevich, stankevich_lev@inbox.ru, **S. V. Hlopın**, hlserg@mail.ru,

St-Petersburg State Polytechnic University, St-Petersburg, 195251, Russian Federation,

A. I. Nechaev, a_nechaev@rambler.ru, Scientific-Testing Institute of Ergatic Systems Co., Moscow region, Zhukovsky, 140180, Russian Federation

Corresponding author: **Chernakova Svetlana E.**, Researcher, St-Petersburg ITMO University, St-Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: s_chernakova@rambler.ru

Received on July 30, 2016

Accepted on December 31, 2016

The authors consider the problems of interaction of operators and robots, learning and telecontrol of the groups of different-function (heterogenic) robots. The learning-by-showing method is used ensuring recognition of the natural movement's shape of a human operator. The preliminary learning of the gesture and "signal" pose recognition of both human and android robot is based on (teaching) learning-by-showing method. The Model of Movements Shape (MMS) is based on M. Minsky theory of the frame knowledge representation proposed for memorizing of the semantic-topology frames system of the typical shapes of the working movements such as the typical scenario of a robot's behavior. Some typical objects {B} of MMS are: simple robot movements, fragments of a complex shape of the robot movement trajectories or sequences (cyclogrammes) of the working robot operations (fragments of scenarios of a robot behavior). Semantic features of {B} are determined as frame with name, pa-

