

ОБЗОРЫ

OVERVIEWS

УДК 37.02:004.896:004.031.42:004.946:159.9:612:378.2

ФОРМИРОВАНИЕ У КОСМОНАВТОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ОПЫТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ С СЕРВИСНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ НА ЛУННОЙ БАЗЕ

М.В. Михайлюк, Б.И. Крючков, В.М. Усов,
М.М. Князьков, О.И. Лахин

Докт. физ.-мат. наук, проф. М.В. Михайлюк (Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»)

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; докт. мед. наук, проф. В.М. Усов (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Канд. техн. наук М.М. Князьков (ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»)

Канд. техн. наук О.И. Лахин (ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения»)

При проектировании системы технического обслуживания лунной станции предстоит решать вопросы поиска способов информационной поддержки экипажа в интересах раннего выявления отклонений в режимах функционирования бортовых систем. В этой связи перспективно использование возможностей сервисных роботов, применение которых может способствовать: 1) поддержанию стабильного состояния лунной станции в условиях автономности лунных миссий и 2) существенной разгрузке экипажа от повторяющихся, затратных по времени работ и, кроме того, требующих перемещения космонавтов внутри станции для перманентного контроля обстановки. Постановка вопроса о применении группы сервисных мобильных роботов на лунной станции предполагает изучение способов построения рационального взаимодействия экипажа космонавтов и группы роботов с опорой на передовые технологии планирования маршрутов, безаварийного перемещения, применения навигационных систем и алгоритмов автоматического и ручного управления мобильными роботами. Эта проблема рассматривается в контексте работы операторов в виртуальном окружении на компьютеризированных стендах, позволяющих отработать сложные вопросы человеко-машинного взаимодействия посредством накопления пользовательского опыта.

Ключевые слова: обитаемая лунная база, мониторинг состояния замкнутой среды, сервисные роботы, взаимодействие космонавтов и роботов, виртуальная среда моделирования деятельности, пользовательский опыт

Formation of Cosmonauts' User Experience to Interact with Service Mobile Robots on the Moon Base in Virtual Environment.

M.V. Mikhailyuk, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, M.M. Knyazkov, O.I. Lakhin

When designing the system of servicing the moon station, we have to tackle the issues of searching for the ways of information support of crews in order to detect deviations in the operation modes of onboard systems as early as possible. In this regard, it is promising to use the capabilities of service robots for the following: 1) to maintain the stable condition of the moon base in autonomous lunar missions and 2) to relieve considerably the crewmembers of repeated time-consuming operations that moreover require moving inside the base for permanent environment monitoring. Broadly speaking, to solve the problem of using a group of service robots on the moon base it is supposed to study the ways of ensuring rational interaction between cosmonauts and robots applying advanced technologies of route planning, accident-free moving, using navigation systems and algorithms for automatic and hand control of mobile robots. This problem is considered in the context of the work of operators in a virtual environment on computerized stands, which make it possible to work out complex issues of human-machine interaction through the accumulation of user experience.

Keywords: habitable moon base, confined space condition monitoring, service robots, interaction between cosmonauts and robots, virtual environment of activity modeling, user experience

1. Введение

В настоящее время в экстремальной робототехнике вопросам применения групп автономных роботов различного базирования уделяется повышенное внимание в аспектах их взаимодействия с человеком-оператором. Для решения этого круга вопросов потребовалось привлечение ряда передовых технологий: 1) технического зрения для распознавания объектов среды и обеспечения операторов каналами обратной связи при дистанционном управлении роботами; 2) системы предотвращения коллизий; 3) систем локальной навигации и позиционирования внутри помещений в реальном времени и др. Компетенциями владения этими обеспечивающими активностью роботов технологиями должны владеть члены космических экипажей в условиях автономных миссий. Без поддержки наземных групп при осложнении обстановки на лунной станции необходимо не только уметь пользоваться всем арсеналом доступных средств на борту, но при необходимости и менять схему мониторинга замкнутой среды, усиливая внимание к проблемным локациям.

Объективными факторами, способствующими широкому внедрению сервисных роботов во все сферы жизни, является необходимость значимо

снизить рабочую нагрузку на человека в тех технологических цепочках, в которых велика доля ручного, рутинного, затратного по времени исполнения труда, а также предотвратить нежелательные последствия отказов оборудования, которые приводят к аварийным ситуациям. Человеко-центрический подход к построению системы «человек – сервисный робот – рабочая среда» в области пилотируемой космонавтики предполагает выбор таких решений, которые облегчают человеку-оператору (конечному пользователю) мониторинг текущей обстановки внутри рабочих помещений, коммуникацию с роботами и контроль (настройку) активности сервисных роботов на выполнение целевых задач по требованию технических регламентов или в контексте текущей осложненной обстановки. В свою очередь, человек должен владеть разноплановыми инструментами из области высоких технологий, применение которых улучшает ситуационную осведомленность и позволяет найти нестандартные решения новых проблем. Именно опыт владения высокими технологиями для управления сложной роботизированной системой позволяет гибко реагировать на неоднозначную обстановку и перестраивать сценарии применения группы автономных мобильных роботов (АМР) для поиска наиболее рационального решения [1–3].

Из этих положений вытекает представленное ниже описание области применения мобильных сервисных роботов на лунной станции. Как и в других сферах экстремальной робототехники, приоритетным является обеспечение безопасности рабочей среды при построении человеко-машинных интерфейсов.

Этот подход может быть реализован посредством придания участникам смешанной команды «экипаж – группа сервисных роботов» следующих функций:

1) человеку-оператору – инициирования активности роботов, в том числе в наиболее критичных условиях и режимах выполнения полетных операций на основе глубокого понимания космонавтом логики работы всех систем, приоритетов стоящих полетных задач, хорошего уровня ситуационной и пространственной осведомленности и наличия универсальных общетехнических компетенций, позволяющих адекватно реагировать на вариативность текущих задач;

2) мобильным сервисным роботам – способности функционирования в группе при условии наличия у них ряда прикладных функций для мониторинга обстановки, которые они способны реализовать в автономном режиме управления, но при необходимости – в супервизорном режиме управления, что позволяет гибко перестраивать их работу в соответствии с новыми предписаниями и заданиями.

Наиболее значимая цель такого распределения функций – создать благоприятные условия труда для высококвалифицированных специалистов (космонавтов-исследователей и космонавтов-испытателей) [2, 3].

2. Определение сервисных роботов, типы и отличительные особенности, предпочтительные области применения на лунной базе

2.1. Признаки и характеристики функционала роботов, используемые для их типизации при взаимодействии с человеком

В современной робототехнике важнейшим понятием является «взаимодействие человека и робота». Именно этот признак часто выступает определяющим, когда проводят классификацию роботов, пригодных для использования в производственной и социальной среде [1–4].

Предложены разные терминологические подходы для производственных, социальных, коллаборативных и сервисных роботов. Достаточно трудно прогнозировать в среднесрочной перспективе применение в пилотируемой космонавтике производственных роботов, хотя планы разведки и добычи полезных ископаемых на Луне активно обсуждаются.

В то же время можно уверенно констатировать рост интереса к сервисным, социальным и коллаборативным роботам. В литературе обычно предлагается классификация, основанная на целевом применении роботов, составе их пользователей и условиях эксплуатации, но в определенной мере представления о типах роботов пересекаются по выделяемым отличительным признакам.

Если сравнивать между собой типы сервисных и коллаборативных роботов, как преимущественно ориентированных на поддержку деятельности операторов, то тип сервисных роботов по ряду критериев выглядит более широким в сравнении с коллаборативными роботами. Отличительный признак – к ним не выдвигается требование контактного взаимодействия с человеком в реальном физическом окружении, как это имеет место с коллаборативными роботами. При этом у обоих типов сохраняется общность с социальными роботами в отношении требований максимально возможного сохранения естественных форм (как правило, многомодального) интерфейса с пользователем.

В литературе встречаются варианты трактовки социальных роботов с расширенным функционалом ассистивных функций поддержки жизнедеятельности человека, что сближает их с типом сервисных роботов, однако значительно большее их сходство прослеживается с коллаборативными роботами.

Дальнейшее изложение подчинено описанию характеристик сервисных роботов в аспектах роботизированной поддержки космонавтов на обитаемой лунной станции.

В отношении понятия «зоны взаимодействия» робота и человека можно выделить четыре вложенных пространства [5]:

1) максимальное – полный объем пространства с учетом объема деталей, который максимально может быть использован роботом;

2) запретное – часть максимального пространства, доступ к которому для человека ограничен при работе робота;

3) пространство операций – часть запретного пространства, которую робот использует для совершения действий;

4) коллаборативное пространство – часть пространства операций, предназначенное для безопасной совместной деятельности человека и робота.

Как отмечалось выше, по отношению к сервисным роботам, в отличие от коллаборативных (и социальных), не всегда предъявляются жесткие требования работать с людьми в одном рабочем пространстве, так как они могут функционировать автономно или управляться дистанционно в виртуальном пространстве [6].

В то же время понятие коллаборативный робот предполагает его интерактивную совместную работу с человеком в едином рабочем пространстве. По этой причине для реализации принципов человеко-машинного взаимодействия применительно к коллаборативным роботам выдвигается требование повышенных мер безопасности из-за опасности непредусмотренного контактного взаимодействия человека с роботами во время совместной работы.

Для сервисных автономных мобильных роботов понятие безопасного перемещения является более сложным по внутреннему содержанию и реализуется посредством многоуровневой системы планирования и управления, в частности, предварительного планирования и составления продуманного расписания с разнесением активности роботов во времени и пространстве.

Безопасное взаимодействие человека и робота в едином рабочем пространстве в настоящее время рассматривается в следующих аспектах [7]:

– пассивная безопасность применительно к коллаборативным роботам, для которых существует вероятность столкновений, должна быть обеспечена таким образом, чтобы столкновения между роботами, людьми и препятствиями были «контролируемыми», имея в виду достаточно жесткие ограничения сил/воздействий, оказываемых на людей;

– активная безопасность для своевременного обнаружения неизбежных столкновений между активными агентами посредством контролируемого прекращения эксплуатации, что может обеспечиваться использованием датчиков приближения, построением системы наблюдения и предупреждения столкновений (увода) и др.;

– адаптивная безопасность для вмешательства в работу аппаратного оборудования и применения корректирующих действий, приводящих к предотвращению столкновений без остановки работы устройства.

Последняя из перечисленных позиций требует обеспечения высокого уровня ситуационной осведомленности, что обуславливает повышенное внимание к способам визуализации текущей обстановки.

Взаимодействие человека и робота с точки зрения особенностей разделения функций при выполнении операций и организации самого рабочего процесса можно разбить на следующие виды [8, 9]:

- сосуществование;
- кооперация;
- коллаборация.

Применительно к взаимодействию человека с группой АМР, на наш взгляд, наиболее пригодно определение этого типа взаимодействия, как «кооперация».

В представленном разделении видов взаимодействий существенную роль играет фактор времени, в течение которого человек и робот взаимодействуют в рабочем пространстве. Если существует общее время пребывания в едином рабочем пространстве, то данное взаимодействие определяется как «сосуществование».

В работе [10] предложен дополнительный признак взаимодействий – автономность участников совместных работ. Содержание такого типа взаимодействия раскрыто в работе [11]. Для сервисных роботов этот отличительный признак чрезвычайно важен, так как именно способность автономно решать в интересах человека ряд достаточно простых, рутинных, но затратных по времени задач дает ощутимый выигрыш по времени исполнения и общей стоимости рабочего времени квалифицированного специалиста, высвобождая его для более значимых работ.

2.2. Направления внедрения сервисных роботов на лунной базе и потенциально полезные сферы их использования

Определение потенциальных сфер применения сервисных роботов согласно работе [4] исходит из следующих предположений.

Во-первых, необходимо определить инженерно-психологические принципы и свод эксплуатационных правил использования группы сервисных роботов как инструментария нового типа. Проектирование совместной деятельности группы работников, использующих нескольких роботов с позиций эргономического подхода к анализу функционирования сложных систем «человек – техника – среда», связано с новыми постановками задач автоматического управления, ориентирования в пространстве, идентификации объектов в среде и др.

Во-вторых, оценивая потенциал применения новых средств труда космонавта, надо отчетливо понимать, какие стороны деятельности человека они могут компенсировать, не исключая при этом самого человека на этапах подготовки и принятия решений, а, напротив, повышая значимость активного контроля среды с помощью сложных робототехнических изделий, функционирующих в замкнутой среде под контролем со стороны человека. В данном случае речь идет о космическом экипаже, выполняющем задачи мониторинга функционирования оборудования обитаемого объекта (лунной станции) без оперативной поддержки наземными службами. В перспективе сервисные роботы для внутрикорабельной деятельности (ВнуКД) потенциально могут выполнять широкий спектр задач, включая проверку систем,

мониторинг состояния рабочей среды, логистику и укладку расходных материалов, тестирование приборов, а также научные измерения и операции.

В-третьих, в указанной ситуации могут оказаться продуктивными идеи ассистивных технологий. Это означает придание сервисным роботам способности к адаптации под информационные потребности человека и использование наиболее рациональных способов взаимодействия. Состав технологий поддержки диалога и характер контента для информирования пользователя имеют принципиально важное значение не только по удобству, но и по надежности и оперативности в сложных ситуациях экстренного принятия решений.

Особо можно выделить функцию оповещения членов экипажа о возможных предпосылках к нештатным ситуациям (НшС) во время ВнуКД. Эта функция реализуется при возникновении пожара, задымлении, разгерметизации, резком снижении или повышении температуры в отсеках (за пределами нормативных и/или комфортных для человека значений) [12].

При развитии на станции НшС может возникать необходимость документирования проводимых экипажем работ посредством видеосъемки, записи звуковой обстановки, переговоров членов экипажа, когда нужны достоверные материалы о выполненных работах с помощью сервисного робота.

3. Прототипы роботов для мониторинга обстановки и внутреннего контроля помещений и успешные примеры применения летающих роботов

3.1. Мотивация изучения функционала малых летающих беспилотных аппаратов при решении человеком задач мониторинга замкнутой среды

В роли сервисных роботов могут выступать мобильные роботы разного базирования – на колесной тяге, шагающие роботы и летающие (воздушные) роботы – беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

В последнее десятилетие наблюдается рост интереса к летающим реактивным роботам, примером которых может служить реактивный ранец космонавта [13].

К вариантам применения малоразмерных роботов для поддержки ВнуКД можно отнести примеры летающих роботов *Astrobee* НАСА и их предшественников [14–19].

Во внешней среде широко применяются все типы мобильных роботов, в то время как для замкнутых сред обсуждение целесообразности применения БПЛА встречается в значительно меньшем числе источников. Сегодня опубликованные работы в большей мере относятся к проблемам разведки и инспекции мало изученных, потенциально опасных для человека замкнутых сред. Именно этот тип роботов, на наш взгляд, представляет интерес применительно к мониторингу рабочей среды на обитаемой лунной базе.

Как правило, БПЛА в своем стандартном оснащении могут транслировать видео в реальном времени и делать фотографии, полученные с разных точек наблюдения, и это часто является решающим аргументом для выбора типа мобильного робота для инспекции внутри зданий. Для решения специальных задач дистанционной диагностики состояния оборудования и даже состояния человека может потребоваться размещение на борту летающего робота дополнительных датчиков и сенсоров [20].

3.2. Роль систем локальной навигации и позиционирования реального времени в способности безопасного перемещения сервисных роботов в замкнутой среде

Изучение особенностей дистанционного взаимодействия человека и группы сервисных автономных роботов приводит к выявлению еще одного важного отличительного признака – способности роботов к ориентировке в пространстве и адаптации к рабочей среде в отношении безопасного перемещения в сложном герметически замкнутом объеме с минимальным риском коллизий (при относительно невысоких скоростях и ускорениях движения). Для этого применяются различные системы навигации и позиционирования. Пространство внутри замкнутых помещений обычно имеет относительно небольшие объемы. Для позиционирования и навигации АМР используют различные средства: триангуляция, навигация по различным меткам (QR-коды с указанием последующих команд для робота, сигнальные линии по ходу движения, метки на стенах для коррекции местоположения), SLAM-навигация (Simultaneous Localization And Mapping [одновременная локализация и построение карты англ.]), а также их комбинации.

Перечисленные методы навигации имеют свои преимущества и недостатки. Считается, что метод SLAM-навигации является наиболее перспективным, поскольку может использоваться и для создания электронной карты, и для последующего ее использования. Для работы в режиме SLAM-навигации требуются различные дополнительные источники данных, и поэтому этот метод обычно применяется в комбинации с другими, вспомогательными [21–26].

Использование технологий локальной навигации и позиционирования составляет важную отличительную характеристику АМР, что нашло отражение в публикациях [27–29]. За последнее время в этой области получено много новых практических решений: в первую очередь речь идет о динамической навигации и о применении для навигации в масштабе реального времени технологий компьютерного зрения. Это вызвано возросшими требованиями к адаптивным возможностям мобильных роботов в изменяющейся среде. В частности, от сервисных роботов требуется самостоятельно переопределять маршрут в меняющихся условиях и при этом не только избегать столкновений с движущимися объектами, используя сонары и набор датчиков глубины, но и распознавать объекты в составе сложных сцен.

Применение технологии компьютерного зрения позволяет выполнить 3D-реконструкцию окружающего пространства и положения в ней мобильных объектов, тем самым у оператора появляется возможность оперативно контролировать ход мониторинга среды и задавать роботам сложные сценарии поведения. Что касается типового оснащения инструментальными средствами для сбора данных, то в первую очередь речь идет о визуально доступной информации. Это предполагает возможность отображения оператору видеопотока с видеокамер робота в разном разрешении и с разных ракурсов. Получение видеоизображения с нескольких точек наблюдения может существенно улучшить для человека условия наблюдения и контроля рабочей среды.

4. Выводы

В статье рассматриваются вопросы расширения пользовательского опыта взаимодействия космонавтов с интеллектуальными агентами в виртуальной среде деятельности на принципах человеко-ориентированного распределения функций. Настоящее исследование выполнено в предположении о таком распределении функций участников смешанной команды «экипаж – группа мобильных роботов», которое позволяет снизить рабочую нагрузку на космонавтов по выполнению рутинных операций периодического и внепланового контроля состояния оборудования, но при этом сохранить за человеком выбор путей эффективного использования ресурсов и технических возможностей роботов по мониторингу состояния рабочей среды.

Этот принцип человеко-ориентированного распределения ролей в смешанных командах роботизированных систем может лежать в основе реализации стратегии на упреждающее прогнозирование отказов для предотвращения нештатных ситуаций в автономных пилотируемых полетах [2]. Следует подчеркнуть, что вопросы скоординированного функционирования «смешанных» или «объединенных» команд людей и роботов в условиях герметически замкнутой среды обитания изучены недостаточно. В свете перспективных проектов лунных миссий вопрос о том, может ли кооперация экипажа космонавтов и группы мобильных роботов на должном уровне обеспечить реализацию технического контроля и обслуживания сложного комплекса оборудования на лунной станции, приобретает особую актуальность. Наиболее естественный путь проектирования такого распределения – построение виртуальной среды и отработка разных способов управления группой мобильных роботов. Одной из составляющих надежной работы членов экипажа (при поддержке сервисными роботами) является накопление пользовательского опыта в условиях виртуального прототипирования роботизированной системы с участием экипажа и группы АМР. Применение виртуальной среды, отражающей ключевые особенности взаимодействия человека и мобильных роботов, может создать благоприятные условия для развития способностей

принятия решений у космонавтов на ранних стадиях проектирования, учитывая высокие требования к безопасности испытаний новой космической техники в условиях перспективных лунных миссий [3].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Р.Р. Галин, В.В. Серебряный, Г.К. Тевяшов, А.А. Широкий // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – № 24(4). – С. 180–199. – DOI: 10.21869/222315602020244180199
- [2] Виртуальные среды обучения в задачах освоения Луны с помощью роботов / С.Ф. Сергеев, М.М. Харламов, Б.И. Крючков [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – № 3. – С. 165–174. – DOI: 10.31776/RTSJ.8301
- [3] Михайлюк, М.В. Виртуальное моделирование интерактивного взаимодействия человека с мобильными роботами в проектах освоения Луны / М.В. Михайлюк, Б.И. Крючков, В.М. Усов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7. – № 2. – С. 119–124. – DOI: 10.31776/RTSJ.7205
- [4] Крючков, Б.И. Перспективные подходы к применению сервисных роботов в области пилотируемой космонавтики / Б.И. Крючков, А.А. Карпов, В.М. Усов // Труды СПИИРАН, 2014. – № 32. – С. 125–151.
- [5] Collaborative Robots / M. Mihelj [et al.] // In: Robotics. – Springer, Cham, 2019. – P. 173–187. – DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12
- [6] Paluch, S. Service Robots and the Future of Services / S. Paluch, J. Wirtz, W.H. Kunz // Marketing Weiterdenken. – 2020. – P. 424–434. – DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4
- [7] Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces / G. Michalos [et al.] // Procedia CIRP. – 2015. – No 37. – P. 248–253. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014
- [8] Human Centered Assistance Applications for the Working Environment of the Future / A. Schmidler [et al.] // Occupational Ergonomics. – 2015. – No 12(3). – P. 83–95.
- [9] Hoffman, G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // IEEE Transactions on Human-Machine Systems. – 2019. – P. 1–10. – DOI:10.1109/THMS.2019.2904558
- [10] Human–robot Collaborative Assembly in Cyber-Physical Production: Classification Framework and Implementation / X.V. Wang [et al.] // CIRP Annals. – 2017. – No 66(1). – P. 5–8. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101
- [11] Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем / В.М. Лохин, С.В. Манько, Р.И. Александрова [и др.] // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2016. – № 17(9). – С. 606–614. – DOI: 10.17587/mau.17.606-614
- [12] Компьютерное моделирование жизнеугрожающих ситуаций и проведения аварийно-спасательных, медицинских и эвакуационных мероприятий на лунной базе / А.В. Поляков, В.М. Усов, Б.И. Крючков [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2019. – Т. 53. – № 3. – С. 13–19. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-13-19
- [13] Использование в изоляционных экспериментах технологий виртуальной и дополненной реальности для моделирования выходов в открытый космос без страховочного фала / Ю.А. Бубеев, В.М. Усов, Б.И. Крючков [и др.] // Авиакос-

- мическая и экологическая медицина. – 2021. – Т. 55. – № 2. – С. 15–28. – DOI: 10.21687/0233-528X-2020-55-2-15-28
- [14] Smart SPHERES: a Telerobotic Free-Flyer for Intravehicular Activities in Space / T. Fong, M. Micire, T. Morse [et al.] // In AIAA Space 2013 Conference and Exposition (September 10–12, 2013), San Diego, CA. – P. 5338–5352. – DOI: 10.2514/6.2013-5338
- [15] Astrobees: A New Platform for Free-Flying Robotics Research on the International Space Station / T. Smith, J. Barlow, M. Bualat [et al.] // Conference: Proc. Int. Symp. on AI, Robotics, and Automation in Space (iSAIRAS), 2016. – URL: <https://ti.arc.nasa.gov/publications/31584/download/> (accessed 2021/09/23).
- [16] Astrobees: A New Tool for ISS Operations / M. Bualat, T. Smith, T. Fong [et al.] // In Proc. SpaceOps (AIAA 2018–2517), 2018. – URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bualat_spaceops_2018_paper.pdf (accessed 2021/09/23).
- [17] Astrobees Robot Software: Enabling Mobile Autonomy on the ISS / L. Fluckiger, K. Browne, Coltin B. Brian [et al.]. – URL: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fluckiger2018astrobees.pdf> (accessed 2021/09/23).
- [18] Hambuchen, K. A Review of NASA Human-Robot Interaction in Space / K. Hambuchen, J. Marquez, T. Fong // Current Robotics Reports. – 2021. – No 2. – P. 265–272. – DOI: 10.1007/s43154-021-00062-5
- [19] Szafrir, D. Designing Planning and Control Interfaces to Support User Collaboration with Flying Robots / D. Szafrir, M. Bilge, T. Fong // The International Journal of Robotics Research. – 2017. – No 36. – P. 514–542. – DOI: 10.1177/0278364916688256
- [20] Лашкова, И.Б. Исследование и разработка подхода к построению интеллектуального мобильного сервиса для автоматизированной поддержки водителя транспортного средства / И.Б. Лашкова, А.В. Смирнова, А.М. Кашевник // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15 – № 6. – С. 1130–1138.
- [21] Khruahong, S. Develop the Framework Conception for Hybrid Indoor Navigation for Monitoring inside Building using Quadcopter / S. Khruahong, O. Surinta // In: Conference: 2019 14th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP), 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/iSAI-NLP48611.2019.9045445
- [22] Research on Visual Autonomous Navigation Indoor for Unmanned Aerial Vehicle / Y. Zhang, Q. Lü, H. Lin [et al.] // J. Shanghai Jiaotong Univ (Science). – 2017. – No 22. – 252–256. – DOI: 10.1007/s12204-017-1829-1
- [23] Labbé, M. RTAB Map as an Open Source Lidar and Visual Simultaneous Localization and Mapping Library for Large Scale and Long Term Online Operation / M. Labbé, F. Michaud // Journal of Field Robotics. – 2019. – No 36. – P. 416–446. – DOI: 10.1002/rob.21831
- [24] Glibin, E. Method of Mobile Robot Indoor Navigation by Artificial Landmarks with use of Computer Vision / E. Glibin, A. Shevtsov, O. Enik // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032171
- [25] Navigation Algorithm for Autonomous Mobile Robots in Indoor Environments / F. Khan, A. Alakberi [et al.] // Conference: 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2018. – DOI: 10.1109/ICASET.2018.8376834

- [26] Yasuda, Yu. Autonomous Visual Navigation for Mobile Robots: A Systematic Literature Review / Yu. Yasuda, L. Martins, F. Cappabianco // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. – 2020. – No 53. – P. 134. – DOI: 10.1145/3368961
- [27] Позиционирование мобильного робота-помощника во внутреннем рабочем пространстве на пилотируемых космических комплексах / Б.И. Крючков, В.П. Дашевский, Б.В. Соколов [и др.] // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2014. – № 4(13). – С. 40–56.
- [28] Kirov, D. A Methodology for Design Space Exploration of Real-Time Location Systems / D. Kirov, R. Passerone, A.A. Ozhiganov // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2015. – No 15. – P. 551–567. – DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-551-567 (In Rus.).
- [29] Михайлов, Б.Б. Автономные мобильные роботы навигация и управление / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2016. – № 2 (175). – С. 48–67.

REFERENCES

- [1] Human-Robot Interaction in Collaborative Robotic Systems / R.R. Galin, V.V. Serebrennyy, G.K. Tevyashov, A.A. Shirokiy // *Proceedings of the South-Western State University*. – 2020. – No 4(4). – P. 180–199. – DOI:10.21869/222315602020244180199
- [2] Virtual Learning Environment in the Tasks of Lunar Exploration Using Robots / S.F. Sergeev, M.M. Kharlamov, B.I. Kryuchkov [et al.] // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2020. – Vol. 8. – No 3. – P. 165–174. – DOI: 10.31776/RTCJ.8301
- [3] Mikhailyuk, M.V. Virtual Simulation of Human-Mobile Robots Interaction in the Moon Exploration Projects / M.V. Mikhailyuk, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov // *Robotics and Technical Cybernetics*. – 2019. – Vol. 7. – No 2. – P. 119–124. – DOI: 10.31776/RTCJ.7205
- [4] Kryuchkov, B.I. Promising Approaches to the Use of Service Robots in Manned Cosmonautics / B.I. Kryuchkov, A.A. Karpov, V.M. Usov // *Tr. SPIIRAN*, 2014. – No 32. – P. 125–151.
- [5] Collaborative Robots / M. Mihelj [et al.]. // In: *Robotics*. – Springer, Cham, 2019. – P. 173–187. – DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12
- [6] Paluch, S. Service Robots and the Future of Services / S. Paluch, J. Wirtz, W.H. Kunz // *Marketing Weiterdenken*. – 2020. – P. 424–434. – DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4
- [7] Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces / G. Michalos [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2015. – No 37. – P. 248–253. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014
- [8] Human Centered Assistance Applications for the Working Environment of the Future / A. Schmidtler [et al.] // *Occupational Ergonomics*. – 2015. – No 12(3). – P. 83–95.
- [9] Hoffman, G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. – 2019. – P. 1–10. – DOI:10.1109/THMS.2019.2904558
- [10] Human–robot Collaborative Assembly in Cyber-Physical Production: Classification Framework and Implementation / X.V. Wang [et al.] // *CIRP Annals*. – 2017. – No 66(1). – P. 5–8. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101
- [11] Construction Principles and Software-and-Algorithmic Support of the Human-Machine Interface for Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Systems /

- V.M. Lokhin, S.V. Manko, R.I. Aleksandrova [et al.] // *Mechatronics, Automation, Control*. – 2016. – No 7(9). – P. 606–614. – DOI: 10.17587/mau.17.606-614
- [12] Computer Simulation of Life-Threatening Situations and Rescue, Medical and Evacuation Operations at a Lunar Base / A.V. Polyakov, V.M. Usov, B.I. Kryuchkov [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2019. – Vol. 53. – No 3. – P. 13–19. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-3-13-19
- [13] The Use of Virtual and Augmented Reality Technologies in Isolation Experiments to Simulate Spacewalks Without a Safety Tether / Yu.A. Bubeev, V.M. Usov, B.I. Kryuchkov [et al.] // *Aerospace and Ecological Medicine*. – 2021. – T. 55. – No 2. – P. 15–28. – DOI: 10.21687/0233-528X-2020-55-2-15-28
- [14] Smart SPHERES: a Telerobotic Free-Flyer for Intravehicular Activities in Space / T. Fong, M. Micire, T. Morse [et al.] // *In AIAA Space 2013 Conference and Exposition (September 1012, 2013), San Diego, CA*. – P. 5338–5352. – DOI: 10.2514/6.2013-5338
- [15] Astrobees: A New Platform for Free-Flying Robotics Research on the International Space Station / T. Smith, J. Barlow, M. Bualat [et al.] // *Conference: Proc. Int. Symp. on AI, Robotics, and Automation in Space (iSAIRAS), 2016*. – URL: <https://ti.arc.nasa.gov/publications/31584/download/> (accessed 2021/09/23).
- [16] Astrobees: A New Tool for ISS Operations / M. Bualat, T. Smith, T. Fong [et al.] // *In Proc. SpaceOps (AIAA 2018–2517), 2018*. – URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bualat_spaceops_2018_paper.pdf (accessed 2021/09/23).
- [17] Astrobees Robot Software: Enabling Mobile Autonomy on the ISS / L. Fluckiger, K. Browne, Coltin B. Brian [et al.]. URL: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fluckiger2018astrobees.pdf> (accessed 2021/09/23).
- [18] Hambuchen, K. A. Review of NASA Human-Robot Interaction in Space / K. Hambuchen, J. Marquez, T. Fong // *Current Robotics Reports*. – 2021. – No 2. – P. 265–272. – DOI: 10.1007/s43154-021-00062-5
- [19] Szafir, D. Designing Planning and Control Interfaces to Support User Collaboration with Flying Robots / D. Szafir, M. Bilge, T. Fong // *The International Journal of Robotics Research*. – 2017. – No 36. – P. 514–542. – DOI: 10.1177/0278364916688256
- [20] Lashkova, I.B. The Study and Development of an Approach to Making an Intelligent Mobile Service for an Automated Support of a Vehicle Driver / I.B. Lashkova, A.V. Smirnova, A.M. Kashevnik // *Scientific-and-technical Bulletin Of Information Technology, Mechanics And Optics*. – 2015. – Vol. 15 – No 6. – P. 1130–1138.
- [21] Khruahong, S. Develop the Framework Conception for Hybrid Indoor Navigation for Monitoring inside Building using Quadcopter / S. Khruahong, O. Surinta // *In: Conference: 2019 14th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP), 2019*. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/iSAI-NLP48611.2019.9045445
- [22] Research on Visual Autonomous Navigation Indoor for Unmanned Aerial Vehicle / Y. Zhang, Q. Lü, H. Lin [et al.] // *J. Shanghai Jiaotong Univ (Science)*. – 2017. – No 22. – P. 252–256. – DOI: 10.1007/s12204-017-1829-1
- [23] Labbé, M. RTAB Map as an Open Source Lidar and Visual Simultaneous Localization and Mapping Library for Large Scale and Long Term Online Operation / M. Labbé, F. Michaud // *Journal of Field Robotics*. – 2019. – No 36. – P. 416–446. – DOI: 10.1002/rob.21831

- [24] Glibin, E. Method of Mobile Robot Indoor Navigation by Artificial Landmarks with Use of Computer Vision / E. Glibin, A. Shevtsov, O. Enik // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/ 032171
- [25] Navigation Algorithm for Autonomous Mobile Robots in Indoor Environments / F. Khan, A. Alakberi [et al.] // Conference: 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2018. – DOI: 10.1109/ICASET.2018.8376834
- [26] Yasuda, Yu. Autonomous Visual Navigation for Mobile Robots: A Systematic Literature Review / Yu. Yasuda, L. Martins, F. Cappabianco // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2020. – No 53. – 134. – DOI: 10.1145/3368961
- [27] Positioning of a Mobile Assistant Robot in an Internal Workspace on Manned Space Complexes / B.I. Kryuchkov, V.P. Dashevsky, B.V. Sokolov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2014. – No 4(13). – P. 40–56.
- [28] Kirov, D. A Methodology for Design Space Exploration of Real-Time Location Systems / D. Kirov, R. Passerone, A.A. Ozhiganov // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2015. – No 15. – P. 551–567. – DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-551-567 (In Rus.).
- [29] Mikhailov, B.B. Autonomous Mobile Robots – Navigation and Control / B.B. Mikhailov, A.V. Nazarova, A.S. Yushchenko // Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2016. – No 2 (175). – P. 48–67.