

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ РОБОТ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ: ИТ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И NLP – КОГНИТИВНОГО ОБЪЯСНИТЕЛЬНОГО ИИ

**Боровинский Виталий Викторович¹, Капков Роман Юрьевич²,
Николаева Алена Валериановна³, Решетников Андрей Геннадьевич⁴,
Тятюшкина Ольга Юрьевна⁵, Ульянов Сергей Викторович⁶**

¹Директор;
ООО «АТОМ»;
Россия, 127566, г. Москва, пр-д Высоковольтный, д. 21, стр. 5;
e-mail: vitali.borovinsky@yandex.ru.

²Предприниматель, преподаватель-исследователь;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: info@kapkov.pro.

³Инженер математического моделирования;
ООО «АТОМ»;
Россия, 127566, г. Москва, пр-д Высоковольтный, 21;
e-mail: NikolaevaAlena8989@gmail.com.

⁴Кандидат технических наук, доцент;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
Старший научный сотрудник;
Объединенный институт ядерных исследований;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;
e-mail: agreshetnikov@gmail.com.

⁵Кандидат технических наук, доцент;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: tyatyushkina@mail.ru.

⁶Доктор физико-математических наук, профессор;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
Главный научный сотрудник;
Объединенный институт ядерных исследований;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;
e-mail: ulyanovsv46_46@mail.ru.

Тенденции современного рынка труда к замене цикличной ручной работы в различных, в том числе и в опасных условиях работы, стали основными факторами применения роботизированных систем. Среди них особое положение занимают мобильные роботы сервисного (повседневного) обслуживания (MPCO, MRSU – Mobile Robot for Service Use). Сервисные роботы доказали свою полезность в сфере обслуживания и стали, по существу, эффективным инструментом в передовых служебно-сервисных системах. Роботы современного поколения должны иметь повышенные интеллектуальные когнитивные способности для работы в среде жизнедеятельности человека. Рассмотрены кратко структурные особенности MPCO и когнитивного объяснительного ИИ на основе обработки ментальных команд на естественном языке оператора.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, имитационное моделирование, мягкие вычисления, генетический алгоритм, мобильный робот сервисного обслуживания, когнитивный объяснительный ИИ.



Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>

Для цитирования:

Интеллектуальный робот сервисного обслуживания: ит мягких вычислений и NLP – когнитивного объяснительного ИИ / В. В. Боровинский, Ю. Р. Капков, А. В. Николаева [и др.] // Системный анализ в науке и образовании. 2026. № 1. С. 21–47. EDN: XFXXSI. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/701>.

INTELLIGENT ROBOT FOR SERVICE USE BASED ON SOFT COMPUTING: NLP – COGNITIVE EXPLANATORY ARTIFICIAL INTELLIGENCE (XAI)

**Borovinsky Vitalii V.¹, Kapkov Roman Yu.²,
Nikolaeva Alyona V.³, Reshetnikov Andrey G.⁴,
Tyatyushkina Olga Yu.⁵, Ulyanov Sergey V.⁶**

¹General manager;
LLC "ATOM";
21 Vysokovoltny Lane, Moscow, 127566, Russia;
e-mail: vitali.borovinsky@yandex.ru.

²Businessman, teacher-researcher;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: info@kapkov.pro.

³Mathematical Modeling Engineer;
LLC "ATOM";
21 Vysokovoltny Lane, Moscow, 127566, Russia;
e-mail: NikolaevaAlena8989@gmail.com.

⁴PhD in Engineering sciences, associate professor;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
Senior Researcher;
Joint Institute for Nuclear Research;
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: agreshetnikov@gmail.com.

⁵PhD in Engineering sciences, associate professor;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia.
e-mail: tyatyushkina@mail.ru.

⁶Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, professor;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
Chief Researcher;
Joint Institute for Nuclear Research;
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: ulyanovsv46_46@mail.ru.

The trends of the modern labor market to replace cyclical manual work in various, including dangerous working conditions, have become the main factors in the use of robotic systems. Among them, Mobile Robots of daily maintenance (MRSO, MRSU – Mobile Robot for Service Use) occupy a special position. Service robots have proven their usefulness in the service sector and have become, in fact, an effective tool in advanced service systems. The work of the modern generation should have enhanced intellectual cognitive abilities to work in the environment of human activity. The structural features of the MRSO and cognitive explanatory AI based on processing mental commands in the operator's natural language are briefly considered.

Keywords: intelligent control system, simulation modeling, soft computing, genetic algorithm, mobile robot for service use, cognitive XAI.

For citation:

Borovinsky V. V., et al. Intelligent robot for service use based on soft computing: NLP – cognitive Explanatory Artificial Intelligence (XAI). *System analysis in science and education*, 2026;(1):21-47 (in Russ). EDN: XFXSSI. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/701>.

Введение. Разработка комплексной платформы интеллектуального управления поведением мобильного робота сервисного обслуживания

К негативным факторам, влияющим на развитие рынка МРСО, относятся – недостаточно быстрое развитие новых, необходимых для работы сенсоров, недостаточный уровень интеллектуализации систем управления роботами в целом, а также их высокая стоимость. Чтобы скомпенсировать негативные факторы, требуется проведение исследований, направленных на повышение качества сенсорного восприятия (тактильности и т.п), мобильности, управляемости, интеллектуальности и обучаемости роботов, а также расширение их технологических возможностей [1–3].

Возможности применения таких МРСО с повышенным уровнем интеллектуальности систем управления очень широкие – от сервиса в гостиницах и офисах, до способности обслуживания атомных реакторов или других опасных производств. Робототехнические комплексы такой направленности необходимы, как для повышения качества сервисных, промышленных и сопутствующих операций, так и для ликвидации опасных или непредвиденных ситуаций (т.н. «экстремальная робототехника»). Чрезвычайные или опасные условия окружающей среды могут привести к повышенным уровням радиоактивности, высоких температур, высоких газов и сопутствующих газов и т.д., что исключает работу людей в данной области и приводит к необходимости применения интеллектуальных автономных мобильных комплексов обслуживания. Примером разработки робототехнических систем сервисного использования является проект МРСО для работы в офисном здании (см., Рис. 1 и Рис. 2).

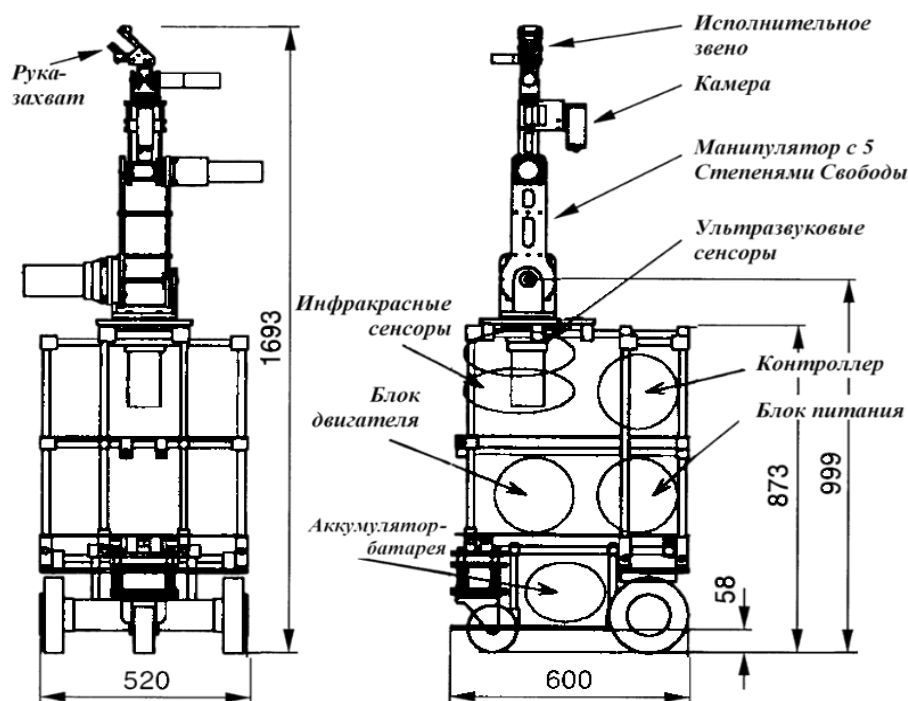


Рис. 1. Прототип МРСО

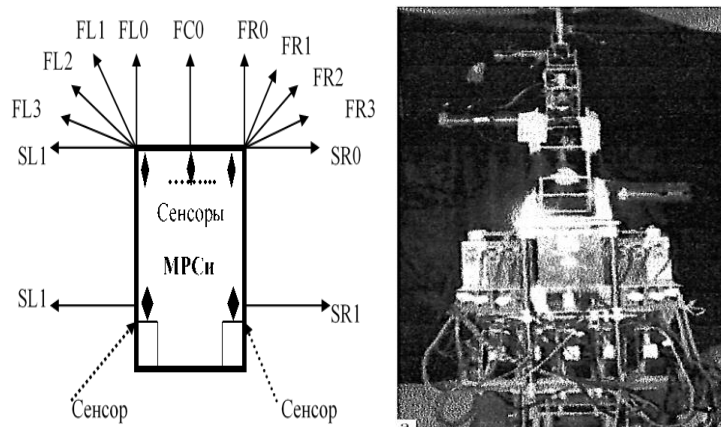


Рис. 2. Расположение сенсоров на прототипе МРСО (обозначения в тексте)

МРСО перемещается в неструктурированной среде при наличии людей и неожиданных препятствий. Определяют два основных класса МРСО – (А) системы, заменяющие человека в загрязненных, опасных и/или циклических работах; (Б) системы, взаимодействующие (через дружественный интерфейс) с человеком, облегчающие работу или повышающие комфортность.

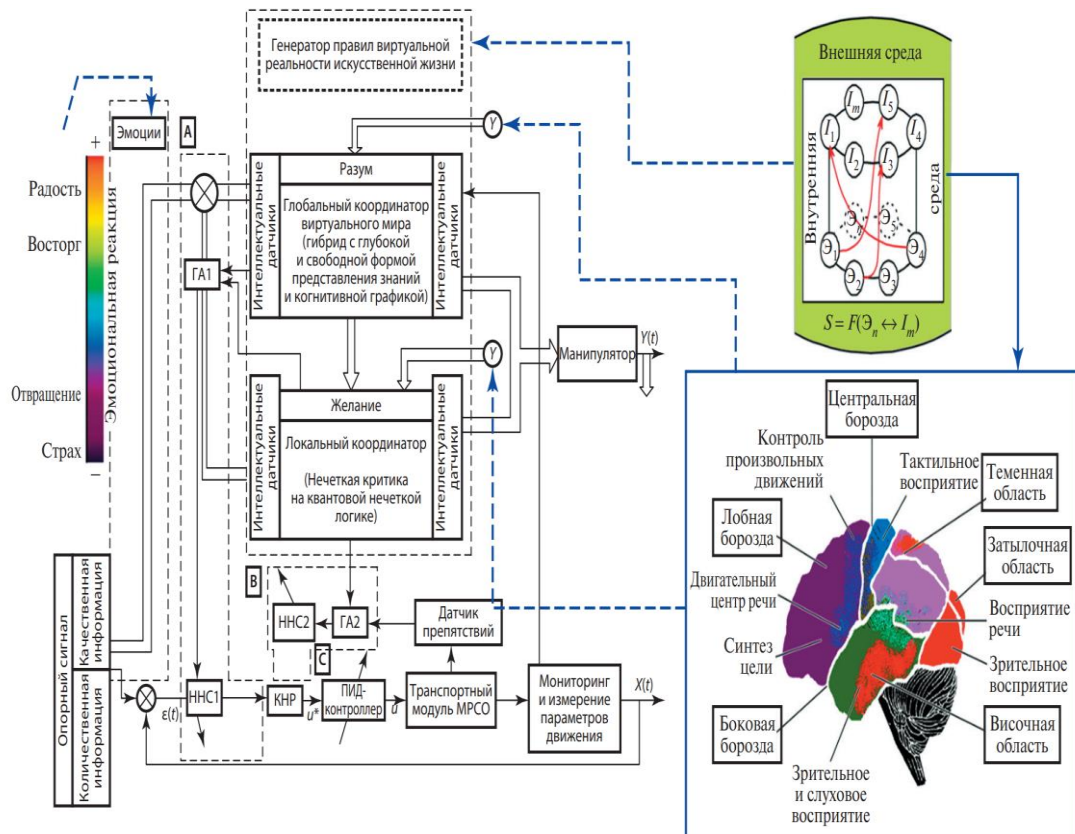
Класс А включает операции в опасных или экстремальных условиях (например, радиоактивные среды, высокие температуры, подводные условия, вакуум, вредные испарения-загазованность), пожаротушение, военные применения и так далее. Класс Б включает в себя медицину, домашнюю работу, развлечения и другие. Такие роботизированные системы должны быть способны преодолевать или обходить препятствия, встречающиеся на их пути, либо возвращаться в требуемое исходное (стартовое) положение, настраиваться на выполнение требуемых производственных операций и осуществлять их выполнение. Такие роботы и робототехнические комплексы все более необходимы из-за возрастающих требований к условиям безаварийности промышленных операций, а также условиям, которые являются опасными или трудными для человека-оператора.

Первоначальный вариант МРСО был разработан и его прототип представлен на рис. 1. Прототип создавался для решения задач класс Б, а именно, обслуживание в офисах делового центра. Прототип МРСО состоит из мобильной платформы, оснащенной поворотными приводами ведущих колес и пассивной подвеской для стабильности перемещения, а также манипулятором, имеющим пять степеней свободы с «трехпалым» конечным звеном (устройство захвата) и цифровой (CCD) камерой наблюдения (Рис. 1). Мобильная платформа МРСО оснащена 13-ю ультразвуковыми (УЗ) и 9-ю инфракрасными (ИК) сенсорами (Рис. 2).

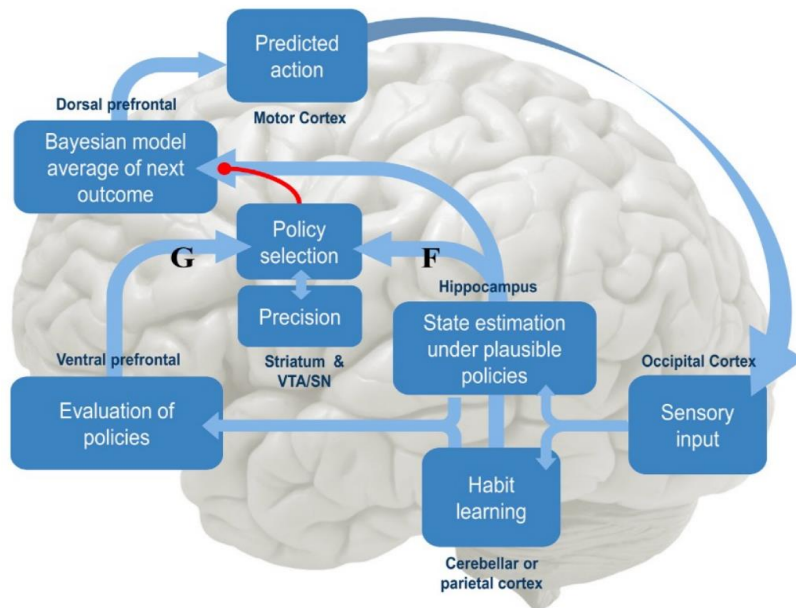
Разработка интеллектуальной платформы (системы управления поведением) реализуют способности МРСО выполнять заданную человеком работу в зданиях с присутствием людей, включая такие базовые операции, как открывание/закрывание дверей, вход/выход из лифтов и т.п. МРСО в данном варианте мог использоваться в дневное-рабочее время как робот секретарь-помощник, а вне рабочее – ночное время как «робот охраны и техобслуживания» здания, включая уборку помещений в офисах.

1. Структура интеллектуальной системы управления поведением МРСО

Общая структура разработанной интеллектуальной системы управления МРСО показана на Рис. 3 (а).



(a)



(б)

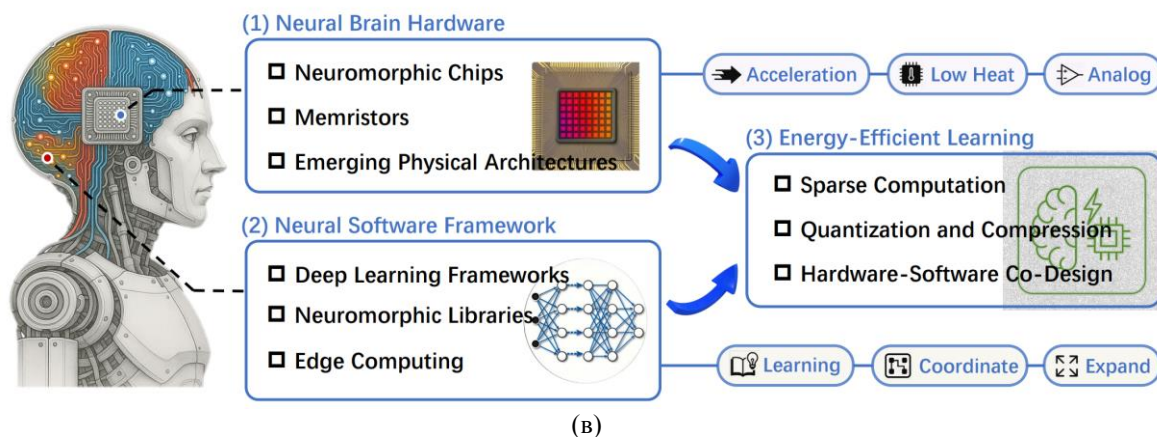


Рис. 3. (а) Структура Искусственной Интеллектуальной системы управления с распределенным представлением знаний (на уровне управляющего сигнала): А – интеллектуальное управление «в большом»; В – интеллектуальное управление «в малом»; С – управление на исполнительном уровне; (б) Функциональная анатомия мозга, связанная с обновлением убеждений при активном выводе: цикл "Действие-восприятие" (большая стрелка за пределами мозга) и передача биологически правдоподобных сообщений (стрелки внутри мозга) [4]; (в) Аппаратная и программная основы Neural Brain для воплощенных гуманоидных агентов [5].

На рис. 3 (б) представлена структура активного логического вывода с помощью функциональной анатомии мозга, подразумеваемой при обновлении убеждений и выделяющий цикл «действие-восприятие» (большая стрелка за пределами мозга, показывая, что результаты зависят от действий) и описана передача биологически правдоподобных (т.е. нейробиологически измеримых) сообщений между различными функциональными областями мозга. Как показано на рис. 3 (б), вся тяжелая работа при активном выводе выполняется путем минимизации свободной энергии, которая бывает двух видов: вариационная свободная энергия F и ожидаемая свободная энергия G .

На рис. 3 (в) приведена аппаратная система, которая состоит из трех ключевых компонентов: нейроморфных чипов, мемристоров и новых физических архитектур. Программная основа включает в себя платформы глубокого обучения, нейроморфные библиотеки и передовые вычисления. Для реализации энергоэффективного обучения на передовых платформах нейронная сеть дополнительно оптимизируется с помощью разреженных вычислений, квантования и сжатия, а также совместной разработки аппаратного и программного обеспечения. Аппаратная система состоит из трех ключевых компонентов: нейроморфных чипов, мемристоров и новых физических архитектур. Программная основа включает в себя платформы глубокого обучения, нейроморфные библиотеки и передовые вычисления. Для реализации энергоэффективного обучения на передовых платформах нейронная сеть дополнительно оптимизируется с помощью разреженных вычислений, квантования и сжатия, а также совместной разработки аппаратного и программного обеспечения.

Чтобы поддерживать устойчивое и адаптивное поведение в реальном мире, воплощенным агентам требуется тесная интеграция аппаратных возможностей и программного интеллекта. Вдохновленный совместной эволюцией нейронной динамики и биологической структуры мозга, осуществляется разработка аппаратно-программных систем для нейронных структур мозга. Общий обзор организации разработки представлен на рис. 3 (в).

Примечание. Все большее число исследований в области искусственного интеллекта (ИИ) приходят к выводу, что познание, мотивация и эмоции являются тремя фундаментальными компонентами обучения. В рамках образовательной технологии, Б. Блумом в 1956 г. была создана первая таксономия педагогических целей, в которой цели образования были разделены на три области: когнитивную (требования к освоению содержания предмета), психомоторную (развитие двигательной, нервно-мышечной деятельности) и аффективную (эмоционально-ценностная область, отношение к изучаемому) [6]. Связь между эмоциями, мотивацией и обучением довольно сложна. Некоторые исследователи считают эмоции источником мотивационной энергии, а другие утверждают, что эмоция является сложным независимым фактором, который заслуживает прямого исследования в отношении обучения и мотивации. Помимо области ИИ, образование, психология и компьютерная лингвистика являются другими областями исследований, в которых уделяется все больше внимания изучению связи

между эмоциями и обучением. Методы когнитивного объяснительного ИИ привлекаются в данной работе для рационального разделения исполнительных функций между роботом сервисного обслуживания и человеком – оператором при реализации заданной технологической операции.

2. Когнитивное управление в интеллектуальной робототехнике на основе технологии мягких вычислений

Измерение электрической активности мозга во время обучения играет важную роль в оказании помощи в достижении наилучших условий для обучения; на самом деле, многие исследовательские работы предполагают, что обучение сознательному контролю состояний мозговых волн может помочь повысить способность концентрироваться и снизить уровень стресса [6]. Процесс принятия решений зависит не только от решения логических задач и вычислений, которые происходят в префронтальной коре головного мозга, но и от ощущений, источником которых являются мозжечок и средний мозг. Мозг, как правило, одновременно выполняет несколько действий, и, кроме того, он постоянно обрабатывает и отслеживает мысли, эмоции и образы. Мозг – это физиолого-нервная система, которая взаимодействует и обменивается информацией с окружающей средой. Человек не контролирует некоторые действия мозга, например, контроль дыхания и некоторые другие жизненно необходимые действия. Поскольку мозг выполняет множество функций, процесс обучения может быть сложным и разнообразным.

За реакцию на стимул отвечает, как правило, лимбическая система. Но не все возбуждения связаны только с лимбической системой. В [6, Главе 2] была показана попытка представить алгоритм эмоционального обучения мозга, которая показывает лучшие результаты в предсказании хаотических временных рядов по сравнению с исходной версией алгоритма эмоционального обучения мозга.

Основные преимущества использования мозговых волн для выявления эмоциональных признаков заключаются в его эффективности при использовании в случае учащихся с ограниченными возможностями, непроходимых или молчаливых учеников. Если гипотеза основополагающего критерия сохранится в будущем тиражировании, то это даст указания о том, как помочь этим ученикам контролировать свои эмоции во время обучения только с помощью ЭЭГ.

Что такое *эмоция*? Этот вопрос является центральным для психологии и широко используется в научных моделях психики и поведения. Эмоции рассматриваются как причины, посредники или следствия других психологических процессов, таких как внимание, память и восприятие. Даже если существуют нерешенные разногласия по фундаментальному вопросу о том, как следует определять эмоцию, существует общий консенсус в отношении определения эмоции в терминах реакции на события, важные для человека: другими словами, они основаны на субъективном опыте, например при ощущении удовольствия или боли.

До 60-х годов научные подходы к эмоциям были сосредоточены на взаимодействии между физиологическими реакциями организма и эмоциями, переходя от причинной связи (теория Джеймса-Ланге в конце 19-го века) к существенной независимости (Теория Кэннона-Барда), вплоть до двухфакторной теории Шехтера и Зингера. В 1960-х годах Арнольд разработал новый когнитивный подход, в котором первым шагом к эмоциям является оценка ситуации (когнитивные процессы, предшествующие возникновению эмоции). Согласно Арнольду, первоначальная оценка запускает эмоциональную последовательность и вызывает как соответствующие действия, так и само эмоциональное переживание. Таким образом, физиологические изменения, признанные важными, сопровождают, но не инициируют действия и переживания. Лазарус последовал подходу Арнольда, разработав более четко сформулированную теорию оценки, в которой оценка является посредником между стимулом и эмоциональной реакцией, и она является немедленной и часто бессознательной. В отличие от теории эмоций Шехтера-Зингера, которая рассматривает эмоции как результат взаимодействия между физиологическим возбуждением и познанием, Лазарус утверждал, что оценка предшествует когнитивной маркировке, одновременно стимулируя как физиологическое возбуждение, так и само эмоциональное переживание.

Несколько влиятельных современных моделей (например, [6]) сохранили первоначальное дарвиновское предположение о том, что существуют разные виды эмоций, каждая из которых вызывает определенный паттерн физиологической и поведенческой реакции. В наиболее яркой форме

таких моделей каждый вид эмоции является биологически базовым, отдельным, унаследованным, сложным рефлексом, заложенным при рождении.

Психологические теории построения предполагают, что эмоции возникают как интерпретация аффективных изменений. Они объединяют пространственные и категориальные перспективы следующим образом: предполагается, что все эмоциональные события, по своей сути, могут быть описаны как имеющие психологически примитивные аффективные свойства, которые формируют размерный аспект теорий. Однако теории психологического конструирования также предполагают, что люди автоматически и без усилий используют какой-то механизм для этих аффективных изменений, значимых по отношению к объектам и событиям в мире; это категоричный аспект теорий.

Согласно такой точке зрения, ученые могут оценивать аффективное состояние человека (т.е. удовольствие и неудовольствие) с помощью более косвенных или объективных средств, но эти измерения не могут использоваться для оценки чувств гнева, печали, страха как таковых. Экспериментальные измерения координируются вокруг положительного и отрицательного аффекта [6] или интенсивности аффекта, а не отдельных категорий эмоций. Это поддерживает возникающее представление о том, что эмоции состоят из аффективных, валентных (т. е. положительных и / или отрицательных) реакций на значимые стимулы, как это объясняется в теории сконструированных эмоций.

Таким образом, мы можем переместить наше внимание со списка эмоций на более примитивную концепцию основного аффекта. Согласно Расселу, основной аффект – это нейрофизиологическое состояние, сознательно доступное как простейшие грубые (нерефлективные) чувства, проявляющиеся в настроениях и эмоциях. Основной аффект примитивен, универсален и прост (несводим на ментальном плане). Он может существовать без обозначения, интерпретации или приписывания какой-либо причине. В качестве аналогии можем рассмотреть ощущаемую температуру тела: как и в случае основного аффекта, вы можете отмечать ее, когда захотите. Ощущаемая температура существует до понятия температуры, как в обычной жизни, так и в научной теории, и до любых объяснений того, что вам жарко или холодно.

Другими словами, эмоции нельзя изучать и понимать без использования таких инструментов, как мягкие вычисления (генетические алгоритмы, нечеткая логика и нечеткие нейронные сети) и технология интеллектуальных и квантовых вычислений в виде интеллектуального инструментария [5,6]. Более того, этот подход показывает, как тесно взаимосвязаны эмоции и когнитивные задачи, такие как память и суждения.

3. Применение технологии Kansei-инженерии в процессах проектирования интеллектуальной робототехники и интеллектуальной мехатроники

Основная цель ИМК – распознавать намерения человека на основе анализа активности работы различных областей его мозга, которые преобразуются в информационный ресурс и передаются как команды, с помощью которых выполняются замысел (желание) человека. Для корректной работы ИМК необходимо быстро и точно снимать сигналы, которые могут быть использованы для мониторинга активности мозга, имеющие электрофизиологическую, магнитную и метаболическую природу. Виды сигналов были рассмотрены ранее в [6, Глава 1], а метод снятия ЭЭГ делает возможным включение человека в контур управления.

Когнитивные процессы невербального общения в человеческом мозге (см. рис. 4) моделируется на таком уровне, что они объясняют корреляцию между тем, что человек понимает из общения с врачом и тем, что человек сообщает в ответ. Исходное состояние наблюдаемого человека может быть выведено из регистрируемого взаимодействия с врачом.

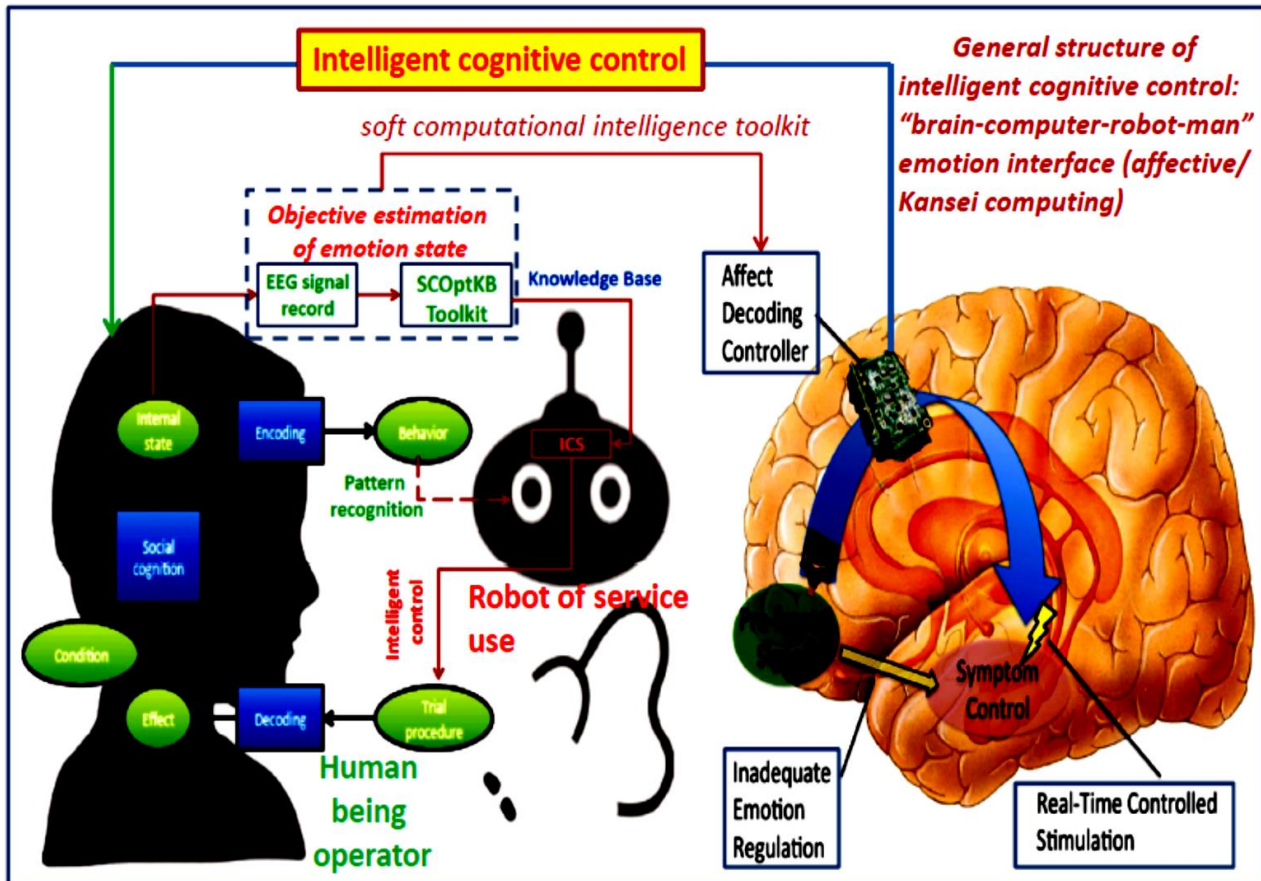


Рис. 4. Структура когнитивного интеллектуального роботизированного управления с нейроинтерфейсом «мозг-компьютер-робот-устройство»

Рисунок 4 показывает структуру когнитивного интеллектуального роботизированного управления с нейроинтерфейсом «мозг-компьютер-робот-устройство» и регулятором декодирования влияния на основе *Kansei / Affective Engineering* и его технологии когнитивных вычислений, включающие в себя качественное описание эмоций, инстинктов и интуиции человека.

Согласно общему определению, Кансей-инженерия (яп. 感性工学 *kansei kougaku*, англ. *Kansei Engineering*) – это направление промышленного дизайна, основывающееся на субъективных ощущениях целевого пользователя. В качестве синонимов термина также используются «эмоциональный инжиниринг», «аффективный инжиниринг». В переводе с японского термин буквально означает «психологический образ продукта». Как следствие, продукты можно проектировать, подчеркивая нужное чувство. Основная часть мозга млекопитающих отвечает за эмоциональные процессы и называется лимбической системой. Вычислительные модели миндалины и орбитофронтальной коры являются основными частями лимбической системы, представленная недавно. Таким образом, результатом Кансей инженерии является синтез когнитивных качеств чувствительности мозга. Например, она утверждает, что эмоции, боль и когнитивный контроль функционально разделены в отдельных подразделах поясной извилины коры головного мозга.

Эти технологии эффективно используются в процессах проектирования интеллектуальной робототехники и интеллектуальной мехатроники. В качестве примера можно привести робота для сервисного использования и роботизированный одноколесный велосипед. Роботы для служебного пользования [27] могут быть внедрены в современные образовательные и терапевтические системы для детей с расстройствами аутистического спектра (далее – РАС).

Примечание. В отличие от дискуссионного описания различий между человеком и андроидным роботом [9] в данной работе рассматривается подход на основе описания «искусственной жизни» интеллектуального когнитивного робота [10,11], в котором среда функционирования и взаимодействия описывается на программно-алгоритмическом уровне с применением пространственно-временной нечеткой (квантовой/ релятивистской) логики [12,13]. Примеры такого подхода приведены в [6].

Спроектированная система интеллектуального управления поведением МРСО базируется на новом подходе к проектированию таких систем, включающим прямое взаимодействие с роботом на *Естественном Языке* (ЕЯ, *NL – Natural Language*), а также систему имитационного моделирования поведения робота. Основными блоками МРСО являются подсистема автономной навигации робота, операционная подсистема манипулятора для выполнения грузоподъемных работ, подсистема обработки изображений, подсистема прямой коммуникации робота с человеком на естественном языке и имитационная подсистема виртуальной и дополненной реальности для построения моделей поведения робота в пространственной среде (см., Рис. 3, Блок «Внешняя среда»). Отметим, что концепция структуры ИСУ возникла из потребности в согласованном (координационном) управлении всеми подсистемами, включая моделирование построения маршрута движения, навигацию, манипулирование с объектами и грузоподъемностью, а также взаимодействием с человеком-оператором или другими роботами.

Управляющая система координационного типа должна обладать определенными способностями:

- 1) понимать ментальные команды оператора (в том числе и на ЕЯ), а также данные и процедуры своих подсистем;
- 2) управлять подсистемами в соответствии с заданной командой;
- 3) управлять одной подсистемой в соответствии с ограничениями другой подсистемы;
- 4) объявлять свои намерения оператору или другим роботам.

Способности 3) и 4) реализуют функцию автономного контроля за подсистемами, а все четыре способности конструируются как фундаментальная управляющая система МРСО (аналог мозга робота на Рис. 3). Данная функция контролирует и кооперирует все подсистемы МРСО.

МРСО работает в зданиях с разными планировками этажей и помещений, перемещаясь в неструктурированной среде с присутствием людей, а также, неожиданных препятствий. Для моделирования поведения МРСО в рабочей области разработана имитационная система на основе когнитивной графики. Эта система используется для моделирования возможностей реального мира в виртуальном пространстве «искусственной жизни» робота, что позволяет правильно оценить алгоритмы управления поведением робота в реальном времени и уменьшить возможность возникновения ситуаций, связанных с возможностью столкновения робота с препятствиями и повреждение оборудования, маневрирования и т.д. Математической основой моделирования поведения робота является инженерия знаний, основанная на пространственно-временной логике, рассуждениях при неявной информации, логике действий, когнитивной графики и мягких вычислениях.

4. Особенности имитационной системы моделирования поведения МРСО

Структура имитационной системы моделирования поведения робота представлена на Рис. 5.



Рис. 5. Структура имитационной системы моделирования поведения и состояния «искусственной жизни» робота

Система состоит из следующих модулей:

- 1) меню-интерфейс с модулем лингвистической обработки и понимания ЕЯ (лингвистический процессор);
- 2) модуль планирования поведения робота в сценах окружающей рабочей среды с 4-мя подблоками:
 - Блок 1: планирование действий робота;
 - Блок 2: анализ действий робота с точки зрения качественной физики, пространственно-временной логики и логики действий;
 - Блок 3: построение набора сцен отображения изменений рабочей среды, связанных с предпринимаемыми действиями;
 - Блок 4: отображения описаний сцен на внутреннем языке в их графическом представлении;
- 3) инструменты отображения и изменения сцен имитационной среды, в том числе: графический редактор и визуализатор;
- 4) базы знаний графических объектов моделируемого рабочего пространства.

Меню интерфейса структуры задает пути доступа к основным модулям системы: «Ввод ЕЯ-текста», «инструменты для отображения и изменения сцен», «вызова графического редактора», «визуализация сцен и сценариев».

Для прямого взаимодействия системы человек-робот МРСО используется ЕЯ. Текст на естественном языке (русском) описывает ситуации рабочей среды в пространстве и команды, которые необходимо выполнить МРСО.

В соответствии со Структурой Искусственной Интеллектуальной системы управления, показанной на Рис. 3, канал прямой коммуникации человека и робота на основе ЕЯ позволяет описать различные «условия жизни и поведения (функционирования)» для МРСО.

Человек-оператор представляет ЕЯ-описание определяя конкретные «условий жизни и поведения (функционирования)» для МРСО. Такое описание состояния и поведения включает в себя:

- 1) сцены окружающей среды, например, комнаты в здании, объекты в комнате, нечеткие пространственные отношения между ними и т. д.;
- 2) сценарии искусственной жизни и поведения робота, например, такие действия, как «иди в комнату», «опиши комнату», «покажите вид комнаты», «открой дверь», «возьми книгу на столе» и т. д.).

ЕЯ -текст вводится в лингвистический процессор, который преобразует ее во Внутреннее Описание (ВО, *IR-Internal Representation*) имитационной системы в формате языка виртуальной реальности (ЯВР, *VRL-Virtual Reality Language*).

ЕЯ ввод описывает 3D рабочие сцены-пространства (например – комнаты) с объектами и пространственными отношениями между ними, а также, содержит инструкции для робота о том, что нужно сделать в этих сценах.

ВО описывает рабочие 3D сцены-пространства (например, комнаты) с объектами и пространственными отношениями между ними, а также, содержит инструкции для робота о том, что нужно сделать в этих сценах. Внутреннее описание представляет собой список экземпляров фреймов, (таких как объекты, пространственные отношения, действия, сцены и сценарии) представляющих смысловое содержание входного текста. Робот может действовать и изменять рабочие пространственные сцены.

Введем понятия статической и динамической пространственных рабочих сцен. Описание статической пространственной сцены представляет собой множество (набор) объектов в рабочей сцене, связанных друг с другом лингвистическими определениями пространственных отношений. Динамическое описание пространственных сцен состоит из начального пространственного описания сцены и описания действия.

БЗ (КВ) состоит из нескольких классов, отражающих синтаксические, семантические и прагматические знания об объектах, пространственных отношениях, действиях, сценариях и др. Априорные знания приобретаются в процессе решения задач и все они делятся на три класса:

- класс *A* содержит синтаксические знания об объектах, действиях и отношений;
- класс *B* содержит знания о псевдо-физической пространственной логике и логике действий, одна логически дедуктивная система для геометрических и физических описаний пространства и действия. Эта логика используется для моделирования пространственных сцен и динамических ситуаций;
- класс *C* включает знания о семантических и прагматических свойствах объектов и пространственных отношениях между ними.
- класс *D* содержит знания, полученные в процессе решения задач.

Для представления этих знаний используются смешанный фреймовый и продукционные подходы. Фреймовая (основная) часть БЗ (КВ) описывает объекты и их свойства, отношения и действия. Продукционная часть БЗ (КВ) описывает аксиомы пространственно-временных логик и логики действий в виде продукционных правил «Если – То».

Блоки 1 и 2 на Рис. 5 используются для реализации следующих функций:

- проверка возможности реализации действия с точки зрения качественной физики;
- построение плана реализации действия на основе *script*-сценария;
- исход случайного действия или события;
- построение траектории, связанной с принятым действием;
- анализ корректности принятого сценария с точки зрения пространственной логики.
- Блоки 3 и 4 используются для:
- планирования местоположения объекта в текущей пространственной сцене;
- построение внутреннего графического представления описания сцены.

На выходе из блока 4 имеем набор координат объекта $\langle XYZ \rangle$ в системе пространственных координат сцены. Процессор визуализации (визуализатор) преобразует эти координаты в абсолютную координату для воспроизведения.

При визуализации сцен используется основной принцип когнитивной графики для графического представления среды и объектов моделирования: вместо усложненных математических моделей графического представления объектов рабочей среды используются простые образы как результат отображения на основе знаний. Для решения поставленной задачи – изучения алгоритмов рационального поведения МРСО в трехмерных пространственных сценах и построения алгоритмов интеллектуального управления - важным является не столько наиболее реалистичное изображение объектов, сколько адекватное отображение пространственных отношений, движений и действий по выполнению технологических операций МРСО.

Итак, основываясь на ВО и знаниях о пространственно-временных отношениях и действиях, система генерирует и визуализирует 3D графические изображения, соответствующих ЕЯ - входу. При этом создается карта пространственных сцен для перемещений робота для последовательности необходимых действий, которая затем используется в Системе интеллектуальной автономной навигации робота (см., ниже Рис. 6).

5. Формальный язык для моделирования поведения робота в 3D пространственных сценах

Для имитационного моделирования комплексной рабочей обстановки с описанием окружающих сцен и их изменений в соответствии с действиями робота, разработан формальный язык – язык виртуальной реальности (ЯВР). В таблицах 1 и 2 представлены примеры основных понятий, синтаксиса и семантики ЯВР, выраженного на английском языке, как основном языке программирования

Табл. 1. Основные временные пространственные отношения и действия в имитационной среде МРСО

Alphabet	Syntax	Semantics	TEMPORAL LOGIC RELATIONS	SPATIAL LOGIC RELATIONS	ACTION LOGIC ACTIONS
Alphabet consists of the following sets: Basic notions - set Q including following sets: {O _k } - objects; {A _k } - actors (robots); {T _k } - times; {P _k } - 3D points; {L _k } - spatial localizations; {S _k } - scripts; {S _k } - 3D scenes; {EE _k } - external influences and events; The set RR of relations including the following sets: {SR _k } - spatial relations; {CR _k } - causal relations; {TR _k } - temporal relations; {ACT _k } - actions; {ACTR _k } - relations for action descriptions; R _{near} - special relation describing the noncorrectness of the scene from the point of given logics model view.	Following rules for well formed formulas (WFF) : 1) If $x \in Q, y \in Q, R \in \{RR\}$, then (xRy) is WFF. 2) If $F - WFF$, then $\forall t F, \forall s F, \exists t F, \exists s F - WFF$; 3) If $F - WFF$, then $\exists(t_1, \dots, t_n) F, \exists(s_1, \dots, s_n) F, \forall(t_1, \dots, t_n) F, \forall(s_1, \dots, s_n) F - WFF$; 4) $\langle s, t \rangle - WFF, \langle s, t \rangle \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle - WFF, \langle s, t \rangle \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle \Rightarrow \dots \Rightarrow \langle s_n, t_n \rangle - WFF$, where "⇒" is the operator of scene change; 5) If $F - WFF$, then $\langle s, t \rangle F - WFF$; 6) If $F_1, F_2 - WFF$, then $F_1 \& F_2 - WFF$; 7) There is no other rules.	The following axioms (examples): 1) $\langle s, t \rangle > d \rightarrow \exists(t_1, \dots, t_n) \& \exists(s_1, \dots, s_n) \langle s, t \rangle \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle \Rightarrow \dots \Rightarrow \langle s_n, t_n \rangle$; 2) $\langle s, t \rangle > (d, R, d_1) \rightarrow \exists s_1, \exists t_1, \langle s, t \rangle > d_1 \& \langle s_1, t_1 \rangle > d_1$, where R - "to be later", $d_1, d_1 \in \{ACT_k\}$; 3) $(O, RO_1) \rightarrow (O, R_1, O_1)$, where $O_1, O_2, O_3 \in \{O_k\}$, R - "to be on", R ₁ - "to be the point of support"; 4) $\langle s, t \rangle (O, R_1, O_1) \& (O, R, L) \& (O, R, S) \rightarrow (s, R_{near}, F)$, where R ₁ - "to be in", R - "to have size", L, S - the linguistic value of size (L - "large", S - "small"); 5) $(d, R_1, a_1) \& (d, R_2, O_1) \rightarrow \exists t, \exists s (s_1, R_{near}, O_1)$, where $R_1, R_2 \in \{ACTR_k\}$ and R ₁ - to be the actor of action, R ₂ - to be the object of action; R _{near} - "to be near to the object".	1) For temporal points and instant events Nonmetric order relations : - to be earlier ; - to be later ; - to be simultaneously ; Metric relations : - to be earlier on N unit on the time scale L ; - to be later on N unit on the time scale L ; Fuzzy relations : - to be approximately simultaneously ; - to be substantially earlier ; - to be substantially later ; - to be not so substantially earlier ; - to be not so substantially later ; 2) For temporal interval and events : All mentioned above relations plus 7 different types of interval intersection ; 3) For actions : - at time t (or approximately) begin action d ; - at time t (or approximately) finish action d ; - after action d1 (or interval T1) begin action d2 ; - before action d1 (or interval T1) begin d2 ; - immediately after action d1 (or interval T1) begin action d2 ; - begin action d1 simultaneously with action d2 ; - while action (or event) d1 make action d2 ; - after each N unit on scale L during T interval make action d.	1) Relative position relations Nonmetric : - to be inside ; - to be outside ; - to be on ; - to be under, over ; - to be left, right ; - to be in front, behind ; - to be between ; - to be left (right) and behind (in front) ; Metric : - to be by the angle A ; 2) Spatial proximity relations Nonmetric fuzzy relations : - to contact ; - to be closely ; - to be very closely ; - to be near ; - to be far ; - to be very far ; - to be not far and not closely ; Metric and fuzzy relations : - to be in the distance of N unit on scale A from (to) ; - to be in the distance of approximately N unit on scale A from (to) ; 3) Fuzzy location relations : - to be in the center of ; - to be in the left (right) back (front) angle of ; - to be in the top (bottom) of ; 4) Others relations : - to have size (small, middle, big, not small, not big and so on) ; - to have the point of support.	1) Types of moving : - to move itself with different types of velocity (quickly, slowly) ; - to move itself into localization ; - to go from point A to point B ; - to go nearly to an object ; - to go to the left, right, forward, back (according with the current direction of moving) on some (fuzzy) distance ; - to change velocity of moving (including stop) ; - to move itself by the elevator ; 2) Actions with objects : - to grasp an object (with different types of grasping) ; - to hold an object ; - to put an object at point P ; - to put one object on (into, under, from left, from right and so on) another object ; - to bring the object ; 3) Force actions : - to exert force to an object ; - to push on the object ; - to throw an object ; - to turn an object ; 4) Others actions : - to open a door ; - to close a door ; - wait (event) .

Таблица 2. ЯВР в задаче имитационного моделирования МРСО

Alphabet	Syntax	Semantica
Alphabet consists of the following sets: $\{O_k\}$ – objects; $\{A_k\}$ – actors (robots); $\{T_k\}$ – times; $\{L_k\}$ – 3D-points; $\{S_k\}$ – spatial localizations; $\{SC_k\}$ – scripts; $\{S_k\}$ – 3D-scenes; $\{EE_k\}$ – external influences and events. The set RR of relations including the following sets: $\{SR_k\}$ – spatial relations; $\{CR_k\}$ – causal relations; $\{TR_k\}$ – temporal relations; $\{ACT_k\}$ – actions; $\{ACTR_k\}$ – relations for action descriptions; R_{value} – special relation describing the noncorrectness of the scene from the point of given logics model view	Following rules for well formed formulas (WFF): 1) If $x \in Q, y \in Q, R \in \{RR\}$, then (xRy) is WFF; 2) If F – WFF, then $\forall tF, \forall sF, \exists tF, \exists sF$ – WFF; 3) If F – WFF, then $\exists(t_1...t_k)F, \exists(s_1...s_k)F, \forall(t_1...t_n)F, \forall(s_1...s_n)F$ – WFF; 4) $\langle s, t \rangle$ – WFF, $\langle s, t \rangle \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle$ – WFF, $\langle s, t \rangle \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle \dots \langle s_n, t_n \rangle$ – WFF, where « \Rightarrow » is the operator of scene changes; 5) If F – WFF, then $\langle s, t \rangle F$ – WFF; 6) If F_1, F_2 – WFF, then $F_1 \& F_2$ – WFF; 7) There is no other rules	The following axioms (example): 1) $\langle s, t \rangle d \rightarrow (t_1, \dots, t_k) \& \exists(s_1, \dots, s_k) \langle s, t \rangle \Rightarrow \Rightarrow \langle s_1, t_1 \rangle \Rightarrow \dots \Rightarrow \langle s_k, t_k \rangle$; 2) $\langle s, t \rangle (d_1 R d_2) \rightarrow \exists s_k \exists t_k \langle s, t \rangle d_1 \& \langle s_k, t_k \rangle d_2$, where R – «to be later», $d_1, d_2 \in \{ACT_k\}$; 3) $(O_1 R O_2) \rightarrow (O_2 R_1 O_3)$, where $O_1, O_2, O_3 \in \{O_k\}$, R – «to be on», R_1 – «to be the point of support»; 4) $\langle s, t \rangle (O_1 R_1 O_2) \& (O_1 R L) \& (O_2 R S) \rightarrow (s R_{value} F)$, where R_1 – «to be in», R – «to have size», L, S – the linguistic value of size (L – «large», S – «small»); 5) $(d_1 R_1 a_1) \& (d_1 R_2 O_1) \rightarrow \rightarrow \exists t, \exists s(a_1 R_{near} O_1)$, where $R_1, R_2 \in \{ACTR_k\}$ and R_1 – to be the actor of action, R_2 – to be the object of action; R_{near} – «to be near to the object»

Принимая во внимание, что данный подход был разработан в 90х годах прошлого столетия, а позднее были разработаны лингвистические системы распознавания речи, системы звукового управления подачи команд и т.д., то сама концепция данного вида управления намного опередила свое время.

6. Проблемы разработки псевдо-физической пространственно-временной логики и логики действия для интеллектуальных систем принятия решений и приближенных суждений в МРСО

Моделирование суждений о времени, пространстве и физических действиях являются важным аспектом рационального поведения любой интеллектуальной системы. Этой проблеме посвящено множество разработок [10,11,13]. Однако сосредоточим свое внимание на системе правдоподобных рассуждений, основанных на так называемых псевдо-физических логиках пространственно-временных отношений и физических действий [10,11].

Название "Псевдо - Физическая Логика"(ПФЛ, *PPL-Pseudo - physical Logic*) объясняется тем фактом, что не только реальные физические и метрические свойства времени, пространства и действий описываются в аксиомах и правилах вывода, но и субъективные свойства их восприятия человеком. Наиболее важными аспектами этой модели логик являются:

- 1) некоторая часть рассуждений связана с временной шкалой масштабирования;
- 2) существует несколько компонент логик, связанных между собой;
- 3) компоненты являются логиками отношений;
- 4) некоторые компоненты логики, связанные с динамическими ситуациями, являются немонотонными логическими системами.

Для моделирования поведения МРСО использовалась модификация ПФЛ, разработанная в [10]. Эксперименты показали эффективность и адекватность предложенных логик для задачи моделирования рационального поведения МРСО в трехмерных сценах. Примеры аксиом ПФЛ приведены в табл. 2.

7. Пример моделирования поведения МРСО

Рассмотрим следующую задачу. Робот МРСО получает следующую входную информацию на естественном языке: «Комната №217 расположена на втором этаже. В центре этой комнаты находится стол, на котором стоит лампа. Кресло стоит справа и недалеко от стола. За креслом стоит шкаф. Пойди в комнату № 217, возьми лампу и поставь ее на шкаф».

ЕЯ-входной сигнал преобразуется лингвистическим процессором в ВО на ЯВР. Далее запускаются два процесса: (1) анализ и построение множества VR-сцен (этап планирования действий робота в сцене), соответствующих входу; (2) графическое отображение VR-сцен.

Когнитивный графический редактор позволяет создать графическое представление описываемой сцены (глобальной карты сцены), построить последовательность сцен, отражающих действия робота, адекватно полученной входной информации (см., Рис. 6).

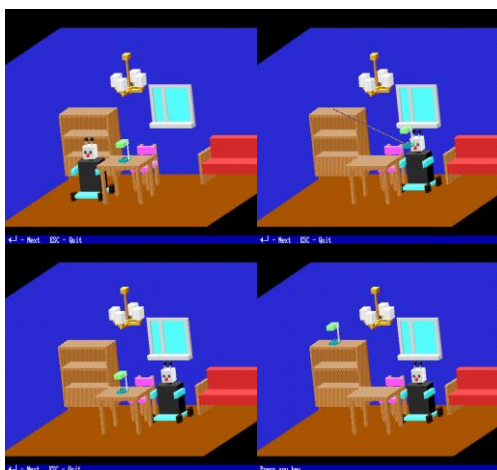


Рис. 6. Пример графической 3D визуализации рабочей динамической сцены

Например, для действия «Взять объект (лампу)» визуализируется следующий набор сцен: начальная сцена; навигация робота в данной сцене, необходимая для данного действия; сцена, в которой робот находится рядом с объектом; сцена, в которой робот держит заданный объект в руке-манипуляторе, и наконец, финальная сцена, в которой лампа находится на шкафу. Результаты компьютерного моделирования пространственных сцен и действий робота в комнате представлены на Рис. 6.

Таким образом, система моделирования позволяет изучать и корректировать различные алгоритмы поведения МРСО на уровне действий и навигации в среде при наличии препятствий. Если разработанные алгоритмы адекватны поставленным задачам и целям, то модули планирования, навигации, человеко-машинного взаимодействия могут быть перенесены в систему управления робота МРСО, функционирующего в реальной среде. Такая имитационная система позволяет исследовать и корректировать различные алгоритмы планирования уровня задач и навигации МРСО.

Выходная информация имитационной системы является входной для управления системы передвижения второго уровня (Рис. 3). Структура, показанная на Рис. 7 представляет основные модули автономной системы навигации МРСО.

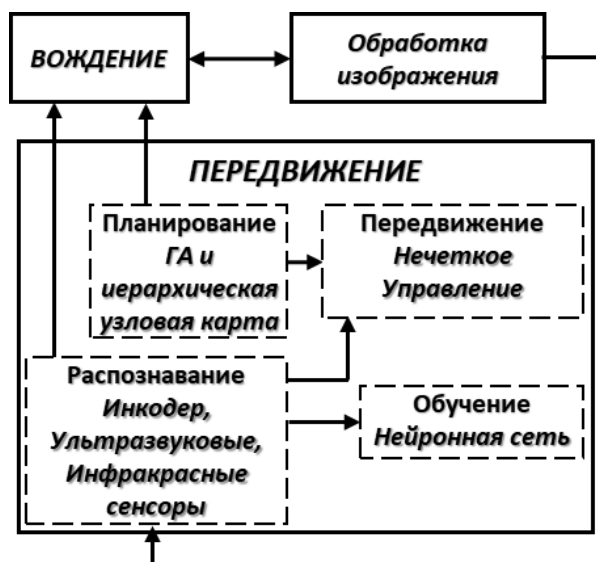


Рис. 7. Система автономной навигации робота

Система автономной навигации реализует четыре функции: управление движением на основе нечеткой логики, планирование пути с использованием мягких вычислений, распознавание объектов и обучение.

8. Планирование перемещения MPCO в имитационном пространстве

Функция планирования предназначена для моделирования эффективного и корректного пути в рабочем пространстве офисного здания. Этого используется так называемый *Распределенный Генетический Алгоритм* (РГА, *DGA—Distributed Genetic Algorithm*) и *Иерархическая Узловая Карта* (ИУК, *HNM—Hierarchical Node Map*) [14]. В системе контроля автономной навигации используется полученный маршрут и ИУК, построенная для рабочей среды перемещения (в нашем случае — это двухмерный план этажа здания с комнатами и коридорами, изображенный на Рис. 8).

В задаче перемещения робота есть некоторая целевая точка и некоторое действие в каждой области. Например, в случае перемещения из комнаты в коридор робот должен подойти к двери и затем открыть ее, а для перехода на другой этаж он должен подойти к дверям лифта и нажать кнопку, а затем войти в него.

ИУК имеет иерархию тех узлов, где должны быть исполнены соответствующие операции — захвата манипулятором или обработка изображений. Использование ИУК в системе управления определяет цели, задачи и работы при нахождении на каждой запланированной площади.

В задаче перемещения робота есть некоторая целевая точка и некоторое действие в каждой области. Например, в случае перемещения из комнаты в коридор робот должен подойти к двери и затем открыть ее, а для перехода на другой этаж он должен подойти к дверям лифта и нажать кнопку, а затем войти в него.

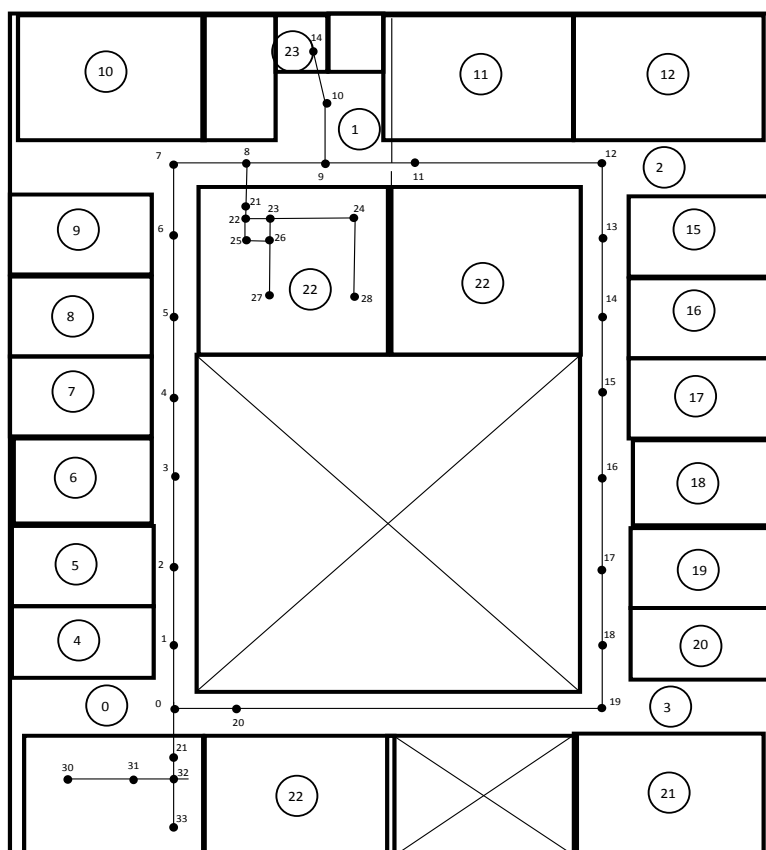


Рис. 8. Иерархическая узловая карта – HNM этажа здания

ИУК имеет иерархию тех узлов, где должны быть выполнены соответствующие операции – захвата манипулятором или обработка изображений. Использование ИУК в системе управления определяет цели, задачи и работы при нахождении на каждой запланированной площади.

9. Действия операций в рабочем файле (*Working File*)

Планируемые данные должны быть трансформированы в распознаваемый роботом формат планирования – *Рабочий Файл* (РФ, *WF*– *Working File*). Этот файл имеет вид:

MOVECOMMAND: WORKCOMMAND: AREA

- *MOVE COMMAND*: Команда на передвижение, с указанием стартового и финального узла;
- *WORK COMMAND*: Команда на совершение операций – манипуляция, распознавание и т.д.;
- *AREA*: Номер площади (помещения) на ИУК (*HNM*).

РФ (*WF*) состоит из команд перемещения и команд на исполнение, и имеет следующий вид:

- *MOVE COMMAND*

◆ *GOTO-P1-P2*: Двигайся из узла *P1* к узлу *P2* под управлением системы на основе нечеткой логики;

◆ *WAIT-P1-P2*: Стой в узле *P1*.

- *WORK COMMAND*

- ◆ *MOVE-TRGT*: Двигайся к целевому узлу;

◆ *PULL-DOOR*: Распознай ручку двери и открой дверь;

◆ *PUSH-DOOR*: Распознай ручку двери и закрой дверь;

♦ *GETON-ELV*: Распознай кнопку лифта, нажми на нее и войди в лифт;

♦ *OPERA-ELV*: Действия в лифте: включают распознавание кнопки нужного этажа, нажатие кнопки, распознавание условия прибытия на этаж. Выход из лифта.

Начальное и целевое положения MPCO фиксируются в некоторых узлах ИУК, т.е. в случае команды через интерфейс человек-робот – "*Go to node 34 (elevator area 23)*" имеем планирование перемещения по помещениям [13 - 1 - 23] и РФ записывается следующим образом:

♦ *GOTO-0026-0021: PULL-DOOR: AREA-0013*

♦ *GOTO-0008-0010: GETON-ELV: AREA-0001*

♦ *GOTO-0034-0034: MOVE-TRGT: AREA-0023*

Используя процедуру построения маршрута, создается рабочий план перемещения из точки 26 в точку 34 с учетом технологической операции открытия двери и выхода из комнаты. В процессе движения MPCO необходимо избегать препятствия, находящиеся на его пути. Таким образом, планируемый путь может быть записан в одномерных матрицах площадей для упрощения навигации в реальном времени (*real time control*).

10. Интеллектуальное управление для обхода препятствий и выполнения технологических операций для MPCO

При перемещении робота из точки 26 в точку 34 на Рис. 8, MPCO должен избегать препятствий в помещении 13 (путь из точки 26 в точку 21), а также достичь исходного положения (точка 21) для открытия двери а (как техническая операция из точки 21 в точку 8) и выйти из комнаты 13 к лифту 23 (точка 34) в присутствии помех в виде препятствий в коридоре.

10.1. Система позиционного управления перемещением и распознаванием препятствий

Определение абсолютного положения робота, связанного с глобальной системой координат, вычисляется по измеренному значению от двух инерциальных датчиков, установленных на двигателях, методом счисления пути. Абсолютное положение робота можно приблизительно вычислить с помощью следующих трех уравнений:

$$X_{i+1} = X_i + \frac{W(M_r + M_l)}{2(M_r - M_l)} (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta_i) \quad (1)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{W(M_r + M_l)}{2(M_r - M_l)} (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}) \quad (2)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{(M_r - M_l)}{W} \quad (3)$$

где X_i и Y_i – абсолютное положение робота на i шаге; θ_i – абсолютное направление робота на i шаге; M_l и M_r – угол поворота колеса, а также, W – расстояние между левым и правым колесами.

Распознавание препятствий – необходимая опция для уклонения от столкновения с людьми и предметами. Для обхода препятствий в здании необходимо постоянно определять расстояние между роботом и возможным препятствием. Для управления движением в режиме реального времени требуется обнаружение, распознавание и оценка информации, полученной от сенсоров. Для распознавания местоположения и препятствий MPCO использует 13 ультразвуковых (УЗ) и 9 инфракрасных сенсоров (ИК) (Рис. 2) что позволяет быстро определить наличие объектов спереди и сбоку движения MPCO.

Столкновения с людьми – наличие инфракрасных сенсоров (ИК) позволяет избегать таких столкновений более аккуратно, нежели с обычными предметами. Совместное использование 9-ти ИК и

УЗ датчиков во всех направлениях $FL1\sim SL0$, $FR1\sim SR0$, $FC0$ (Рис. 2) позволяет роботу обнаруживать человека или другое препятствие в зданиях, взаимодействуя по следующим уравнениям:

$$\text{ИК сенсор не срабатывает если: } US=US_0, \quad (4)$$

$$\text{ИК сенсор срабатывает если: } US=US_0-r_{robot}, \quad (5)$$

где US_0 – информация с УЗ сенсоров, r_{robot} – активный радиус робота, а US – это параметр управления перемещением.

10.2. Система нечеткого управление перемещением MPCO

Разработанное множество управляющих правил для принятия решений по управлению движением MPCO, где выходное управление вычисляется в процессе дефазификации управляющего сигнала, полученного в результате нечеткого вывода.

Это позволило достичь положительных результатов испытаний при достижении роботом цели с обходом препятствий в реальном окружении (при движении его по коридору здания), как показано на Рис. 9.

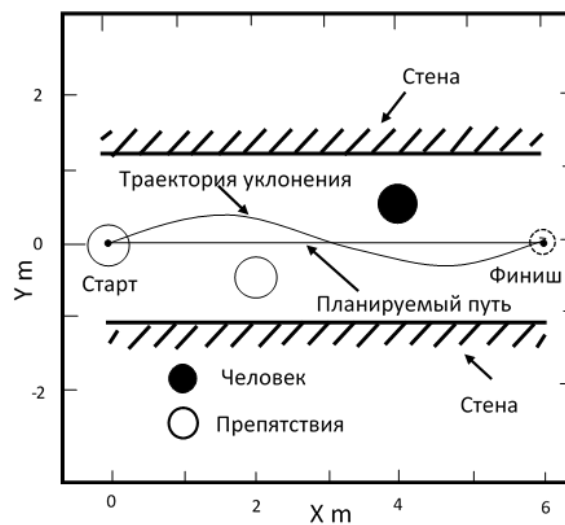


Рис. 9. Испытания MPCO.

Для управления процессом перемещения и обхода препятствий используются методы нечеткого управления, с разбивкой по слоям и со следующими входными параметрами: расстояние между спланированным маршрутом и роботом – D_p ; расстояние между целью и роботом – D_T ; угол между целью и роботом – A_T . В качестве выхода нечеткого вывода используются следующие параметры: угол руля – S_T ; скорость движения – V_T ; коэффициент управления решением – $Ratio = [0.0,0]$; степень безопасности движения, используется как входной и выходной сигнал между слоями – $Safety$.

Скорость изменения угла руля S_0 и V_0 скорость перемещения робота вычисляются по следующим уравнениям:

$$S_0 = k_{STR} \left((1.0 - Ratio) S_T + Ratio S_A \right), \quad (6)$$

$$S_0 = (1.0 - Ratio) V_T + Ratio V_A, \quad (7)$$

где k_{STR} – переводной коэффициент угловой скорости.

Когда степень безопасности ($Safety$) слишком мала, нечеткая система управления движением прекращает движение мгновенно и робот возвращается в фиксированной точке для подтверждения безопасности.

11. Мягкие вычисления и интеллектуальное управление открывания двери манипулятором

МРСО оборудован 3-х звенным манипулятором с 5-ю степенями свободы (5DOF) с исполнительным звеном – «трехпальным» захватом.

Для гибкости реализации постоянной операции «открывания и закрывания дверей» для системы сопряжения и взаимодействия манипулятора с подвижной частью МРСО были разработаны эффективные алгоритмы интеллектуального управления с учетом следующих требований:

- 1) Определение начального положения подвижной части МРСО перед дверной ручкой, по аналогии с парковкой автомобиля;
- 2) Планирование траектории движения манипулятора для открывания двери совместно с передвижением подвижной части МРСО (координационное управление).

Сложные процессы открытия дверей представляются механической аналогией эволюционных вычислений (*evolutional computing*) и требуют новой интеллектуальной стратегической операции для манипулятора МРСО. Успешное выполнение этой эволюционной операции зависит от выбора начального положения МРСО и планирования траектории движения манипулятора. Для осуществления перечисленных условий были предложены и разработаны следующие методы и алгоритмы.

11.1. Математическое эволюционное моделирование

Для условия (1) разработан алгоритм на базе Системы Нечеткого Классификатора (СНК, *FCS – Fuzzy Classifier System*) применяющей классификацию к нечетким правилам и имеющая вид *Генетического Алгоритма* (ГА, *GA – Genetic Algorithm*), в которых хромосома выражается в виде нечеткого правила. Операция позиционирования (определение начальной позиции робота перед дверью) может быть описана с использованием нечетких продукционных правил, и система управления МРСО может корректировать положение робота, используя ультразвуковые датчики или изображение. Однако число нечетких правил при большом числе входов становится также очень большим, в результате появляется сложность даже для эксперта-человека создания таблицы просмотра нечетких продукционных правил. Поэтому предложено использовать алгоритм мягких вычислений в виде СНК, применив систему классификатора к нечетким продукционным правилам. Алгоритм СНК на основе ГА показан на Рис. 10.

С помощью мягких вычислений на СНК (*FCS*) могут быть представлены гибкие процессы обучения без стереотипов - примеров [15,16].

Для условия (2), разработан метод определения траектории манипулятора МРСО для открывания двери с использованием Генетического Алгоритма в Непрерывном Пространстве (ГАНП, *GACS – Genetic Algorithm in Continuous Space* [16,17]).

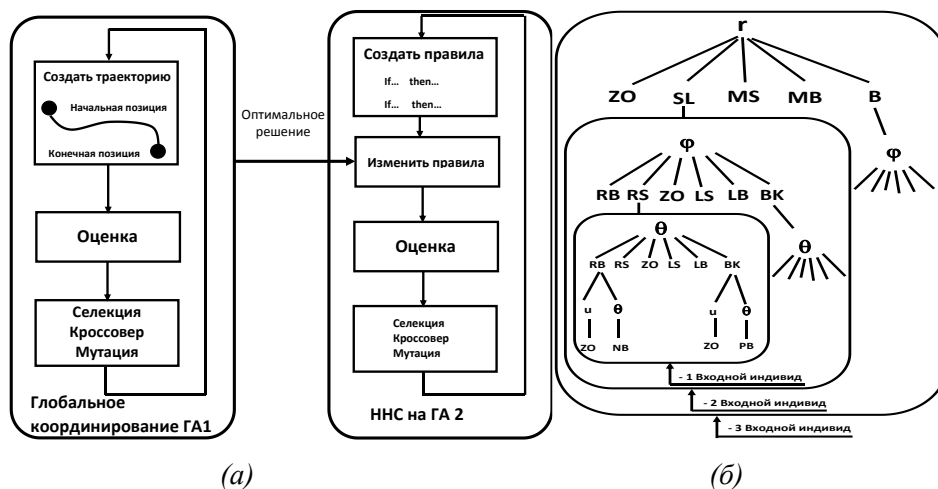


Рис. 10. (а) Алгоритм СНК; (б) Система нечеткого классификатора МРСО.

На Рис.11 показана геометрическая модель МРСО при открывании двери. В положении перед дверью шесть из семи степеней свободы фиксированы, но, с другой стороны, углы манипулятора и поворота колес остаются подвижными. Таким образом, с помощью ГА управляет одной степенью

свободы. На Рис. 11 видно, что углы θ_2 и θ_3 фиксируются по высоте дверной ручки и для упрощения вычислений предполагается, что рука MPCO имеет три звена.

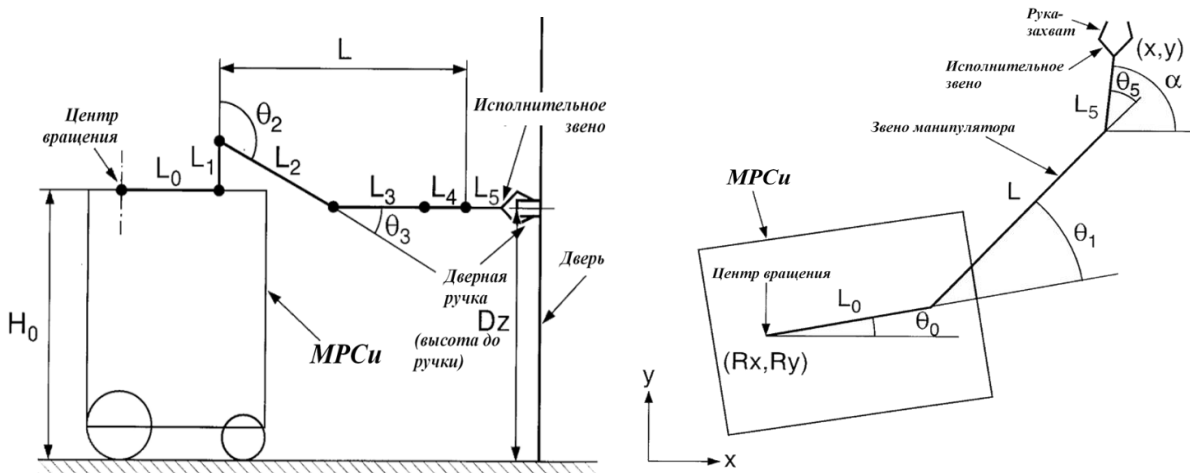


Рис. 11. Геометрическая модель MPCO при открывании двери.

До начала реализации действия (например, открывание двери) робот проводит позиционирование, выбирая положение подобно парковке автомобиля до тех пор, пока позиция не будет выбрана с заданной точностью. Эта операция описывается с помощью нечетких правил и системы управления роботом, которая корректирует положение робота с помощью ультразвуковых или визуальных сенсоров.

Для компьютерного моделирования СНК является аналогом ГА, в котором хромосома выражается в виде совокупности нечетких правил “if ... then” как система классификатора. Нечеткие правила выражаются в соответствии с Рис. 10(б).

Алгоритм СНК (FCS) для мягких вычислений описывается следующим образом: (1) параллельное эволюционирование от индивида имеющего «малое» число входов (*low individual – LI*) к индивиду имеющему «большое» число входов (*high individual – HI*); (2) HI определяются как колонии состоящие из LI; (3) хромосома выражает связь каждого индивида; (4) каждый индивид оценивается как набор правил; (5) если оценка для HI лучше, чем оценка соединённого с ним LI, то LI получает новую оценку высокого.

Таблица Решающих Правил (ТПП, LPT – Look-up-Table), полученные СНК (FCS) в процессе моделирования, показаны в табл. 3, а пример моделирования движения MPCO с использованием этих правил показано на Рис. 12.

Табл. 3. Таблица решающих правил (ТПП) для СНК

Вход					Выход	
$\dot{\theta}_0$	u	r	ϕ	θ	\dot{u}	$\ddot{\theta}_0$
ZO	ZO	ZO	ZO	RB	PS	PM
ZO	ZO	ZO	ZO	RS	PS	–
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PS
ZO	ZO	ZO	ZO	LS	–	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	LB	NS	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	BK	NB	PB

θ_0 – угол направления движения робота; v – скорость движения робота; r – дистанция до финальной точки; ϕ – разница с финальным углом; θ – угол направления в финальной точке; ZO, PB – нечеткие функции.

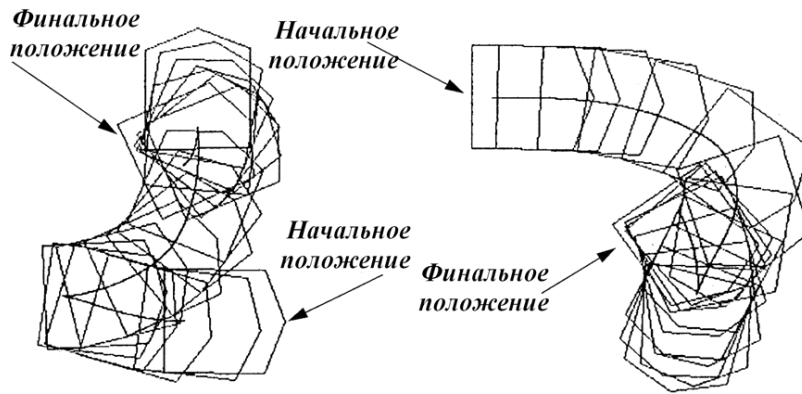


Рис. 12. Пример позиционирования MPCO с использованием ТРП – СНК

С помощью технологии ММВ (SCM), гибкий процесс обучения позволяет роботу, в результате, двигаться без повтора движений – *switch – back motion*, т.е. с первого раза приходиться к заданному положению, следуя рассчитанной траектории. Эксперт может создать те же правила, что и в табл. 2, но без гарантии того, что они являются оптимальными. Моделирование движения на основе мягких вычислений гарантирует: (1) автономное движение MPCO к заданной цели на основе продукционных нечетких правил СНК; (2) интеллектуальное движение MPCO.

Однако MPCO не может достичь цели с высокой точностью, именно потому, что СНК не способна адаптироваться к небольшим различиям в начальном положении – эволюционирующего процесса. Для адаптации эволюционирующего процесса, такого как, открытие двери с высокой точностью положения MPCO используется подход к интеллектуальным вычислениям на основе ГАНП.

Для эволюционирующего процесса построения траектории движения MPCO и манипулятора в операции открытия двери применен интеллектуальный вычислительный метод на основе изменения параметров ГА с использованием ГАНП.

Эволюционный интеллектуальный вычислительный метод по схеме ГА применяется ввиду невозможности определения явного функционального выражения для эволюционной функции [2–4]. Методы кодирования на основе ГА и ГАНП показаны на Рис. 13.

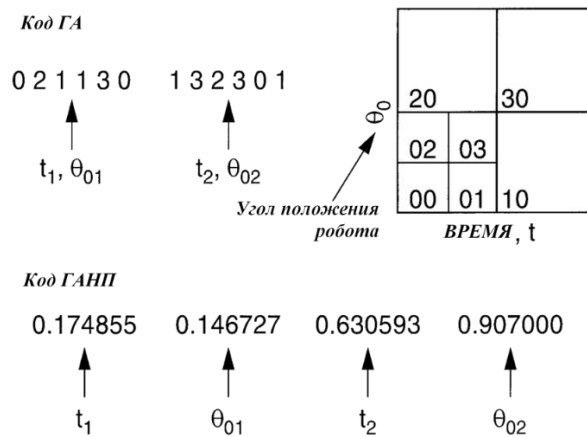


Рис. 13. Пример кодирования ГА – ГАНП.

Траектория движения кодируется выражением кривой, проходящей через 2 точки (t_1, θ_{01}) и (t_2, θ_{02}) с использованием сплайн-функции (где t – время, и θ_0 – угол направления движения робота). В положение робота перед дверью каждый угол наклона звеньев манипулятора и скорость движения фиксируются в положении захвата дверной ручки.

На Рис. 13 показано, что хромосома ГАНП состоит из действительных чисел.

Генетические операции ГАНП идентичны простому ГА, за исключением оператора мутации. Мутация в ГАНП описывается гауссовским распределением аддитивной мутации, а *Функция Пригодности* (ФП, *FF – Fitness Function*) имеет вид:

$$F = A(D_y - D_w / 2 - y_1 |_{x_1=D_x})^2 + B\theta_0^2 |_{x_1=D_x} + C\alpha_{total} + D\theta_{over}, \quad (8)$$

где x_1, y_1 – координаты передней оси; D_x, D_y – координаты центра вращения двери; D_w – ширина двери; α_{total} – сумма абсолютных значений угловых ускорений колес; θ_{over} – максимальный угол ограничения; A, B, C, D – коэффициенты.

Эта функция физически означает, что робот идет прямо к центру двери, продвигаясь поперек двери, ускорение предполагается небольшим, и углы манипулятора не превышают их ограничений. Если ФП мало, пригодность решения велика и в этом случае решается следующая оптимизационная задача:

$$\arg \min_x F(x), \quad (9)$$

для ГА необходимо, чтобы ФП имела множество конечных глобальных максимумов, $0 < F(x) < \infty$, $\forall x \in \Gamma \subseteq R^m$, Γ – область реализации вектора вещественных параметров; $F(x)$ – имеет множественное число точек разрыва функции.

Для ФП эти условия дополняются из выражения (8). Таким образом генетические операции представлены следующим образом: (1) операторы – одноточечный кроссовер и мутация; (2) методы родительского отбора – колеса рулетки; (3) методы пригодности – линейная нормализация; (4) метод воспроизводства – замена поколений элитной стратегией. В случае ГАНП используется гауссовская аддитивная мутация.

Мягкие вычисления с ГАНП характеризуется следующими положениями. После достаточно большого промежутка времени *Функция Плотности Вероятности* (ФПВ, PDF– *Probability Density Function*) популяции станет сужаться и сконцентрируется вокруг глобального минимума функции пригодности решения. В этом случае: $x_{k+1}^i = x_k^{*i} + w_k^i, i = 1, 2, \dots, N$, где w, i – являются независимыми и одинаково распределенными n -мерными случайными векторами с нулевым средним значением, $E(w_k^i) = 0$, и общей плотностью – $f_{w_k}(\square)$, $N \rightarrow \infty$; x_k^{*i} – промежуточные популяции после выбора по времени k (но до мутации с условным ФПВ $f_{w_k}(\square)$, которое характеризует оператор мутации во времени k). Тогда имеем:

$$f_{x_{k+1}}(x) = \int_{\Gamma} f_{x_k}(y)F(y)f_{w_k}(x|y)dy / \int_{\Gamma} f_{x_k}(y)F(y)dy, \quad (10)$$

или

$$f_{x_{k+1}}(x) = f'_k(x) * f_{w_k}(x), f'_k(x) = f_k(x)F(x)/E[F(x_k)]. \quad (11)$$

Оператор $*$ – m -размерная линейная свертка функций. Из (10) и (11) видно, как эволюционный процесс состоит из чередования альтернативных значений с функцией пригодности (селекции) и свертки с плотностью мутаций (мутациями). Причем первая стремится "сжать" плотность x вокруг глобального минимума функции пригодности, тогда как вторая "раздвигает" результирующую функцию распределения. Средний радиус мутации определяется как [17-19]:

$$\tilde{r}(k, x) = \int_{\Gamma} \|y - x\| f_{w_k}(y - x) dy, \quad (12)$$

$$\int_{\Gamma} \tilde{r}(k, x) f_k(x) dx \leq L^{-1} Var[F(x_k)], \quad (13)$$

где L – число Лифшица. Это достаточное условие для монотонного повышения среднего значения функции пригодности.

Большое текущее среднее значение пригодности требует небольшого шума, чтобы гарантировать монотонную характеристику; популяция решений уже сконцентрировалась в регионы с большой пригодностью. Большая дисперсия приспособленности соответствует популяции, все еще довольно

распределенной и устойчивой к большим мутационным эффектам. При сходимости $Var[F(x_k)] \rightarrow 0$, мутация соответственно уменьшается.

11.2. Физический эксперимент

Результаты моделирования поиска решений для типовой проблемы «открывания дверей» роботом показали, что предложенный метод интеграции ГА и нечеткой нейронной сети приводят к удовлетворительным решениям во многих случаях аналогичных задач управления движением роботом.

Результаты компьютерного моделирования типичной траектории движения MPCO в задаче открывания двери, выполняемой при использовании ГА, показана на Рис. 14.

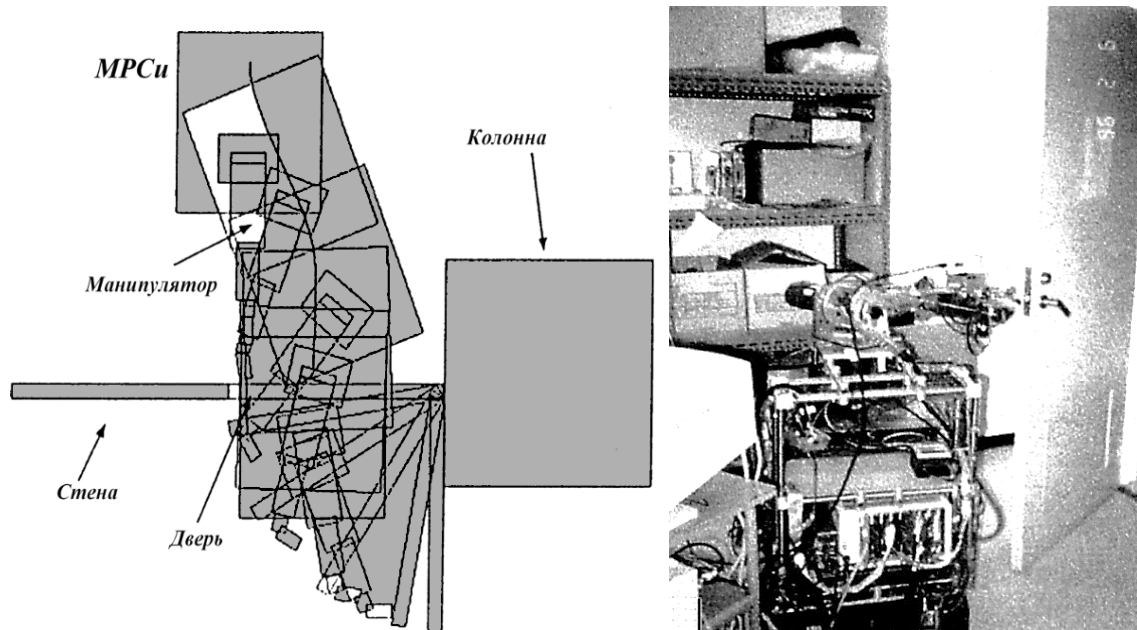


Рис. 14. Пример моделирования траектории MPCO при открывании двери [20].

Нахождение оптимального вариант траектории движения для открывания двери, выполняемое ГА показана на Рис. 15.

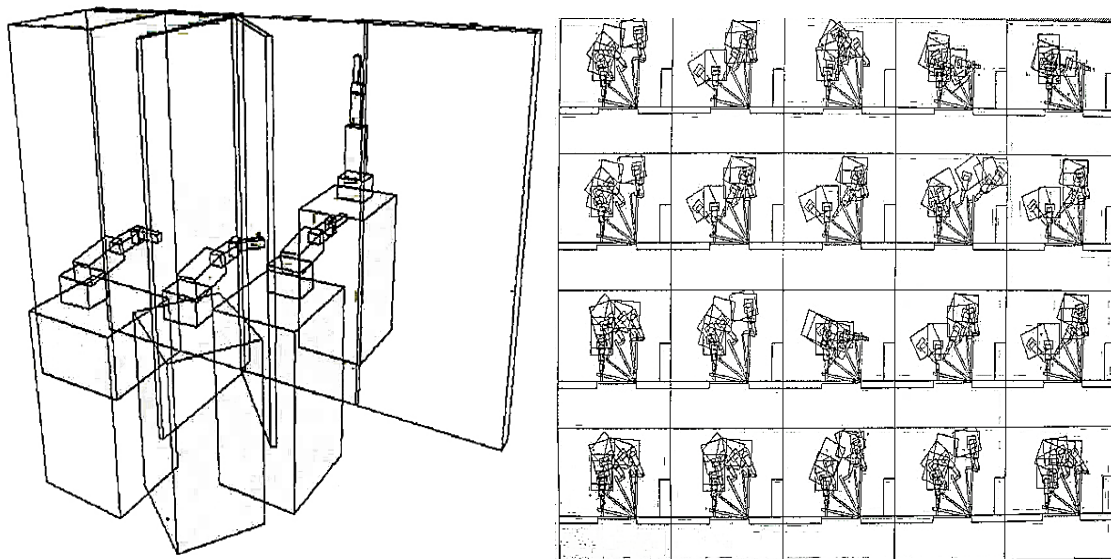


Рис. 15. Пример 3D моделирования оптимальной траектории MPCO при открывании двери и процесса оптимизации ГА

МРСО может выполнять совместные операции между перемещением и манипуляцией, а также успешно открывать и закрывать дверь. Интеллектуальное координационное управление движением транспортного средства и манипулятора осуществляется по принципу минимальной скорости производства энтропии [3,5,17].

На Рис. 16 представлены материалы натуральных экспериментов робота МРСО, подтверждающие работоспособность представленной системы на практических работах в реальных объектах.

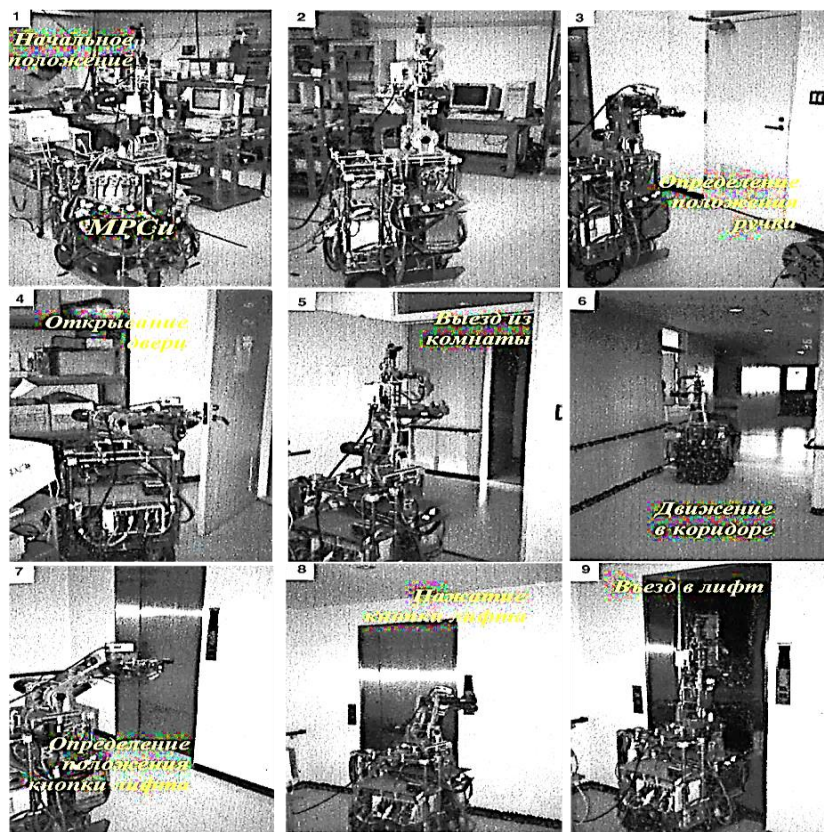


Рис. 16. Фотоматериалы экспериментов работы МРСО в реальных условиях [20].

Примечание. Изложенный подход существенно отличается от методов, описанных в [21-26], и опубликованных значительно позже работ [17,18,20].

Таким образом, интеллектуальное координационное управление МРСО может быть эффективно реализовано на технологии мягких вычислений как первый этап проектирования интеллектуальных регуляторов, встраиваемых в контур управления многосвязного объекта управления. Следующий этап применение квантовых мягких вычислений квантовой модели ментальных команд управления МРСО на естественном языке рассмотрена в следующей работе.

Список источников

1. Development of intelligent mobile robot for service use mobile automation system including wall climbing robots: Pt. 1 Fundamental design principles and motion models / S. V. Ulyanov, K. Yamafuji, V. G. Gradetsky, T. Fukuda // International Journal Of Intelligent Mechatronics And Robotics. – 1995. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 111-143.
2. Левин, М. Н. Технология мягких вычислений. Часть 2 Программная системная инженерия в интеллектуальной робототехнике / М. Н. Левин, О. Ю. Тятушкина, С. В. Ульянов. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. – 336 с.
3. Технология мягких вычислений. Часть 3. Введение в интеллектуальную робототехнику / А. В. Николаева, А. Г. Решетников, В. С. Ульянов, С. В. Ульянов. – Москва : КУРС, 2021. – 408 с.

4. Neural Brain: A Neuroscience-inspired Framework for Embodied Agents / Jian Liu, Xiongtao Shi, Thai Duy Nguyen [et al.] // arXiv : [electronic archive]. – arXiv:2505.07634 [cs.RO]. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.07634>. – Submitted on 12 May 2025.
5. What Is Next for LLMs? Next-Generation AI Computing Hardware Using Photonic Chips / Renjie Li, Wenjie Wei, Qi Xin [et al.] // arXiv : [electronic archive]. – arXiv:2505.05794v1 [cs.AR]. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.05794>. – Submitted on 09 May 2025.
6. Интеллектуальная когнитивная робототехника. Часть 1. Квантовый «сильный» вычислительный интеллект на основе технологии квантовых когнитивных вычислений / В. В. Боровинский, Р. Ю. Капков, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов. – Издание второе, переработанное и исправленное. – Москва : КУРС, 2024. – 557 с.
7. Intelligent cognitive robotics. Vol. I: Soft computational intelligence and information - thermodynamic law of intelligent cognitive control / О. Туатышкина, А. Решетников, В. Ульянов [и др.]. – Москва : Курс, 2022. – 528 с. – (Quantum IT).
8. Капков Р. Ю., Тятюшкина О. Ю., Ульянов С. В. Интеллектуальное когнитивное управление роботизированными социотехническими системами: Квантовые сквозные ИТ в объяснительном «сильном» ИИ для проекта «Индустрия 5.0» // Системный анализ в науке и образовании. – 2024. – № 2. – С. 47-90.
9. Иваницкий Г. Р. Неопределенности сравнения человека и андроидного робота // Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193., № 8. – С. 872-901. – <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.12.039299>.
10. Quantum and thermodynamic self-organization conditions for artificial life of biological nano-robot with AI control system (Report 1): quantum motion and thermodynamic stability / S. V. Ulyanov, K. Yamafuji, T. Fukuda [et al.]. // IEEE Forum on Micromachine and Micro-mechatronics. – Nagoya, Japan. – 1995. – P. 15-24.
11. Quantum and thermodynamic self-organization conditions for artificial life of biological nano-robot with AI control (Report 2) / S. V. Ulyanov, K. Yamafuji, T. Fukuda [et al.]. // Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science. – Nagoya, Japan. – 1996. – P. 241-248. – <https://doi.org/10.1109/MHS.1996.563431>.
12. Ульянов С. В., Литвинцева Л. В. Псевдофизические логики для интеллектуальных систем принятия решений: пространственно-временные модели // Сб. ИФТП РАН. – 1993. – С. 92-118.
13. Ульянов С. В. Квантовая релятивистская информатика. Том 2. Математическая корректность и физическая строгость описания квантовых релятивистских моделей: логические парадоксы / С. В. Ульянов. – Москва: Курс. – 2024. – 366 с.
14. Байдун В. В., Литвинцева Л. В., Налитов С. Д. Методы искусственного интеллекта в задаче визуализации трехмерных пространственных сцен // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 103-111.
15. Кандрашина Е. Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е. Ю. Кандрашина, Л. В. Литвинцева, Д. А. Поспелов; Под ред. Д. А. Поспелова. – Москва: Наука, 1989. – 326 с.
16. Litvintseva L. V. Visualization of three-dimensional scenes based on textual descriptions for intelligent systems // Journal of computer and systems sciences international. – 1993. – Vol. 31, Iss. 1. – P. 98-105.
17. Ohwi J., Ulyanov S. V., Yamafuji K. GA in continuous space and fuzzy classifier system for opening of door with manipulator of mobile robot: new benchmark of evolutionary intelligent computing // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – 1995. – Vol. 95, Iss. 1491. – P. 257-261.
18. Ohwi J., Ulyanov S. V., Yamafuji K. GA in continuous space and fuzzy classifier system for opening a door with a manipulator of mobile robot: New Benchmark of evolutionary intelligent computing // Journal of Robotics and Mechatronics. – 1996. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 297-301.
19. Qi X., Palmieri F. Theoretical analysis of evolutionary algorithms with an infinite population size in continuous space. Part II: Analysis of the diversification role of crossover // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1994. – Vol. 5, Iss. 1. – P. 120-129.

20. Intelligent control of a mobile robot for service use in office buildings and its soft computing algorithms / T. Tanaka, J. Ohwi, L.V. Litvintseva [et al.] // *Journal of Robotics and Mechatronics*. – 1996. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 538-554.
21. Cui G., Shuai W., Chen X. Semantic Task Planning for Service Robots in Open World // arXiv : [electronic archive]. – arXiv:2011.00621v1 [cs.RO]. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.00621>. – Submitted on 01 Nov. 2020.
22. Lisondra M., Benhabib B., Nejat G. Embodied AI with Foundation Models for Mobile Service Robots: A Systematic Review // arXiv : [electronic archive]. – arXiv: 2505.20503 v1[cs.HC]. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.20503>. – Submitted on 02 May 2025.
23. Lee I. Service Robots: A Systematic Literature Review // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10, Iss. 21. – P. 2658. – <https://doi.org/10.3390/electronics10212658>.
24. Rajan V., Cruz A. D. L. Utilization of Service Robots to Assist Human Workers in Completing Tasks Such in Retail, Hospitality, Healthcare, and Logistics Businesses // *Technoarete Trans. Industr. Robotics and Automation Systems*. – 2022. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 8-13.
25. Service Robots: Trends and Technology / J. A. Gonzalez-Aguirre, R. Osorio-Oliveros, K. L. Rodríguez-Hernández [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, Iss. 22. – P. 10702. – <https://doi.org/10.3390/app112210702>.
26. Research on the Frontier and Prospect of Service Robots in the Tourism and Hospitality Industry Based on International Core Journals: A Review / M. Chen, X. Wang, R. Law, M. Zhang // *Behavioral Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 7. – P. 560. – <https://doi.org/10.3390/bs13070560>.