

УДК 004.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.34.3.027](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.027)

Критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса гетерогенной группы сельскохозяйственных роботов

А.И. Мотиенко¹, И.В. Ватаманюк¹, А.И. Савельев¹, Х.М. Гузей², О. Йокиш³

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Эрзурумский Технический Университет, Эрзурум, Турция

³ Университет телекоммуникаций Лейпцига, Лейпциг, Германия

Резюме. В статье рассматриваются существующие решения в области человеко-машинных интерфейсов для обеспечения группового взаимодействия наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов при выполнении задач сельского хозяйства и точечного земледелия. На примере сценария автоматизированного точечного внесения удобрений на плантации колоновидных яблонь рассмотрены различные аспекты взаимодействия гетерогенных сельскохозяйственных роботов, а именно беспилотных летательных аппаратов и наземных мобильных платформ. Определены критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса для постановки и выполнения групповых задач сельскохозяйственной робототехники. Выделены наиболее эффективные из них: среднее время, необходимое пользователю для решения задачи по методике KLM-GOMS, оценка сложности системы по методике Т. Комбера и Дж. Мэлтби, правильность выполнения задачи, частота успешного выполнения задачи, время выполнения задачи, степень осведомленности о ситуации, количество управляющих действий, точность диагностики ситуации, время обнаружения и диагностики ситуации, поведение контролируемого технологического параметра, рабочая нагрузка, функциональное состояние оператора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке стратегий совместной деятельности гетерогенных сельскохозяйственных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов.

Ключевые слова: сельскохозяйственные роботы, БПЛА, человеко-машинный интерфейс, критерии оценки качества, групповое взаимодействие роботов, точечное земледелие.

Для цитирования: Мотиенко А.И., Ватаманюк И.В., Савельев А.И., Гузей Х.М., Йокиш О. Критерии оценки качества человеко-машинного интерфейса гетерогенной группы сельскохозяйственных роботов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1052> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.027

Criteria for assessing quality of human-machine interface in a heterogeneous group of agricultural robots

A.I. Motienko¹, I.V. Vatamaniuk¹, A.I. Saveliev¹, H.M. Guzey², O. Jokisch³

¹St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

²Erzurum Technical University, Erzurum, Turkey

³Leipzig University of Telecommunications, Leipzig, Germany

Abstract: The paper discusses existing solutions in the field of human-machine interfaces to ensure group interaction of ground robots and unmanned aerial vehicles when performing tasks in agriculture and spot farming. Various aspects of heterogeneous agricultural robots' interaction, namely, unmanned aerial vehicles and ground mobile platforms, are considered using the example of the automated point

fertilization scenario on plantations of columnar apple trees. The criteria for assessing the quality of the human-machine interface for the formulation and implementation of agricultural robotics group tasks are determined. The most effective of them are highlighted: the average time required for a user to solve a problem using the KLM-GOMS method, an assessment of the system complexity by the method of T. Comber and J. Maltby, the correctness of the task, the frequency of successful completion of the task, the time it takes to complete the task, the degree of situation awareness, the number of control actions, the accuracy of the situation diagnosis, the time of detection and the situation diagnosis, the behavior of the controlled technological parameter, the workload, the functional state of the operator. The results obtained can be used to develop strategies for the joint activity of heterogeneous agricultural robots, controlled with the means of intuitive human-machine interfaces.

Keywords: agricultural robots, UAV, human-machine interface, quality assessment criteria, group interaction of robots, spot farming.

For citation: Motienko A.I., Vatamaniuk I.V., Saveliev A.I., Guzey H.M., Jokisch O. Criteria for assessing quality of human-machine interface of a heterogeneous group of agricultural robots. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1052> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.027 (In Russ).

Введение

Внедрение робототехники в сельскохозяйственную отрасль во многом обусловлено социальноэкономическими и экологическими факторами. Роботы используются в различных областях сельского хозяйства: полевые работы, животноводство, производство и сбор продуктов питания. Часто комплексные и масштабные миссии невозможно выполнить с помощью одного аппарата. В таких случаях применяется группа робототехнических средств (РТС), что позволяет сократить время выполнения задач и расширить функциональность устройств [1].

Организация управления группой автономных РТС является одной из актуальных задач в сфере групповой робототехники. Для ее решения необходимо обеспечить наиболее эффективные, доступные, эргономичные и гибкие средства человеко-машинного взаимодействия и разработать соответствующий человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) для группы автономных сельскохозяйственных РТС с учетом особенностей типов РТС и их назначения, а также определить критерии для непосредственной и косвенной оценки качества разрабатываемого ЧМИ РТС. Целью настоящего исследования является обзор существующих решений в области группового взаимодействия сельскохозяйственных РТС и выделение критериев оценки качества ЧМИ сельскохозяйственных РТС при выполнении групповых задач на примере автоматизированного точечного внесения удобрений на плантации колоновидных яблонь при помощи беспилотных летательных аппаратов и наземных мобильных платформ.

Существующие решения в области ЧМИ сельскохозяйственных РТС

РТС становятся особенно востребованными в мелкомасштабном сельском хозяйстве. Для упрощения создания сложных сценариев человеко-машинного взаимодействия при выполнении сельскохозяйственных задач используются комбинации разных способов взаимодействия человека с РТС. Наиболее популярные ЧМИ в этой области: цифровое приложение с графическим интерфейсом, средства виртуальной реальности, распознавание жестов, голосовые команды [2]. Представленные в работах последних лет ЧМИ сельскохозяйственных роботов различаются по способу взаимодействия оператора с РТС, типу поддерживаемых устройств, их назначению и типу управления устройствами. Рассмотрим некоторые

наиболее характерные примеры ЧМИ для управления сельскохозяйственными РТС, описанные в литературе.

В [3] предложен ЧМИ для взаимодействия с мобильными наземными роботами и БПЛА с использованием технологии виртуальной реальности. В качестве устройств рассматривались разработанный авторами мобильный наземный шестиколесный робот Möggi и квадрокоптер DJI Inspire от компании DJI, специализирующейся на производстве сельскохозяйственных роботов [4]. Управление наземными роботами происходит с использованием интерфейса виртуальной реальности (VR-интерфейса). В качестве VR-системы используется «HTC Vive». Интерфейс позволяет назначать маршруты наземным роботам посредством жестов, получать изображение с камер роботов, управляться с группой роботов одновременно. VR-интерфейс разработан с помощью «Unity 3D» и готовых материалов «SteamVR». Для построения модели местности в пользовательском интерфейсе используются данные CAD («OpenStreetMap») и данные с камер роботов в системе. Полученное изображение с БПЛА и с установленных на беспилотных наземных станциях камер глубины используется для воссоздания трехмерного изображения карты местности вокруг роботов в интерфейсе пользователя. В виртуальном пространстве пользовательского интерфейса на воссозданной карте наземные роботы отображаются в виде цифровых образов. Пользователь может жестом захватить образ устройства и перетащить в нужную позицию на местности, а приложение передаст соответствующую команду на перемещение реальному роботу. Оператор может назначить траекторию следования одному или нескольким устройствам и вызвать виртуальный дисплей с информацией с камер роботов для наблюдения за их работой. Кроме того, пользователь может перейти к наблюдению за конкретным устройством, при этом БПЛА будет следовать за выбранным наземным роботом.

В [5] представлен мобильный четырехколесный робот MARIA (Multipurpose Autonomous Robot of Intelligent Agriculture) с установленным манипулятором для зондирования и фенотипирования почвы. Интерфейс выполнен в виде GUI, который визуализирует URDF-модель робота, его одометрию и текущее положение. Робот движется по заранее заданным оператором целевым точкам. Навигация происходит автономно при помощи операционной системы ROS. Данный ЧМИ является хорошим решением для роботов в случаях, где нужна обратная связь в виде визуализации, а их задачи заранее определены.

В [6] предложен ЧМИ для дистанционного управления группой БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных территорий. Система имеет два уровня управления: дистанционный, когда оператор с помощью тактильного устройства с 3 степенями свободы вводит команды удаленного управления, и уровень, на котором движение каждого БПЛА регулируется распределенным алгоритмом управления группой. На уровне дистанционного управления оператор регулирует желаемую скорость полета, манипулируя тактильным устройством, и одновременно получает тактильную обратную связь. Управление группой состоит из 3 управляющих входов: 1) управление скоростью с помощью команды дистанционного управления, 2) управление группой для получения желаемой формации, 3) управление предотвращением столкновений.

Одним из популярных направлений разработки ЧМИ мультироторных БПЛА является управление полетом посредством жестового управления (оценки поз оператора). Так, авторы [7] разработали интуитивно понятный ЧМИ для управления гексакоптером, осуществляющим мониторинг сельскохозяйственной местности. Интерфейс предполагает управление БПЛА в режиме реального времени через оценку поз оператора посредством камеры, установленной на БПЛА. Оператор может задать направление полета и расстояние БПЛА, при этом для считывания данных человек

должен стоять в заданной позе не менее 5 секунд. Для распознавания позы предлагается метод, основанный на лагранжевых траекториях частиц. Отметим, что данный ЧМИ имеет низкую скорость анализа команд оператора и точность позиционирования БПЛА, а также способен управлять полетом БПЛА только в одном направлении, т. е. нет возможности выполнения сложных маневров.

Следует отметить, что наиболее востребованным и удобным типом ЧМИ для большинства типов РТС является цифровое приложение с графическим интерфейсом. При совместном использовании БПЛА и наземных роботов можно отказаться от присутствия человека на месте проведения операции, а также произвести разведку при помощи БПЛА, а затем использовать собранные данные уже для управления наземным РТС. Если необходимо предусмотреть возможность вмешаться в выполнение задачи роботом, в ЧМИ могут быть предусмотрены функции редактирования сценариев, либо полное вмешательство в работу системы. При необходимости непосредственного наблюдения и контроля за наземными РТС, могут быть использованы ЧМИ на основе жестового управления. Они могут применяться в задачах коллаборативной робототехники [8].

Сценарий использования человеко-машинных интерфейсов сельскохозяйственных роботов

Рассмотрим тестовый сценарий совместной работы наземных РТС и БПЛА на примере автоматизированного точечного внесения удобрений на плантации колоновидных яблонь. Пусть поле длиной L и шириной B содержит K рядов яблонь по N деревьев в каждом ряду. Объем удобрений на одно дерево составляет v . Для каждого дерева на плантации требуется обеспечить внесение удобрений объемом v в почву в радиусе r от ствола дерева. Задача считается выполненной успешно в случае, если удобрено не менее 90 % деревьев на плантации. Предполагается, что площадь плантации превышает площадь, которая может быть обслужена одним РТС.

Пусть имеются следующие РТС:

- группа мобильных наземных робототехнических платформ, оснащенных резервуарами для удобрений, $G1$;
- группа мобильных наземных робототехнических платформ, осуществляющая замену аккумуляторов на БПЛА, $G2$;
- группа БПЛА, оснащенных мультиспектральными камерами, $A1$;
- группа БПЛА, оснащенных манипуляторами для точечного внесения удобрений, $A2$.

Каждый тип робота отвечает за выполнение определенной задачи. Взаимодействие с другими роботами во время выполнения действия позволяет повысить вероятность удачного исхода операции. Так, в рассматриваемом сценарии, в первую очередь, группе $A1$ назначается область, где необходимо провести аэрофотосъемку в инфракрасном спектре для оценки состояния растений на основе индекса NDVI. Также эти данные используются для детектирования препятствий при навигации мобильных робототехнических платформ [9]. $A1$ осуществляет облет необходимой территории, фото- и видеофиксацию данных и возвращается на исходную позицию. Полученные изображения поступают для обработки в единую систему управления (базовую станцию), где принимается решение о необходимости внесения удобрений. Обработанные данные проецируются на координатную сетку, где отмечаются участки, которым необходимо уделить внимание. Группам $G1$, $A2$ назначаются задачи о внесении удобрений в соответствии с полученной картограммой. Схема взаимодействия групп РТС представлена на Рисунке 1.

РТС G1 в данном сценарии выполняют роль заправочной станции для A2. В случае больших территорий к выполнению задачи привлекаются также станции G2 для замены аккумуляторов БПЛА.

Наземное РТС и четыре БПЛА отправляются на задание с уже наполненным баком удобрений. Два БПЛА предназначены для внесения удобрений, два – для контроля. Платформа движется между двух рядов, в то время как БПЛА удобряют деревья. БПЛА способен удобрить за один полет x_n деревьев, $n=1, N$. За время пока он осуществляет эту операцию, наземное РТС продвигается вдоль ряда к дереву x_{n+1} . Далее БПЛА пополняет запас удобрений и при необходимости производит замену аккумуляторов следующим образом: на определенном (низком) уровне заряда (с учетом времени движения до станции замены аккумуляторов) БПЛА направляется к РТС для смены. Через время t после начала миссии к рабочей области направляются еще два БПЛА с целью фиксации выполненных работ. Работа считается выполненной, если удобрение внесено в границах окружности радиусом r вокруг ствола.

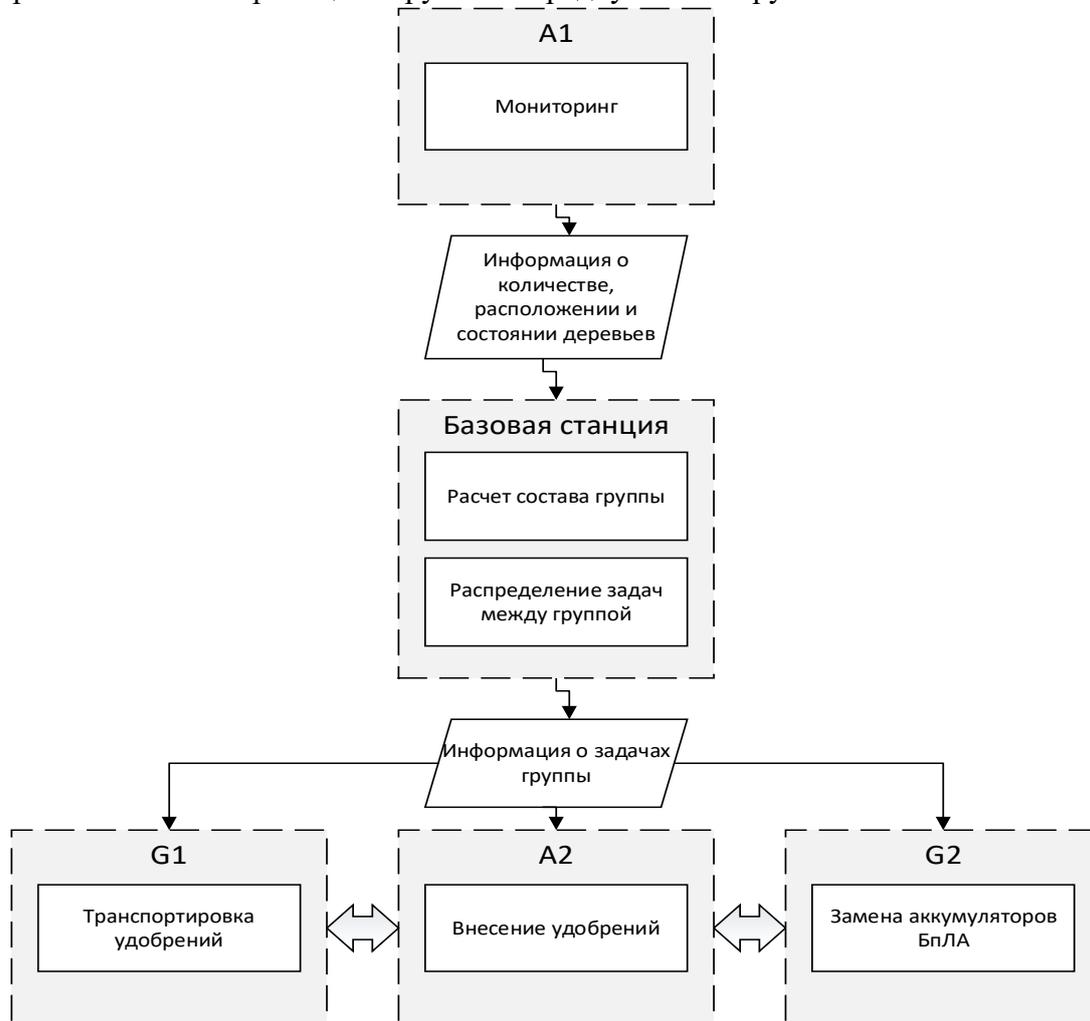


Рисунок 1 – Взаимодействие групп РТС при выполнении задачи удобрения колоновидных яблонь

Figure 1. Interaction of groups of robots when performing the task of fertilizing columnar apple trees

В процессе выполнения задачи БПЛА информирует систему о степени ее выполнения и текущем состоянии своих систем. После завершения задачи БПЛА возвращаются на исходные позиции или получают новые задачи. Поставленная БПЛА задача считается выполненной при условии, что был пройден весь сформированный

маршрут и проведены работы на нем. В любых других случаях БПЛА сообщает системе о возникших проблемах, что позволяет оператору принять решение по их устранению. Критерием эффективности в данном сценарии будет количество удобренных деревьев в соответствии с полученной на первом этапе картограммой.

РТС G2, используемое в качестве базовой станции, располагается в центре поля в статичном положении на протяжении всего задания. При низком уровне заряда БПЛА направляются к нему для замены аккумуляторов, а затем возвращаются в место, где прервали сбор плодов.

Реализация сценариев осуществляется полностью в автоматическом режиме. Вмешательство оператора в ход миссии возможно в случае возникновения нештатных ситуаций удаленно с помощью ЧМИ. Оператор может взять управление под свой контроль или программно проверить состояние системы аппарата и внести необходимые корректировки.

Критерии оценки качества ЧМИ сельскохозяйственных роботов при выполнении совместных задач

Несмотря на обилие и существенный технический прогресс средств построения различных интерфейсов, таких как регистраторы движений человека, манипуляторы, робототехнические средства, задача оценки качества функционирования ЧМИ остается слабо формализуемой и зачастую решается приближенными методами, поскольку сильно зависит от субъективных факторов. Чтобы ЧМИ был востребован, он должен выполнять не только свои прямые функции, но и быть удобным и интуитивно понятным в использовании. Таким образом, проблема оценки качества ЧМИ на сегодняшний день остается открытой.

Отталкиваясь от рассмотренного выше сценария, введем следующие требования оценки качества ЧМИ сельскохозяйственных роботов. Разрабатываемый ЧМИ для сельскохозяйственного комплекса РТС, описанного выше, должен обеспечивать: 1) полноту и достоверность информации обо всех РТС, входящих в G1, G2, A1, A2, которую получит оператор; 2) возможность гибкой настройки миссии с учетом всех особенностей выполнения рассмотренного сценария; 3) анализ хода выполнения миссии на основании данных телеметрии РТС с учетом заложенного критерия эффективности выполнения сценария; 4) возможность планирования, ввода, корректировки и анализа маршрута движения и действий всех РТС; 5) возможность ввода альтернативных и аварийных маршрутов движения и действий РТС в случае непредвиденных обстоятельств. Для соблюдения этих требований при разработке возможных вариантов ЧМИ необходимо определение соответствующих критериев оценки качества ЧМИ.

Рассмотрим также некоторые общепринятые критерии оценки качества ЧМИ, которые можно применить к описанной задаче. Среди наиболее популярных в литературе и используемых на практике способов оценки качества интерфейса можно выделить следующие: анкетирование пользователей, экспериментальная проверка системы пользователями, экспертная оценка, определение среднего времени, необходимого пользователю по методике GOMS, KLM-GOMS, оценка качества интерфейса на основе методики оценки сложности системы Т. Комбера и Дж. Мэлтби, метод эвристической оценки с участием потенциальных операторов [10-15]. Среди наиболее эффективных инструментов оценки качества интерфейсов можно выделить следующие:

– определение времени выполнения заданий опытными пользователями для различных вариантов решения поставленной задачи по методике KLM-GOMS;

– оценка качества интерфейса на основе методики оценки сложности системы Т. Комбера и Дж. Мэлтби. Метод позволяет получить количественную оценку сложности рассматриваемой системы.

– анкетирование операторов и экспертов во время тестирования ЧМИ по ряду параметров: функциональность, гибкость, защищенность, доступность, комфортность взаимодействия с системой.

Существуют также дополнительные количественные меры прямой и косвенной оценки ЧМИ, основывающиеся на оценке выполняемой задачи (Таблица 1).

Таблица 1 – Показатели для прямой и косвенной эмпирической оценки качества ЧМИ
Table 1 - Indicators for direct and indirect empirical assessment of the quality of HMI

Фактор	Критерий
Эффективность управления	Правильность выполнения задачи
	Частота успешного выполнения задачи
Качество управления	Время выполнения задачи
	Степень осведомленности о ситуации
	Количество управляющих действий
	Точность диагностики ситуации
	Время обнаружения и диагностики ситуации
	Поведение контролируемого технологического параметра
Рабочие условия	Рабочая нагрузка
	Функциональное состояние оператора

Эти показатели могут использоваться для косвенной оценки качества интерфейса, однако их применение в существенной мере зависит от характера регулируемого процесса, ситуации, опыта оператора и ряда других факторов. Их рассмотрение на этапе разработки позволяет сформировать требования к техническому облику проектируемого ЧМИ на основе рассмотренного сценария использования сельскохозяйственных РТС.

Заключение

Задачи точечного земледелия характеризуются высокой степенью вариативности и бросают вызов современной робототехнике. Каждый сценарий может быть рассмотрен как отдельная модель взаимодействия робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач. При этом ЧМИ подобного комплекса должен обеспечивать возможность задания и гибкой настройки миссии, а также получения оператором своевременной обратной связи о состоянии каждого входящего в комплекс РТС. На основе рассмотренного сценария автоматизированного точечного внесения удобрений на плантации колоновидных яблонь определены критерии для непосредственной и косвенной оценки качества ЧМИ РТС и выделены наиболее эффективные из них: среднее время, необходимое пользователю для решения задачи по методике KLM-GOMS, оценка сложности системы по методике Т. Комбера и Дж. Мэлтби, правильность выполнения задачи, частота успешного выполнения задачи, время выполнения задачи, степень осведомленности о ситуации, количество управляющих действий, точность диагностики ситуации, время обнаружения и диагностики ситуации, поведение контролируемого технологического параметра, рабочая нагрузка, функциональное состояние оператора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке стратегий совместной деятельности гетерогенных сельскохозяйственных роботов,

контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-58-76001 ЭРА_a).

Acknowledgements

This research is supported by RFBR (project № 18-58-76001 ЭРА_a).

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой. *Труды СПИИРАН*. 2018;2(57):134–160. DOI: 10.15622/sp.57.6.
2. Ryumin D., Kagirow I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A Multimodal User Interface for an Assistive Robotic Shopping Cart. *Electronics*. 2020;9(12):2093. DOI: 10.3390/electronics9122093.
3. Tikanmäki A., Bedrník T., Raveendran R., Röning J. The remote operation and environment reconstruction of outdoor mobile robots using virtual reality. *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2017;1526–1531. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8016043.
4. Tikanmaki A., Roning J. Development of Mörri, a high performance and modular outdoor robot. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009;1441–1446. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152437.
5. Iqbal J., Xu R., Halloran H., Li C. Development of a Multi-Purpose Autonomous Differential Drive Mobile Robot for Plant Phenotyping and Soil Sensing. *Electronics*. 2020;9(9):1550. DOI: 10.3390/electronics9091550.
6. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019;233(10):1298-1308. DOI: 10.1177/0959651819828460.
7. Jiao R. et al. An Intuitional End-to-End Human-UAV Interaction System for Field Exploration. *Frontiers in Neurorobotics*. 2019;13:117. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00117.
8. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2021;175-185. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
9. Астапова М.А., Аксаментов Е.А. Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021;25(1):66–81. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81.
10. Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to Robotic Mobile Platform Path Planning Upon Analysis of Aerial Imaging Data. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. – Springer, Singapore, 2021;93-102. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_7.
11. Sauro J. Measuring Task Times without Users. 2011. Доступно по: <http://www.measuringusability.com/predicted-times.php> (дата обращения 2020-12-14).

12. Mayhew D.J. Keystroke level modeling as a cost justification tool. *Cost-Justifying Usability*. Morgan Kaufmann, 2005;465-XV. DOI: 10.1016/B978-012095811-5/50016-X.
13. Comber T., Maltby J. R. Investigating Layout Complexity. *CADUI*. 1996; 209–228.
14. Курзанцева Л.И. Разработка адаптивного человеко-машинного интерфейса с использованием множества критериев оценки его качества. *Управляющие системы и машины*. 2011;6:46-51.
15. Nielsen J. Heuristic evaluation. *Usability inspection methods*. John Wiley & Sons, Inc., 1994;25–62.

REFERENCES

1. Andreev V.P., Pletenev P.F. Metod informacionnogo vzaimodejstviya dlja sistem raspredeljonnoho upravlenija v robotah s modul'noj arhitekturoj. *Trudy SPIIRAN*. 2018;2(57):134–160. DOI: 10.15622/sp.57.6. (In Russ)
2. Ryumin D., Kagirow I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A Multimodal User Interface for an Assistive Robotic Shopping Cart. *Electronics*. 2020;9(12):2093. DOI: 10.3390/electronics9122093.
3. Tikanmäki A., Bedrník T., Raveendran R., Röning J. The remote operation and environment reconstruction of outdoor mobile robots using virtual reality. *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2017;1526–1531. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8016043.
4. Tikanmaki A., Roning J. Development of Mörrri, a high performance and modular outdoor robot. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009;1441–1446. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152437.
5. Iqbal J., Xu R., Halloran H., Li C. Development of a Multi-Purpose Autonomous Differential Drive Mobile Robot for Plant Phenotyping and Soil Sensing. *Electronics*. 2020;9(9):1550. DOI: 10.3390/electronics9091550.
6. Ju C., Son H.I. A distributed swarm control for an agricultural multiple unmanned aerial vehicle system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019;233(10):1298-1308. DOI: 10.1177/0959651819828460
7. Jiao R. et al. An Intuitional End-to-End Human-UAV Interaction System for Field Exploration. *Frontiers in Neurorobotics*. 2019;13:117. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00117.
8. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2021;175-185. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
9. Astapova M.A., Aksamentov E.A. Ispol'zovanie spektral'nyh landshaftnyh indeksov dlja detektirovanija prepjatstvij v zadachah navigacii mobil'nyh robototekhnicheskikh platform na sel'skohozjajstvennyh territorijah. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021;25(1):66–81. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81. (In Russ)
10. Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to Robotic Mobile Platform Path Planning Upon Analysis of Aerial Imaging Data. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2021;93-102. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_7.
11. Sauro J. Measuring Task Times without Users. 2011. Available at: <http://www.measuringusability.com/predicted-times.php> (accessed 2020-12-14).
12. Mayhew D.J. Keystroke level modeling as a cost justification tool. *Cost-Justifying Usability*. Morgan Kaufmann, 2005;465-XV. DOI: 10.1016/B978-012095811-5/50016-X.
13. Comber T., Maltby J. R. Investigating Layout Complexity. *CADUI*. 1996;209–228.

14. Kurzanceva L.I. Razrabotka adaptivnogo cheloveko-mashinnogo interfejsa s ispol'zovaniem mnozhestva kriteriev ocenki ego kachestva. *Upravljajushhie sistemy i mashiny*. 2011;6:46-51. (In Russ)
15. Nielsen J. Heuristic evaluation. *Usability inspection methods*. John Wiley & Sons, Inc., 1994;25–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мотиенко Анна Игоревна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: anna.gunchenko@gmail.com

ORCID: [0000-0002-0315-9485](https://orcid.org/0000-0002-0315-9485)

Ватаманюк Ирина Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com

ORCID: [0000-0001-5388-8152](https://orcid.org/0000-0001-5388-8152)

Савельев Антон Игоревич, кандидат технических наук, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: saveliev.ais@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-1851-2699](https://orcid.org/0000-0003-1851-2699)

Хаджи Мехмет Гузей, Ph.D., доцент кафедры электротехники и электроники, факультет инженерии и архитектуры, Эрзурумский Технический Университет, Эрзурум, Турция.

e-mail: mehmet.guzey@erzurum.edu.tr

ORCID: [0000-0002-2215-9536](https://orcid.org/0000-0002-2215-9536)

Anna Igorevna Motienko, Candidate Of Technical Science, senior researcher of big data technologies in socio-cyberphysical systems laboratory, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation.

Irina Valer'evna Vatamaniuk, junior researcher of autonomous robotic systems laboratory, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation.

Anton Igorevich Saveliev, Candidate, head of autonomous robotic systems laboratory, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation.

Haçı Mehmet Güzey, Ph.D., Assistant Professor, Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Erzurum Technical University, Erzurum, Turkey.

Оливер Йокиш, Prof., Dr.-Ing., профессор,
Университет телекоммуникаций Лейпцига,
Лейпциг, Германия.

e-mail: jokisch@hft-leipzig.de

ORCID: [0000-0001-7411-4420](https://orcid.org/0000-0001-7411-4420)

Oliver Jokisch, Professor, Dr.-Ing, Professor,
Hochschule für Telekommunikation Leipzig,
Leipzig, Germany.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021;
принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 16.09.2021; approved after reviewing 28.09.2021;
accepted for publication 30.09.2021.