

УДК 004.946; 62.519

VR-ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ «МНОГОРУКИМИ» УСТРОЙСТВАМИ: ПРОБЛЕМЫ, ГИПОТЕЗЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В. В. Кугуракова¹ [0000-0002-1552-4910], И. Д. Сергунин² [0000-0003-4025-0023],
Е. Ю. Зыков³ [0000-0002-3014-2507], А. В. Уланов⁴ [0000-0002-7336-5276],
О. Д. Сергунин⁵ [0000-0002-8134-589X], Д. Р. Габдуллина⁶ [0000-0002-4877-924X],
А. Ш. Гилемянов⁷ [0000-0001-8237-7589]

^{1, 3, 6} *Институт информационных технологий и интеллектуальных систем
Казанского федерального университета, ул. Кремлевская, д.35, г. Казань,
420008*

^{2, 4, 5, 7} *АО «Аринет Спейс», ул. Шаляпина 14/83, г. Казань, 420049*

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²sergunin.igor@arinet.space, ³Evgeniy.Zykov@kpfu.ru,
⁴ulanov.alexey@arinet.space, ⁵sergunin.oleg@arinet.space,
⁶dinaragabdullina086@gmail.com, ⁷gilemyanov.artem@arinet.space

Аннотация

Рассмотрены различные решения, существующие в области дистанционного управления роботизированными устройствами, оснащенными манипуляторами. Представлены новые подходы к организации совместного телеуправления множеством манипуляторов, с использованием различных пользовательских входов. Проанализированы следующие сценарии использования: архитектура системы с множеством манипуляторов и пользовательские интерфейсы управления, включая такие перспективные направления, как глубокое машинное обучение и нейроинтерфейсы.

Ключевые слова: виртуальная реальность, телеуправление, робот, ко-бот, робототехника, совместное телеуправление, телеимпенданс, когнитивное радио.

ВВЕДЕНИЕ

Навигация по станции с ядерным реактором, обезвреживание бомбы или ремонт международной космической станции снаружи – работы, очень опасные для

людей, а сохранение жизни человека и обеспечение его безопасности являются приоритетной задачей. Однако даже самые совершенные автономные роботы пока не в состоянии выполнять слишком сложные задачи, требующие захвата и манипулирования [1], поэтому дистанционное управление роботизированным устройством в реальном времени часто является практической альтернативой – человек может использовать свою ловкость и свои навыки для более точных манипуляций, без необходимости присутствовать физически. Последние технологические достижения в области робототехники и систем захвата движения значительно уменьшили классические ограничения телеуправления.

Эффективность телеуправления доказана во многих областях, например, при исследовании космоса [2–4], при проведении спасательных работ [5], [6], под водой [7] и в промышленных условиях [8].

Решая проблемы доступа к удаленной системе для работы в неизвестных, опасных или динамически изменяемых средах через телеуправление, необходимо максимально использовать когнитивные навыки человека. Наш интерес направлен на активное использование телеуправления как для навигации роботизированными устройствами, так и для удаленных операций (телеопераций, телеманипуляций).

Управление как процесс представляет собой организацию целенаправленного воздействия на *объект управления* (см. ГОСТ Р МЭК 60447-2000). По терминологии, принятой в 1960 г. на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению, автоматизированная система с человеком-оператором в контуре управления представляет собой *эргатическую систему управления* (ЭСУ).

По классическому определению (см. [9]): «*робототехническая система (робот¹)* – это совокупность механизмов и устройств (электронных, электрических, оптических, пневматических, гидравлических и т. п.), формирующих единую систему, в том числе имеющую распределенную сетевую структуру и выполняющую рабо-

¹ Робот – (от лат. *robota* «подневольный труд») автоматическое устройство, предназначенное для осуществления различного рода механических операций, которое действует по заранее заложенной программе.

чие операции, связанные со сложными пространственными перемещениями, способную к целесообразному поведению в условиях изменяющейся внешней обстановки без непосредственного участия человека за счет автоматизации процессов получения, преобразования, передачи и использования энергии, информации и материалов».

Там же [9]: «*манипуляционный робот* представляет собой пространственный управляемый механизм, заканчивающийся схватом или иным рабочим инструментом, с помощью которого можно перемещать объекты в рабочем пространстве, либо выполнять технологические операции».

В [9] выделены разные группы манипуляционных роботов, в частности, «*коллаборативные роботы (или ко-боты)*», представляющие собой конструкции управляемой жесткости, оснащенные системами силомоментного очувствления и управления по силе, которые в свою очередь могут иметь переизбыточные бионические манипуляторы или двурукие манипуляторы».

Не отказываясь от общеупотребительных терминов «робот» или «ко-бот», будем выделять устройства, не действующие по заранее заложенным программам, именуя их роботизированными единицами или дистанционно пилотируемые устройствами.

Связанные работы

В системах телеоперации движениями ведомого робота можно управлять с помощью различных интерфейсов, таких как джойстик [10], тактильный интерфейс [11], [12], 3-D мышь [13], [14], системы захвата движения [15–18] или гарнитуры виртуальной реальности. Однако для пользователя прямое отображение движений является наиболее интуитивным и эффективным методом управления роботом [19].

Телеимпеданс. Успех телеопераций также зависит от способности системы адаптировать свое взаимодействие с окружающей средой. В этом контексте парадигма телеимпеданса² [20] является мощным инструментом, поскольку она предусматривает оценку сопротивления руки пользователя с помощью поверхностной

² Телеимпеданс – (англ. impedance от лат. impedio «препятствовать»).

электромиографии и его воспроизведение на роботизированном аналоге. Так, удаленный манипулятор имитирует динамическое поведение человека, повышая безопасность, адаптивность и эффективность. Концепция телеимпедансного управления была введена в [21], причем эффективность этой концепции управления подтверждается несколькими сценариями взаимодействия (например, см. [22]).

Телеимпеданс заключается в воспроизведении желаемых траекторий движения и соответствующих профилей жесткости оператора податливым ведомым роботом в режиме реального времени. Это позволяет оператору регулировать силы взаимодействия между роботом и окружающей средой, избегая при этом проблем с устойчивостью замкнутого контура, возникающих при использовании традиционных двусторонних интерфейсов телеоперации. В то время как движения человека можно отслеживать с помощью точных и экономически эффективных внешних устройств, в современной литературе отсутствуют подходящие и вычислительно эффективные методы оценки импеданса конечностей в реальном времени. Особенно это касается сложных манипуляционных задач, которые исследуют все возможности динамики человеческой руки, а традиционные методы оценки траекторий крутящего момента и жесткости суставов человека требуют реализации нескольких этапов, от измерения биосигналов до кинематики и динамики опорно-двигательного аппарата.

Хорошо известно, что люди по-разному модулируют вязкоупругие свойства конечности. Один из подходов к этому – коконтракция групп мышц, воздействующих на конечность [23]. Альтернативно это может осуществляться путем адаптации чувствительности рефлекторной обратной связи [24] или избирательного контроля конфигурации конечности [25]. Традиционно совместное действие этих механизмов модуляции жесткости в конечной точке руки исследуется путем приложения к руке силы и исследования реакции смещения [26, 27]. За этим обычно следует этап автономной постобработки для оценки параметров импеданса. Применение таких методов для оценки динамических профилей импеданса в многосуставных движениях руки было подробно изучено [28].

Совместное управление. С ростом сложности задач роботизированного манипулирования может возникнуть необходимость одновременного использова-

ния и координации нескольких роботов, поскольку они также увеличивают рабочее пространство и диапазон грузов, которыми можно манипулировать. В частности, все более популярным становится бимануальное манипулирование [29, 30], для которого требуются двурукие роботизированные системы, где манипуляторы координируются для достижения общей цели [31].

С этой целью в системах телеоперации, где человек и робот выполняют общую задачу, была введена концепция совместного управления, по которой робот работает с определенной степенью автономности, чтобы уменьшить усилия пользователя. Чтобы извлечь выгоду из совместного управления в «многоруких» системах, в [32] использован словарь бимануальных движений для объединения пользовательских входов управления переводом и вращением с известными траекториями перевода и вращения. В [33] контактные силы и ориентация объекта регулируются самостоятельно, так что оператору нужно только управлять положением трехосевого ведущего тактильного устройства (3-DoF). В [34] использован метод обнаружения объектов на основе зрения для автоматизации захвата, но захват реализован только для одной руки. В [35] описаны задачи, требующие участия двух человек, поэтому две роботизированные руки управляются через двухпедальный ножной интерфейс. В [36] показано, что поддержка и перемещение груза с помощью синергетической координации роботов особенно эффективны и подходят для симметричных задач.

В ряде работ российских исследователей (см., например, [37]) представлены математические модели формирования команд совместного управления объектом и модели управляемого движения объекта в пространстве состояний. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 60447-2000 устанавливает общие требования к приводимым в действие вручную органам управления электрическим оборудованием, машинами или технологическими процессами, составляющими человеко-машинные интерфейсы.

«Многорукие» устройства. Все упомянутые выше исследования реализуют различные стратегии телеманипуляции с совместным управлением, но всегда ограничиваются телеманипуляцией двумя руками. В литературе мало исследований, посвященных использованию более двух манипуляторов в телеоперации. В

[38] собраны демонстрации задач для имитационного обучения с тремя роботизированными руками, но управляемыми из разных мест через смартфон отдельными пользователями на каждую руку. В [39] рассмотрен сценарий манипулирования «многорукими» устройствами с использованием трех или четырех рук и предложен метод увеличения индекса манипулируемости каждой руки, но не рассмотрены ситуации приближения, захвата и отпускания объекта. В [40] описана схема телеманипуляции, расширяющая предложенную в [41] и снимающая конфигурационное ограничение, когда одна механическая рука управляет концевыми захватами, но все руки всегда обращены друг к другу, и можно работать с любым количеством манипуляторов. В названной работе предложены:

- обобщение режима координированного управления для обеспечения любого возможного относительного положения между конечными эффекторами³;
- расширение режимов как независимого, так и координированного управления для управления любым количеством роботов одной рукой;
- отказ и сохранение управления предпочтительными роботами по запросу;
- создание менеджера ресурсов (роботов), который позволяет пользователю легко выбирать и перенастраивать управляемые манипуляторы и режимы управления на лету.

Благодаря таким возможностям пользователь может воспользоваться преимуществами высокой ловкости при соединении один на один, а также комбинированным управлением несколькими роботами с интеграцией общей автономии в структуру. Такая система очень гибка за счет интуитивной реконфигурируемости.

Итак, «многорукая» телеманипуляционная система может обеспечить интуитивное управление как отдельными манипуляторами, так и различными комбинациями любого количества роботизированных рук, предлагая синхронизировать действия в режиме реального времени. С помощью представленной архитектуры человек-оператор может выбирать предлагаемые способы управления и манипу-

³ Эффектор (от лат. effectus действие, результат, впечатление) – как правило, часть устройства, непосредственно влияющая на окружающую среду, например, руки человека; применяется также и как часть устройства, воспринимающая воздействие окружающей среды [42].

ляторы, которые делают задачу удобной для выполнения. Эксперименты, описанные выше, демонстрируют преимущества различных способов телеуправления (или удаленного управления несколькими роботами), так как пользователям удастся выполнить сложную задачу, которая было невозможно реализовать одной или даже двумя роботизированными руками.

В [43] предложена довольно гибкая структура, в которой любое количество роботов может одновременно управляться посредством телеоперации с возможностью выбора различных подгрупп рук, размещенных на этих удаленных роботах, в соответствии с выполняемой задачей. Этот подход обеспечивает интуитивное управление различными комбинациями любого количества роботизированных рук.

Для повышения удобства использования и улучшение пользовательского опыта при изменении конфигурации архитектуры управления устаревшие интерфейсы (типа джойстика) должны быть заменены более продвинутыми. Это позволит увеличить разнообразие пользовательских входов и поможет обогатить контроль управления удаленной системой.

Управление через смартфон. Еще одним способом удаленного управления роботизированной единицей является смартфон. В этом случае не требуется специфическая техника, пользователем может стать любой человек. Главной проблемой в использовании смартфона является интерфейс, ограниченный небольшими размерами экрана, а также огромным количеством кнопок и слайдеров, управляющих отдельными манипуляторами робота [44].

Компьютерное зрение. Алгоритмы компьютерного зрения для навигации роботизированной единицы также находят свое применение. В [45] описано использование библиотеки OpenCV для распознавания препятствий и их преодоления в городской среде, что применяется для распознавания лестниц с использованием карт глубины. Задача адаптивного контроля нескольких роботизированных единиц при помощи лидара также является проблемой при погружении робота в среду с препятствиями, для оптимальной работы сети. В [46] приведено решение данной проблемы с учетом возникающих неисправностей у агентов.

Виртуальная реальность (VR). VR в качестве интерфейса для телеуправления роботами дает одновременно захватывающий и детализированный пользовательский опыт. Иммерсивные среды позволяют достичь значительных результатов в любой области применения (см., например, [47] или [48]). Примеров, позволяющих удаленно управлять роботом дистанционно с помощью VR, тоже уже достаточно (см., например, [49–51]). Наш собственный опыт VR-телеуправления представлен в [52] и посвящен как вопросам обеспечения визуальной обратной связи от удаленного роботизированного устройства в режиме стереозрения, так и проблемам получения видеопотока в реальном времени независимо от местоположения устройства.

Другим примером использования виртуальной реальности для управления является проект IVRE [50]. Функционал IVRE позволяет манипулировать реальными физическими объектами, эмулировать захват различных виртуальных объектов, с возможностью редактирования их формы, размера и положения в виртуальном пространстве. Пользователю предоставляются виртуальный двойник робота и дисплей для отображения того, что происходит на небольшом пространстве стола с манипулируемыми предметами в реальном мире.

Машинное обучение. В работе [49] говорится об использовании виртуальной реальности для управления роботом. Подчеркнуто удобство использования контроллеров для управления манипуляторами. Действия для управления и захвата объектов являются естественными для человека, чем обусловлен низкий порог вхождения. В ходе названного исследования была реализована система телеуправления PR2 роботом при помощи шлема виртуальной реальности и контроллеров. Для более точного захвата объектов применено обучение на основе подражания (демонстраций). Такая форма обучения является новым и интересным подходом к приобретению роботами различных навыков. Однако получение демонстраций, пригодных для обучения, может оказаться сложной задачей. В анализируемой работе описано, как трекинг рук может быть использован для естественного телеуправления роботами при выполнении сложных задач. Ещё одним интересным направлением будущих исследований является масштабирование такой системы на несколько роботов для более быстрого и параллельного сбора данных.

Нейроинтерфесы. Виртуальная реальность позволяет эмулировать для человека те возможности, которые пока трудно достижимы в обыденной жизни, например, симуляцию новых манипуляторов, кроме обычных для человека (таких как руки, пальцы, для управления которыми существуют мышцы и чему человек учится с рождения). Первый пример такого использования, который сразу приходит в голову, – это реализация протеза руки для инвалидов [53], [54]. Другой пример – роботизированная система «увеличения» тела, которую носит один человек, но управляется более чем одним человеком, например, система Fusion [55] имеет две роботизированные конечности, управляемые телеоператором, в то время как роботизированная «голова» камеры, прикрепленная к суррогату, обеспечивает визуальную обратную связь. Таким образом, телеоператор и суррогат могут «делиться телом» и взаимодействовать удаленно.

Однако спектр возможностей можно бесконечно расширять, описывая не только третью руку, но и вторую пару рук или любые другие расширения человеческого тела – в литературе уже появились устойчивые выражения «третья рука» (third arm или imaginary third arm), «паразитическое тело» (parasitic body) [56], «лишние конечности» (supernumerary limbs, supernumerary robotic limbs или SRL) [57], дополнительные виртуальные роборуки (virtual supernumerary robotic arms), «мета-руки» (metaArms) [58]. Детальный обзор использования SRL с текущими техническими проблемами, с которыми приходится сталкиваться, а также применения ключевых технологий представлен в [59]. Но если смотреть на ситуацию несколько шире, чем применение SRL, то можно представить систему управления не только «конечностями»-руками, но и абстракциями, функционал которых позволяет захватывать или иначе воздействовать на другие абстракции. В качестве способа контроля предлагается использовать интерпретацию данных энцефалограммы (EEG), получаемых *in situ*, что уже используется, например, для управления протезом руки [60] или дистанционного управления квадрокоптером [61].

Сценарии использования третьей руки включают двойные задачи, когда пользователь должен выполнять две разные задачи одновременно. Дополнительные конечности могут помочь в выполнении двойных задач быстрее и эффектив-

нее [62], а масштаб владения дополнительными конечностями, о которых сообщают сами пользователи, увеличивается в течение сеансов, в которых пользователи их используют [63].

В [64] авторы исследовали, можно ли получить положительные результаты от владения виртуальным третьим плечом, о котором только что сообщил сам пользователь, переназначая «конечности» по необходимости.

В работе [65] основной фокус разработки находится в области реализации функционала для тренировки через интерфейс мозг–компьютер. Разработан универсальный алгоритм тренировки «призрачных конечностей», которые переключаются пользователем по необходимости на выполнение разных функций. Цель следующих исследований концепции тренировки управления несуществующими конечностями находится в области доказательства того, что ни изменение области применения, ни увеличение количества таких «призрачных конечностей» не влечет за собой экспоненциального роста сложности алгоритма, а зависит лишь от количества подходов к тренировке альтернативных средств контроля. Это утверждение спорное, требует тестирования и обработки репрезентативной выборки.

Многозвенные манипуляторы. В работе [66] представлен опыт разработки алгоритмов управления движущимся объектом со многими степенями свободы на примере многозвеного робота-манипулятора. Рассмотрена, в частности, задача согласованного ручного управления человеком-оператором несколькими многозвеновыми манипуляторами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо представить архитектуру совместного управления несколькими манипуляторами, размещенными на одном или разных удаленных дистанционно пилотируемых механических устройствах, с нативной реконфигурацией одновременно используемых манипуляторов, включая управление как через традиционные инструменты управления в виртуальной реальности, такие как трекинг рук или контроллеры, так и через тактильную связь (костюм или цифровые перчатки), нейроинтерфейсы или голосовое управление, с визуальным контролем размещения удаленных устройств в режиме стереозрения на основе общего пользования видеопотока в реальном времени, получаемого по сетям.

Минимизация задержек передачи данных является отдельной задачей.

Архитектура системы

На рис. 1 представлена обобщенная схема работы системы многопользовательского управления удаленными роботизированными устройствами, оснащенными множеством манипуляторов.

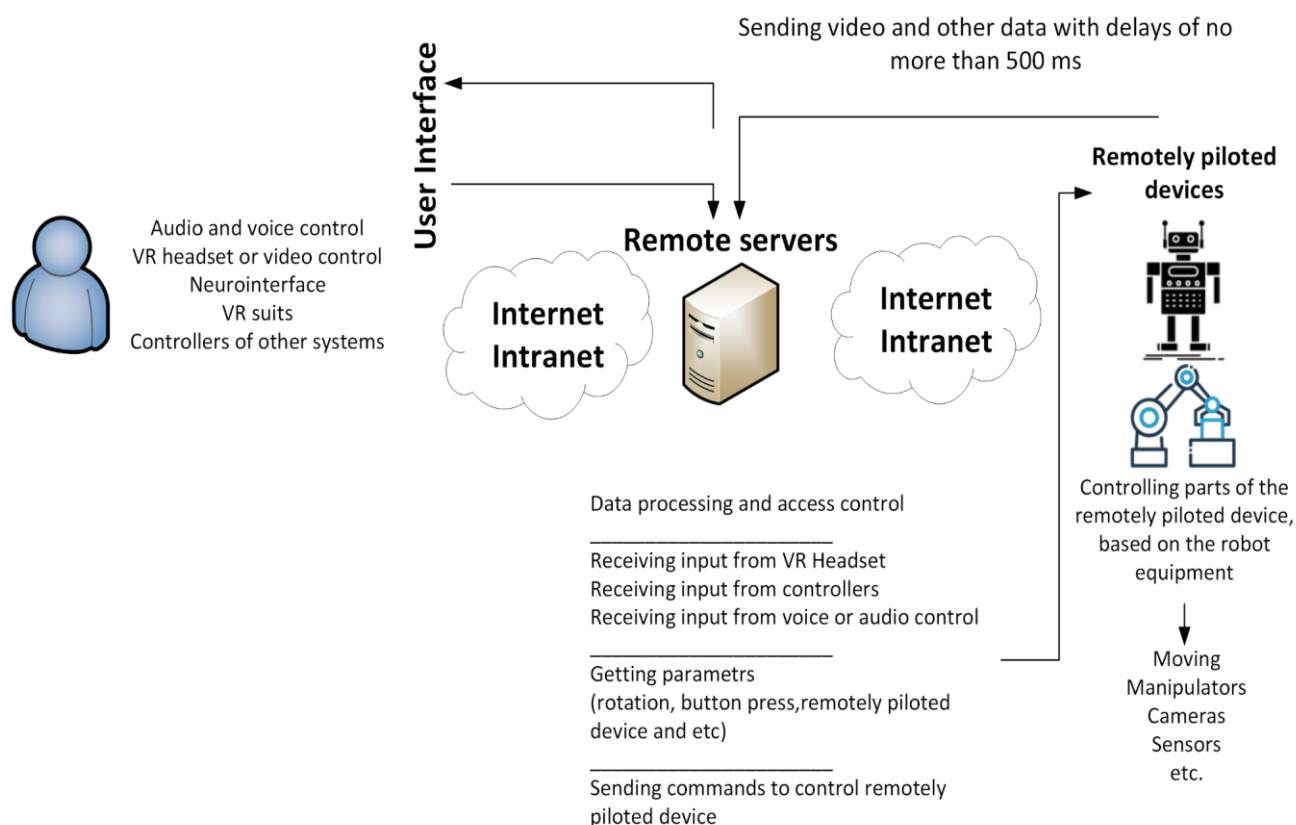


Рис. 1. Схема работы системы многопользовательского управления удаленными роботизированными устройствами

Один или более пользователей (человек-оператор), используя доступные им устройства (ПК, смартфон, гарнитуру VR, костюм VR и т. п.), через свои аккаунты Internet/intranet-платформы выбирают устройство, доступное им для управления, и начинают взаимодействие с удаленным устройством.

Серверы платформы, обрабатывая данные (видео, аудио, команды управления), полученные в режиме реального времени, формируют команды для удаленного устройства в соответствии с его функционалом. Команды поступают на исполнительные приводы удаленного устройства.

При взаимодействии оператор получает обратную связь от устройства в виде потока видео-, аудиоданных, данных с датчиков и сенсоров удаленного устройства. Эти данные позволяют пользователю (оператору) в режиме реального времени (задержка не должна превышать 500 мс) в режиме телеприсутствия управлять удаленным устройством.

В качестве пользовательского входа для управления (UI) могут быть использованы следующие типы устройств: ПК, смартфон, VR гарнитура, нейроинтерфейсные комплексы, костюмы VR и т. п. Выбор интерфейса взаимодействия с удаленным устройством определяется по следующим критериям:

- сложность удаленного устройства и его возможности;
- доступность для оператора (с учетом п. 1);
- пропускная способность сети передачи данных оператора и удаленного устройства.

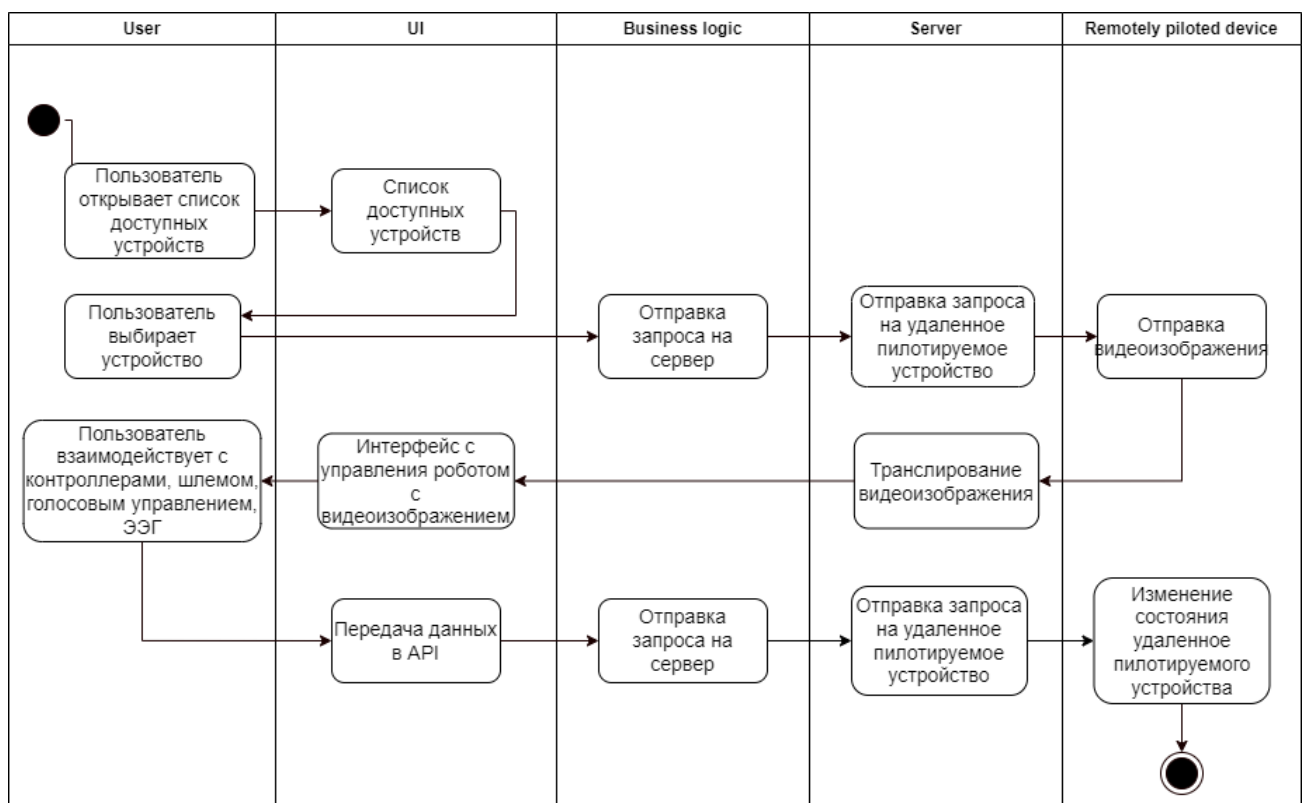


Рис. 2. UML-диаграмма активностей управления удаленным роботизированным устройством

На рис. 2 представлена схема передачи управления от одной подсистемы к другой. На схеме представлены следующие ключевые объекты: пользователь, пользовательский интерфейс, бизнес-логика, сервер и удаленное устройство.

БУДУЩИЕ РАБОТЫ

Представленная система уже реализована в пилотном исполнении, при этом использованы классические протоколы для передачи информации, включая стереоизображение [67], и стоят следующие задачи для её совершенствования: разработка нового кодека для передачи видеопотока в режиме реального времени, разработка новых подходов к использованию самоорганизующихся сетей, разработка алгоритмов обработки данных энцефалограмм в режиме реального времени для телеуправления мета-конечностью, разработка алгоритмов снятия показаний тела.

Также можно предложить следующий метод управления многорукими робототехническими устройствами одним оператором: управление двумя антропоморфными манипуляторами как роботами-копирами, с возможностью подключения или смены дополнительных манипуляторов при помощи тактильных датчиков, VR-гарнитур и других устройств, например, устройств с большей степенью автономностью, которые могут работать по заранее заданным детерминированным алгоритмам.

Когнитивное радио. Когда речь идёт о труднодоступных для человека местах, возникает проблема с наличием возможности подключения в принципе и, в частности, покрытием сетями в таких локациях. Сотовые сети позволяют использовать множество политик энергосбережения, имеют широкий переключаемый диапазон скоростей, частот и технологий доступа. Но недостатками использования сотовых сетей являются привязка к поставщику, плохое покрытие в труднодоступных местах, низкая проникающая способность на промышленных объектах [68]. Для создания распределённого сетевого телеуправления системой «многоруких» устройств вне покрытия интернетом необходимо обеспечить самоорганизующуюся сеть intranet в парадигме «когнитивного радио», позволяющую сохранять приемлемые параметры для передачи видеопотоков в режиме реального времени.

Наиболее перспективным стандартом, по нашему мнению, для когнитивных радиосистем является IEEE 802.11af (начало разработки – январь 2010 года), основной целью является адаптация семейства стандартов IEEE 802.11 к телевизионным полосам частот. В Российской Федерации по результатам научно-исследовательской работы, проведенной ФГУП НИИР, подготовлен отчет, на основе которого Государственная комиссия по радиочастотам в 2012 г. приняла решение «О создании опытной зоны по внедрению когнитивных систем широкополосного беспроводного доступа в Российской Федерации в полосе радиочастот 470–686 МГц» с приложением «Основные технические характеристики РЭС когнитивных систем широкополосного беспроводного доступа в полосе радиочастот 470–686 МГц» [69].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена обобщенная схема функционирования системы многопользовательского управления удаленными роботизированными устройствами, оснащенными множеством манипуляторов. Предложены методы управления многорукими робототехническими устройствами одним оператором. Рассмотрена возможность использования передачи данных по когнитивным сетям широкополосного беспроводного доступа по классическим протоколам и поставлены задачи для дальнейшего усовершенствования как непосредственно кодеков для передачи стереовидеосигналов, так и алгоритмов обработки данных в режиме реального времени с использованием элементов искусственного интеллекта. Поставленные задачи требуют экспериментальных исследований для получения оптимальных конструктивных аппаратных и программных схемотехнических решений, которые смогут в дальнейшем быть использованы в различных областях промышленности.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pratt G., Manzo J.* The darpa robotics challenge [competitions]. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2013. V. 20(2). P. 10–12.

2. *Artigas J. et al.* Kontur-2: Force-feedback teleoperation from the international space station // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA). 2016. P. 1166–1173.
3. *Bluethmann W.* Robonaut: A robot designed to work with humans in space // Auton. Robots. 2003. Vol. 14, no. 2. P. 179–197.
4. *Sheridan T.* Space teleoperation through time delay: Review and prognosis // IEEE Trans. Robot. Automat. 1993. Vol. 9, no. 5. P. 592–606.
5. *Negrello F.* Humanoids at work: The walk-man robot in a postearthquake scenario // IEEE Robot. Automat. Mag. 2018. Vol. 25, no. 3. P. 8–22.
6. *Hirche S., Stanczyk B., Buss M.* Transparent exploration of remote environments by internet telepresence // Proc. Int. Workshop High-Fidelity Telepresence Teleaction jointly with Conf. HUMANOIDS. 2003. P. 1–20.
7. *Khatib O. et al.* Ocean one: A robotic avatar for oceanic discovery // IEEE Robot. Automat. Mag. 2016. Vol. 23, no. 4. P. 20–29.
8. *Shukla A., Karki H.* Application of robotics in onshore oil and gas industry-a review part I // Robot. Auton. Syst. 2016. Vol. 75. P. 490–507.
9. *Колюбин С.А.* Динамика робототехнических систем / Учебное пособие // СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.
10. *Glynn S., Fekieta R., Henning R.* Use of force-feedback joysticks to promote teamwork in virtual teleoperation // Proc. Hum. Factors Ergonom. Soc. Annu. Meeting. 2001. Vol. 45. P. 1911–1915,
11. *Martinez-Palafox O., Lee D., Spong M.W., Lopez I., Abdallah C.T.* Bilateral teleoperation of mobile robot over delayed communication network: Implementation // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2006. P. 4193–4198.
12. *Selvaggio M., Giordano P.R., Ficuciello F., Siciliano B.* Passive task- prioritized shared-control teleoperation with haptic guidance // Proc. Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2019. P. 430–436.
13. *Materna Z. et al.* Teleoperating assistive robots: A novel user interface relying on semi-autonomy and 3D environment mapping // J. Robot. Mechatronics, 2017. Vol. 29. P. 381–394.
14. *Garate V.R., Gholami S., Ajoudani A.* A scalable framework for multi-robot tele-impedance control // IEEE Trans. Robot., 2021. Vol. 37, no. 6. P. 2052–2066.

15. *Clark J.P., Lentini G., Barontini F., Catalano M.G., Bianchi M., O'Malley M.K.* On the role of wearable haptics for force feedback in teleimpedance control for dual-arm robotic teleoperation // in Proc. Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2019. P. 5187–5193.

16. *Zhang T. et al.* Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2018. P. 5628–5635.

17. *Lipton J.I., Fay A.J., Rus D.* Baxter's homunculus: Virtualreality spaces for teleoperation in manufacturing // IEEE Robot. Automat. Lett., 2018. Vol. 3, no. 1. P. 179–186.

18. *Koenemann J., Burget F., Bennewitz M.* Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2014. P. 2806–2812.

19. *Rakita D., Mutlu B., Gleicher M.* A motion retargeting method for effective mimicry-based teleoperation of robot arms // Proc. IEEE/ACM 12th Int. Conf. Hum.-Robot Interaction, 2017. P. 361–370.

20. *Ajoudani A., Fang C., Tsagarakis N., Bicchi A.* Reduced-complexity representation of the human arm active endpoint stiffness for supervisory control of remote manipulation // Int. J. Robot. Res., 2018. Vol. 37, no. 1. P. 155–167.

21. *Ajoudani A., Tsagarakis N., Bicchi A.* Tele-impedance: Teleoperation with impedance regulation using a body-machine interface // International Journal of Robotics Research. 2012. Vol. 31(13). P. 1642–1655.

22. *Hocaoglu E., Patoglu V.* Tele-impedance control of a variable stiffness prosthetic hand. // IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO). Piscataway, NJ: IEEE. 2012, P. 1576–1582.

23. *Gribble P.L., Mullin L.I., Cothros N. et al.* Role of cocontraction in arm movement accuracy // Journal of Neurophysiology. 2003. Vol. 89(5). P. 2396–2405.

24. *Akazawa K., Milner T.E., Stein R.B.* Modulation of reflex EMG and stiffness in response to stretch of human finger muscle // Journal of Neurophysiology. 1983. Vol. 49(1). P. 16–27.

25. *Trumbower R.D., Krutky M.A., Yang B.S. et al.* Use of self-selected postures to regulate multi-joint stiffness during unconstrained tasks // PLoS ONE. 2009. Vol.4(5). P. e5411.

26. *Mussa-Ivaldi F.A., Hogan N., Bizzi E.* Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans // *Journal of Neuroscience*. 1985. Vol. 5(10). P. 2732–2743.

27. *Perreault E.J., Kirsch R.F., Crago P.E.* Voluntary control of static endpoint stiffness during force regulation tasks // *Journal of Neurophysiology*. 2002. Vol. 87(6). P. 2808–2816.

28. *Franklin DW, Burdet E, Osu R, et al.* Functional significance of stiffness in adaptation of multijoint arm movements to stable and unstable dynamics // *Experimental Brain Research*. 2003. Vol. 151(2). P. 145–157.

29. *Edsinger A., Kemp C.C.* Two arms are better than one: A behavior based control system for assistive bimanual manipulation // *Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human*. Berlin, Germany: Springer, 2007. P. 345–355.

30. *Makris S., Tsarouchi P., Surdilovic D., Krüger J.* Intuitive dual arm robot programming for assembly operations // *CIRP Ann.*, 2014. Vol. 63, no. 1. P. 13–16.

31. *Smithetal C.* Dual arm manipulation—survey // *Robot.Auton.Syst.*, 2012. Vol. 60, no. 10. P. 1340–1353.

32. *Rakita D., Mutlu B., Gleicher M., Hiatt L.M.* Shared control-based bimanual robot manipulation // *Sci. Robot.*, 2019. Vol. 4, Art. no. eaaw0955.

33. *Sun D., Liao Q., Loutfi A.* Single master bimanual teleoperation system with efficient regulation // *IEEE Trans. Robot.*, 2020. Vol. 36, no. 4. P. 1022–1037.

34. *Lin T.-C., Unni Krishnan A., Li Z.* Shared autonomous interface for reducing physical effort in robot teleoperation via human motion mapping // *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA)*, 2020. P. 9157–9163.

35. *Amanhoud W., Hernandez Sanchez J., Bouri M., Billard A.* Contact-initiated shared control strategies for four-arm supernumerary manipulation with foot interfaces // *Int. J. Robot. Res.*, 2021. Vol. 40, P. 1–29.

36. *Laghi M. et al.* Shared-autonomy control for intuitive bimanual telemanipulation // *Proc. IEEE-RAS 18th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids)*, 2018. P. 1–9.

37. *Тырва В.О.* Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2018. Т. 10. № 2. С. 430–443.

38. *Tung A. et al.* Learning multi-arm manipulation through collaborative teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2021. P. 9212–9219.

39. *Kennel-Maushart F., Poranne R., Coros S.* Manipulability optimization for multi-arm teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2021. P. 3956–3962.

40. *Ozdamar I., Laghi M., Grioli G., Ajoudani A., Bicchi A.* A Shared Autonomy Reconfigurable Control Framework for Telemanipulation of Multi-Arm Systems // IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 2022. Vol. 7, No. 4. P. 9937–9944.

41. *Laghi M. et al.* Shared-autonomy control for intuitive bimanual tele-manipulation // Proc. IEEE-RAS 18th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids), 2018. P. 1–9.

42. *Ашкинази Л.А.* Мир Лема – словарь и путеводитель. 2004. 1068 с.

43. *Ozdamar I., Laghi M., Grioli A., Ajoudani G., Catalano M.G., Bicchi A.* A Shared Autonomy Reconfigurable Control Framework for Telemanipulation of Multi-Arm Systems // IEEE Robotics and Automation Letters, 2022. V.7(4). P. 9937–9944.

44. *Florea B.C.* Smartphone Controlled Autonomous Robotic Platform // 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, 2018. P. 620–623.

45. *Mustafin M., Tsoy T., Martínez-García E.A., Meshcheryakov R., Magid E.* Modelling mobile robot navigation in 3D environments: camera-based stairs recognition in Gazebo // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russian Federation, 2022. P. 1–6.

46. *Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R.* Adaptive Multi-Agent Coverage Control with Obstacle Avoidance // IEEE Control Systems Letters, 2022. Vol. 6. P. 944–949.

47. *Кугуракова В.В., Антонов И.О., Гончаренко Б.В., Чайбар А.А.* Цифровое представление в виртуальной реальности места происшествия как инструмент уголовного судопроизводства // Программные системы: теория и приложения, 2022. Т. 13, вып. 3. С. 193–223.

48. *Kugurakova, V.V., Golovanova, I.I., Shaidullina, A.R.* Digital Solutions in Educators' Training: Concept for Implementing a Virtual Reality Simulator // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. 2021. Vol. 17, Is. 9. P.1–10.

49. *Tianhao Zhang, Zoe McCarthy, Owen Jow Dennis, Lee Xi Chen, Ken Goldberg, Pieter Abbeel*. Deep Imitation Learning for Complex Manipulation Tasks from Virtual Reality Teleoperation // eecs.berkeley.edu.

URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2020/EECS-2020-190.pdf> (дата обращения: 01.08.2022).

50. IVRE – An Immersive Virtual Robotics Environment [Электронный ресурс] // cirl.lcsr.jhu.edu

URL: <https://cirl.lcsr.jhu.edu/research/human-machine-collaborativesystems/ivre/> (дата обращения: 01.08.2022).

51. Reachy by Pollen Robotics, an open source programmable humanoid robot // pollen-robotics.com. URL: <https://www.pollen-robotics.com/> (дата обращения: 01.02.2022).

52. *Кузурасова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю.*, Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 348–361.

53. *Melero M., Hou A., Cheng E., Tayade A., Lee S.C., Unberath M., Navab N., Cutolo F.* Upbeat: Augmented Reality-Guided Dancing for Prosthetic Rehabilitation of Upper Limb Amputees // *Journal of Healthcare Engineering*. 2019. Art. 2163705.

54. *Nissler C., Nowak M., Connan M., Büttner S., Vogel J., Kossyk I., Márton Z.C., Castellini C.* VITA – An everyday virtual reality setup for prosthetics and upper-limb rehabilitation // *Journal of Neural Engineering*. 2019. Vol. 16(2). Art. 026039.

55. *Saraji M.Y., Sasaki T., Matsumura R., Minamizawa K., Inami M.* Fusion: full body surrogacy for collaborative communication // SIGGRAPH '18: ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies. 2018. Vol. 7. P. 1–2.

56. *Takizawa R., Hivarna A., Verhulst A., Seaborn K., Fukuoka M., Kitazaki M., Inami M., Suqirnoto M.* Parasitic body: Exploring perspective dependency in a shared body with a third arm // 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. VR 2019 – Proceedings. 2019. P. 1175–1176.

57. *Parietti F., Asada H.* Supernumerary Robotic Limbs for Human Body Support // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32(2). P. 301–311.

58. *Sasaki T., Saraiji Y., Minamizawa K., Inami M.* MetaArmS: Body remapping using feet-controlled artificial arms // *UIST 2018 Adjunct – Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2018. P. 140–142.

59. *Tong Y., Liu J.* Review of Research and Development of Supernumerary Robotic Limbs // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2021. Vol. 8. No. 5. P. 929–952.

60. *Aly H.I., Youssef S., Fathy C.* Hybrid Brain Computer Interface for Movement Control of Upper Limb Prostheses. 2018 International Conference on Biomedical Engineering Applications // *ICBEA 2018 – Proceedings*. 2018. P. 1–6.

61. *Aljalal M., Ibrahim S., Djemal R., Ko W.* Comprehensive review on brain-controlled mobile robots and robotic arms based on electroencephalography signals // *Intelligent Service Robotics*. 2020. Vol. 13 (4). P. 539–563.

62. *Abdi E., Burdet E., Bouri M., Himidan S., Bleuler H.*, In a demanding task three-handed manipulation is preferred to two-handed manipulation // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 1–11.

63. *Sasaki T., Saraiji Y., Minamizawa K., Inami M.* MetaArmS: Body remapping using feet-controlled artificial arms // *UIST 2018 Adjunct – Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2018. P. 140–142.

64. *Drogemuller A., Verhulst A., Volmer B., Thomas B.H., Inami M., Sugimoto M.* Remapping a Third Arm in Virtual Reality // *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Osaka, Japan, 2019. P. 898–899.

65. Виртуальный тренажер управления призрачными конечностями через интерфейс мозг–компьютер: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202211167 Российская Федерация / В.В. Кугуракова, Д.Г. Исмаилов, Д.М. Тимергалин; заявитель и правообладатель Фед. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образ. Казанский фед. ун-т. №2022610311; заявл. 13.01.2022; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.01.2022. – [1] с.

66. *Жильцов А.И., Жуков В.С., Рылеев Д.А.* Управление манипуляторами с числом степеней свободы более шести // *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013. Вып. 10. 11 с.

67. Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю. Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 348–361.

68. Ушакова М. В., Ушаков Ю. А. Исследование энергосберегающей беспроводной самоорганизующейся многопротокольной сети передачи данных интернет устройств // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 733–745.

69. Мирошникова Н.Е. Обзор систем когнитивного радио // T-Comm – Telecommunications and Transport. 2013. № 9. С. 108–111.

VR-TELECONTROL OF MULTI-ARM DEVICES: PROBLEMS, HYPOTHESES, PROBLEM STATEMENT

V. V. Kugurakova¹ [0000-0002-1552-4910], I. D. Sergunin² [0000-0003-4025-0023],
E. Yu. Zykov³ [0000-0002-3014-2507], A. V. Ulanov⁴ [0000-0002-7336-5276],
O. D. Sergunin⁵ [0000-0002-8134-589X], D. R. Gabdullina⁶ [0000-0002-4877-924X],
A. Sh. Gilemyanov⁷ [0000-0001-8237-7589]

^{1, 3, 6} Institute of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan Federal University, st. Kremlin, 35, Kazan, 420008

^{2, 4, 5, 7} JSC "Arinet Space", st. Chaliapin 14/83, Kazan, 420049

¹vlada.kugurakova@gmail.com, ²sergunin.igor@arinet.space, ³Evgeniy.Zykov@kpfu.ru,

⁴ulanov.alexey@arinet.space, ⁵sergunin.oleg@arinet.space,

⁶dinaragabdullina086@gmail.com, ⁷gilemyanov.artem@arinet.space

Abstract

The article discusses various solutions that exist in the field of remote control of robotic devices equipped with manipulators. New approaches are presented for organizing joint telecontrol of multiple manipulators using various user inputs. The following usage scenarios are considered: the architecture of a system with many manipulators

and user control interfaces, including such promising areas as deep machine learning and neural interfaces.

Keywords: virtual reality, telecontrol, robot, co-bot, robotics, joint telecontrol, teleimpedance, cognitive radio.

Acknowledgement

This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").

REFERENCES

1. *Pratt G., Manzo J.* The darpa robotics challenge [competitions]. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2013. V. 20(2). P. 10–12.
2. *Artigas J. et al.* Kontur-2: Force-feedback teleoperation from the international space station // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA). 2016. P. 1166–1173.
3. *Bluethmann W.* Robonaut: A robot designed to work with humans in space // Auton. Robots. 2003. Vol. 14, no. 2. P. 179–197.
4. *Sheridan T.* Space teleoperation through time delay: Review and prognosis // IEEE Trans. Robot. Automat. 1993. Vol. 9, no. 5. P. 592–606.
5. *Negrello F.* Humanoids at work: The walk-man robot in a postearthquake scenario // IEEE Robot. Automat. Mag. 2018. Vol. 25, no. 3. P. 8–22.
6. *Hirche S., Stanczyk B., Buss M.* Transparent exploration of remote environments by internet telepresence // Proc. Int. Workshop High-Fidelity Telepresence Teleaction jointly with Conf. HUMANOIDS. 2003. P. 1–20.
7. *Khatib O. et al.* Ocean one: A robotic avatar for oceanic discovery // IEEE Robot. Automat. Mag. 2016. Vol. 23, no. 4. P. 20–29.
8. *Shukla A., Karki H.* Application of robotics in onshore oil and gas industry-a review part I // Robot. Auton. Syst. 2016. Vol. 75. P. 490–507.
9. *Kolyubin S.A.* Dinamika robototekhnicheskikh sistem / Uchebnoe posobie // SPb.: Universitet ITMO, 2017. 117 s.
10. *Glynn S., Fekieta R., Henning R.* Use of force-feedback joysticks to promote teamwork in virtual teleoperation // Proc. Hum. Factors Ergonom.Soc. Annu. Meeting. 2001. Vol. 45. P. 1911–1915,

11. *Martinez-Palafox O., Lee D., Spong M.W., Lopez I., Abdallah C.T.* Bilateral teleoperation of mobile robot over delayed communication network: Implementation // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2006. P. 4193–4198.

12. *Selvaggio M., Giordano P.R., Ficuciello F., Siciliano B.* Passive task- prioritized shared-control teleoperation with haptic guidance // Proc. Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2019. P. 430–436.

13. *Materna Z. et al.* Teleoperating assistive robots: A novel user interface relying on semi-autonomy and 3D environment mapping // J. Robot. Mechatronics, 2017. Vol. 29. P. 381–394.

14. *Garate V.R., Gholami S., Ajoudani A.* A scalable framework for multi-robot tele-impedance control // IEEE Trans. Robot., 2021. Vol. 37, no. 6. P. 2052–2066.

15. *Clark J.P., Lentini G., Barontini F., Catalano M.G., Bianchi M., O'Malley M.K.* On the role of wearable haptics for force feedback in teleimpedance control for dual-arm robotic teleoperation // in Proc. Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2019. P. 5187–5193.

16. *Zhang T. et al.* Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2018. P. 5628–5635.

17. *Lipton J.I., Fay A.J., Rus D.* Baxter's homunculus: Virtualreality spaces for teleoperation in manufacturing // IEEE Robot. Automat. Lett., 2018. Vol. 3, no. 1. P. 179–186.

18. *Koenemann J., Burget F., Bennewitz M.* Real-time imitation of human whole-body motions by humanoids // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2014. P. 2806–2812.

19. *Rakita D., Mutlu B., Gleicher M.* A motion retargeting method for effective mimicry-based teleoperation of robot arms // Proc. IEEE/ACM 12th Int. Conf. Hum.-Robot Interaction, 2017. P. 361–370.

20. *Ajoudani A., Fang C., Tsagarakis N., Bicchi A.* Reduced-complexity representation of the human arm active endpoint stiffness for supervisory control of remote manipulation // Int. J. Robot. Res., 2018. Vol. 37, no. 1. P. 155–167.

21. *Ajoudani A., Tsagarakis N., Bicchi A.* Tele-impedance: Teleoperation with impedance regulation using a body-machine interface // International Journal of Robotics Research. 2012. Vol. 31(13). P. 1642–1655.

22. Hocaoglu E., Patoglu V. Tele-impedance control of a variable stiffness prosthetic hand. // IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO). Piscataway, NJ: IEEE. 2012, P. 1576–1582.

23. Gribble P.L., Mullin L.I., Cothros N. et al. Role of cocontraction in arm movement accuracy // Journal of Neurophysiology. 2003. Vol. 89(5). P. 2396–2405.

24. Akazawa K., Milner T.E., Stein R.B. Modulation of reflex EMG and stiffness in response to stretch of human finger muscle // Journal of Neurophysiology. 1983. Vol. 49(1). P. 16–27.

25. Trumbower R.D., Krutky M.A., Yang B.S. et al. Use of self-selected postures to regulate multi-joint stiffness during unconstrained tasks // PLoS ONE. 2009. Vol. 4(5). Art. e5411.

26. Mussa-Ivaldi F.A., Hogan N., Bizzi E. Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans // Journal of Neuroscience. 1985. Vol.5(10). P. 2732–2743.

27. Perreault E.J., Kirsch R.F., Crago P.E. Voluntary control of static endpoint stiffness during force regulation tasks // Journal of Neurophysiology. 2002. Vol. 87(6). P. 2808–2816.

28. Franklin DW, Burdet E, Osu R, et al. Functional significance of stiffness in adaptation of multijoint arm movements to stable and unstable dynamics // Experimental Brain Research. 2003. Vol. 151(2). P. 145–157.

29. Edsinger A., Kemp C.C. Two arms are better than one: A behavior based control system for assistive bimanual manipulation // Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human. Berlin, Germany: Springer, 2007. P. 345–355.

30. Makris S., Tsarouchi P., Surdilovic D., Krüger J. Intuitive dual arm robot programming for assembly operations // CIRP Ann., 2014. Vol. 63, no. 1. P. 13–16.

31. Smithetal C. Dual arm manipulation—survey // Robot.Auton.Syst., 2012. Vol. 60, no. 10. P. 1340–1353.

32. Rakita D., Mutlu B., Gleicher M., Hiatt L.M. Shared control-based bimanual robot manipulation // Sci. Robot., 2019. Vol. 4, Art. no. eaaw0955.

33. Sun D., Liao Q., Loutfi A. Single master bimanual teleoperation system with efficient regulation // IEEE Trans. Robot., 2020. Vol. 36, no. 4. P. 1022–1037.

34. *Lin T.-C., Unni Krishnan A., Li Z.* Shared autonomous interface for reducing physical effort in robot teleoperation via human motion mapping // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2020. P. 9157–9163.

35. *Amanhoud W., Hernandez Sanchez J., Bouri M., Billard A.* Contact-initiated shared control strategies for four-arm supernumerary manipulation with foot interfaces // Int. J. Robot. Res., 2021. Vol. 40, P. 1–29.

36. *Laghi M. et al.* Shared-autonomy control for intuitive bimanual telemanipulation // Proc. IEEE-RAS 18th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids), 2018. P. 1–9.

37. *Tyrva V.O.* Sovmestnoe upravlenie ob"ektom v ergaticheskoy sisteme: modeli i realizacii // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2018. T. 10. No. 2. S. 430–443.

38. *Tung A. et al.* Learning multi-arm manipulation through collaborative teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2021. P. 9212–9219.

39. *Kennel-Maushart F., Poranne R., Coros S.* Manipulability optimization for multi-arm teleoperation // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA), 2021. P. 3956–3962.

40. *Ozdamar I., Laghi M., Grioli G., Ajoudani A., Bicchi A.* A Shared Autonomy Reconfigurable Control Framework for Telemanipulation of Multi-Arm Systems // IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 2022. Vol. 7, No. 4. P. 9937–9944.

41. *Laghi M. et al.* Shared-autonomy control for intuitive bimanual tele-manipulation // Proc. IEEE-RAS 18th Int. Conf. Humanoid Robots (Humanoids), 2018. P. 1–9.

42. *Ashkinazi L.A.* Mir Lema – slovar' i putevoditel'. 2004. 1068 s.

43. *Ozdamar I., Laghi M., Grioli A., Ajoudani G., Catalano M.G., Bicchi A.* A Shared Autonomy Reconfigurable Control Framework for Telemanipulation of Multi-Arm Systems // IEEE Robotics and Automation Letters, 2022. Vol.7(4). P. 9937–9944.

44. *Florea B.C.* Smartphone Controlled Autonomous Robotic Platform // 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, 2018. P. 620–623.

45. *Mustafin M., Tsoy T., Martínez-García E.A., Meshcheryakov R., Magid E.* Modelling mobile robot navigation in 3D environments: camera-based stairs recognition in

Gazebo // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russian Federation, 2022. P. 1–6.

46. *Bai Y. , Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R.* Adaptive Multi-Agent Coverage Control With Obstacle Avoidance // *IEEE Control Systems Letters*, 2022. Vol. 6. P. 944–949.

47. *Kugurakova V.V., Antonov I.O., Goncharenko B.V., Chajbar A.A.* Cifrovoe predstavlenie v virtual'noj real'nosti mesta proisshestviya kak instrument ugovnogo sudoproizvodstva // *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2022. T. 13, vyp. 3. S. 193–223.

48. *Kugurakova, V.V., Golovanova, I.I., Shaidullina, A.R.* Digital Solutions in Educators' Training: Concept for Implementing a Virtual Reality Simulator // *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2021. Vol. 17, Is. 9. P. 1–10.

49. *Tianhao Zhang, Zoe McCarthy, Owen Jow Dennis, Lee Xi Chen, Ken Goldberg, Pieter Abbeel.* Deep Imitation Learning for Complex Manipulation Tasks from Virtual Reality Teleoperation // eecs.berkeley.edu.

URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2020/EECS-2020-190.pdf> (access date: 01.08.2022).

50. IVRE – An Immersive Virtual Robotics Environment // cirl.lcsr.jhu.edu.
URL: <https://cirl.lcsr.jhu.edu/research/human-machine-collaborativesystems/ivre/> (access date: 01.08.2022).

51. Reachy by Pollen Robotics, an open source programmable humanoid robot // pollen-robotics.com. URL: <https://www.pollen-robotics.com/> (access date: 01.08.2022).

52. *Kugurakova V.V., Hafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu.* Udalennoe upravlenie robotizirovannym ustrojstvom s ispol'zovaniem tekhnologij virtual'noj real'nosti // *Programmnye produkty i sistemy*. 2022. T. 35. No.3. S. 348–361.

53. *Melero M., Hou A., Cheng E., Tayade A., Lee S.C., Unberath M., Navab N., Cutolo F.* Upbeat: Augmented Reality-Guided Dancing for Prosthetic Rehabilitation of Upper Limb Amputees // *Journal of Healthcare Engineering*. 2019. Art. 2163705.

54. *Nissler C., Nowak M., Connan M., Büttner S., Vogel J., Kossyk I., Márton Z.C., Castellini C.* VITA – An everyday virtual reality setup for prosthetics and upper-limb rehabilitation // *Journal of Neural Engineering*. 2019. Vol. 16(2). Art. 026039.

55. Saraiji M.Y., Sasaki T., Matsumura R., Minamizawa K., Inami M. Fusion: full body surrogacy for collaborative communication // SIGGRAPH '18: ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies. 2018. Vol. 7. P. 1–2.

56. Takizawa R., Hivarna A., Verhulst A., Seaborn K., Fukuoka M., Kitazaki M., Inami M., Sugimoto M. Parasitic body: Exploring perspective dependency in a shared body with a third arm // 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. VR 2019 – Proceedings. 2019. P. 1175–1176.

57. Parietti F., Asada H. Supernumerary Robotic Limbs for Human Body Support // IEEE Transactions on Robotics. 2016. Vol. 32(2). P. 301–311.

58. Sasaki T., Saraiji Y., Minamizawa K., Inami M. MetaArmS: Body remapping using feet-controlled artificial arms // UIST 2018 Adjunct – Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2018. P. 140–142.

59. Tong Y., Liu J. Review of Research and Development of Supernumerary Robotic Limbs // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2021. Vol. 8. No. 5. P. 929–952.

60. Aly H.I., Youssef S., Fathy C. Hybrid Brain Computer Interface for Movement Control of Upper Limb Prostheses. 2018 International Conference on Biomedical Engineering Applications // ICBEA 2018 – Proceedings. 2018. P. 1–6.

61. Aljalal M., Ibrahim S., Djemal R., Ko W. Comprehensive review on brain-controlled mobile robots and robotic arms based on electroencephalography signals // Intelligent Service Robotics. 2020. Vol. 13 (4). P. 539–563.

62. Abdi E., Burdet E., Bouri M., Himidan S., Bleuler H., In a demanding task three-handed manipulation is preferred to two-handed manipulation // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 1–11.

63. Sasaki T., Saraiji Y., Minamizawa K., Inami M. MetaArmS: Body remapping using feet-controlled artificial arms // UIST 2018 Adjunct - Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2018. P. 140–142.

64. Drogemuller A., Verhulst A., Volmer B., Thomas B.H., Inami M., Sugimoto M. Remapping a Third Arm in Virtual Reality // 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019. P. 898–899.

65. Virtual'nyj trenazher upravleniya prizrachnymi konechnostyami cherez interfejs mozg-komp'yuter : Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 202211167 Rossijskaya Federaciya / V.V. Kugurakova, D.G. Ismailov, D.M. Timergalin;

заявитель' i правообладатель' Fed. gos. avtonom. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obraz. Kazanskij fed. un-t. №2022610311; zayavl. 13.01.2022; zaregistrovano v reestre programm dlya EVM 20.01.2022. – [1] s.

66. *Zhil'cov A.I., Zhukov V.S., Ryleev D.A.* Upravlenie manipulyatorami s chislom stepenej svobody bolee shesti // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii, 2013, vyp. 10. 11 c.

67. *Kugurakova V.V., Hafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu.* Udalennoe upravlenie robotizirovannym ustrojstvom s ispol'zovaniem tekhnologij virtual'noj real'nosti // Programmnye produkty i sistemy. 2022. T. 35. No. 3. S. 348–361.

68. *Ushakova M.V., Ushakov Yu.A.* Issledovanie energosberegayushchej besprovodnoj samoorganizuyushchejsya mnogoprotokol'noj seti peredachi dannyh internet ustrojstv // Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie. 2019. T. 15, No. 3. S. 733–745.

69. *Miroshnikova N.E.* Obzor sistem kognitivnogo radio // T-Comm – Telecommunications and Transport magazine. 2013. No. 9. S. 108–111.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – к. т. н., доцент кафедры программной инженерии Института ИТИС КФУ, руководитель НИЛ разработки интеллектуальных инструментов для компьютерных игр. Сфера научных интересов – иммерсивность виртуальных сред, различные аспекты проектирования игр, AR/VR.

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA, PhD., Docent of the Institute ITIS KFU, Head of laboratory of intelligent tools design for computer games development. Research interests include immersiveness of virtual environments, problems of generating realistic visualization, various aspects of game design, AR/VR.

email: vlada.kugurakova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1552-4910



СЕРГУНИН Игорь Дмитриевич – технический Директор АО «Аринет Спейс». Сфера научных интересов – робототехника, сетевые технологии, ИИ, системы телеприсутствия, системы беспроводной передачи данных, системы дистанционного управления сложными манипуляторами.

Igor Dmitrievich SERGUNIN – Technical Director of Arinet Space JSC. Research interests - robotics, network technologies, AI, telepresence systems, wireless data transmission systems, remote control systems for complex manipulators.

email: sergunin.igor@arinet.space

ORCID: 0000-0003-4025-0023



ЗЫКОВ Евгений Юрьевич – доцент, к. ф.-м. н., руководитель НИЛ «Технологии расширенной реальности в промышленных процессах» («Приоритет 2030»), доцент кафедры радиоастрономии Высшей школы киберфизических систем и прикладной электроники Института физики Казанского федерального университета. Область научных интересов: радиофизика, математическое моделирование и численные методы, математическое и программное обеспечение вычислительных машин.

Evgeniy Yurevich ZYKOV – Docent, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Research Laboratory of Augmented Reality Technology in Industrial Processes («Priority 2030»), Associate Professor of the Department of Radio Astronomy of the Higher School of Cyber-Physical Systems and Applied Electronics of the Institute of Physics of Kazan Federal University. Research interests: radiophysics, mathematical modeling and numerical methods, mathematical and computer software.

email: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

ORCID: 0000-0002-3014-2507

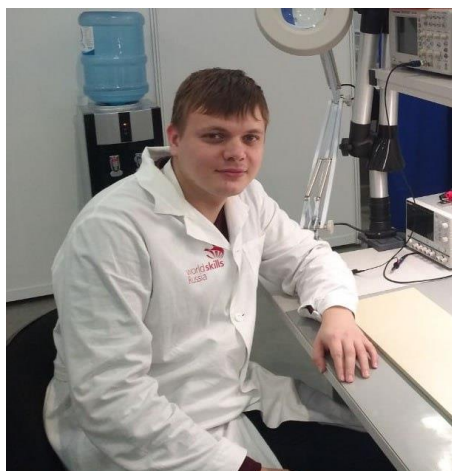


СЕРГУНИН Олег Дмитриевич – Генеральный Директор АО «Аринет Спейс». Сфера научных интересов – робототехника, сетевые технологии, ИИ, системы телеприсутствия, системы беспроводной передачи данных, системы дистанционного управления сложными манипуляторами.

Oleg Dmitrievich SERGUNIN – General Director of Arinet Space JSC. Research interests are robotics, network technologies, AI, telepresence systems, wireless data transmission systems, remote control systems for complex manipulators.

email: sergunin.oleg@arinet.space

ORCID: 0000-0002-8134-589X



УЛАНОВ Алексей Валерьевич – Главный конструктор АО «Аринет Спейс». Сфера научных интересов – робототехника, цифровая обработка сигналов, инфокоммуникационные технологии и системы связи, технологии программно-конфигурируемого радио.

Alexey Valerievich ULANOV – Chief designer of JSC «AriNet Space». Research interests - Robotics, digital signal processing, infocommunication technologies and communication systems, software defined radio technologies.

email: ulanov.alexey@arinet.space

ORCID: 0000-0002-7336-5276



ГАБДУЛЛИНА Динара Рустамовна – лаборант, НИЛ «Технологии расширенной реальности в промышленных процессах» Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского федерального университета («Приоритет 2030»). Область научных интересов: технологии дополненной и виртуальной реальности, компьютерное зрение.

Dinara Rustamovna GABDULLINA – laboratory assistant, Research Laboratory of Augmented Reality Technologies in Industrial Processes of the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan Federal University («Priority 2030»). Research interests: augmented and virtual reality technologies, computer vision.

email: dinaragabdullina086@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4877-924X



ГИЛЕМЯНОВ Артем Шамилевич – Руководитель отдела робототехники АО «Аринет Спейс». Сфера научных интересов – робототехника, системы управления удаленными устройствами.

Artem Shamilevich GILEMYANOV – Head of the Robotics Department of Arinet Space JSC. Research interests - Robotics, remote device control systems.

email: gilemyanov.artem@arinet.space

ORCID: 0000-0001-8237-7589

Материал поступил в редакцию 12 сентября 2022 года