

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>

Метод динамического формирования изображений HUD дисплея для наземных автономных робототехнических средств

М.И. Заикин ¹ ✉, М.А. Летенков ¹, К.В. Камынин ¹, М.А. Астапова ¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: zmaik@live.com

Резюме

Цель исследования. Визуализация информации на Head-up дисплей (HUD) уже давно является неотъемлемой частью авиационной сферы, а также активно развивается в автомобильной. Такой дополнительный источник информации позволяет пилоту, водителю или другим типам пользователей быть сконцентрированным на окружающей обстановке, при этом получая важную в текущий момент времени дополнительную информацию. Однако использование HUD для робототехнических систем пока еще не получило должного развития.

Методы. В данной статье представлен метод, который обеспечивает динамическое формирование элементов дисплея в зависимости от текущего состояния, в котором функционирует роботизированное средство. Представленный метод универсален и обеспечивает вывод информации, которая является актуальной для текущего процесса функционирования.

Результаты. Для апробации разработанного метода было проведено внедрение программного обеспечения (ПО), динамически формирующего элементы Head-up дисплея в ПО для учебной наземной робототехнической платформы. Были разработаны и протестированы сценарии функционирования платформы с различным набором датчиков и динамически формируемыми вариантами представления дисплея. Результаты апробации разработанного решения на контрольной группе из 32 человек, и сравнительный анализ с дисплеем без динамического формирования элементов показал, что 87,5% испытуемых воспринимают информацию значительно лучше.

Заключение. В данной статье проведен анализ применимости Head-up дисплеев в сферах авиации и автомобильной техники. На базе полученных данных была составлена классификация выводимой на HUD информации. Апробация разработанного метода показала, что 28 из 32 человек предпочли использовать динамически формируемые HUD, что показывает перспективность дальнейшего развития данного решения.

Ключевые слова: наземная робототехника; HUD; формирование изображений; автономное робототехническое средство; оптимизационная задача; State Machine; динамическое формирование HUD.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Метод динамического формирования изображений HUD дисплея для наземных автономных робототехнических средств / М.И. Заикин, М.А. Летенков, К.В. Камынин, М.А. Астапова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 79-96. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>.

Поступила в редакцию 12.09.2023

Подписана в печать 30.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Заикин М.И., Летенков М.А., Камынин К.В., Астапова М.А., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2023; 27(3): 79-96

Dynamic HUD Imaging Method for Ground Autonomous Robotics

Mikhail I. Zaikin¹ ✉, Maksim A. Letenkov¹, Konstantin V. Kamynin¹,
Marina A. Astapova¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: zmaik@live.com

Abstract

Purpose of research. Visualization of information on a Head-up Display (HUD) has long been an integral part of the aviation industry, and is also actively developing in the automotive industry. This additional source of information allows the pilot, driver or other types of users to be focused on the surrounding environment, while receiving additional information that is important at the current time. However, the use of HUDs for robotic systems has not yet been fully developed.

Methods. This article presents a method that provides dynamic formation of display elements depending on the current state in which the robotic device operates. The presented method is universal and provides the output of information that is relevant to the current operating process.

Results. To approbation the developed method, software was introduced that dynamically forms head-up display elements in software for a training ground robotic platform. Scenarios for the functioning of the platform with a different set of sensors and dynamically generated display presentation options were developed and tested. The results of testing the developed solution on a control group of 32 people and a comparative analysis with a display without dynamic formation of elements showed that 87.5% of subjects perceive information much better.

Conclusion. This article analyzes the applicability of Head-up displays in the fields of aviation and automotive technology. Based on the data obtained, a classification of information displayed on the HUD was compiled. Testing of the developed method showed that 28 out of 32 people preferred to use dynamically generated HUDs, which shows the promise of further development of this solution.

Keywords: Ground Robotics, HUD, Image Formation, Autonomous Robotics, Optimization Task, State Machine, Dynamic HUD Formation.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zaikin M. I., Letenkov M. A., Kamynin K. V., Astapova M. A. Dynamic HUD Imaging Method for Ground Autonomous Robotics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 79-96 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-79-96>.

Received 12.09.2023

Accepted 30.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

В настоящее время робототехнические средства находят применение в самых различных сферах, начиная с

промышленности и заканчивая сферой услуг. Одним из распространенных типов робототехнических средств, ис-

пользуемых на практике, является наземное мобильное робототехническое средство – Autonomous Ground Vehicle (AVG). Как правило, при работе с наземным мобильным роботом используется человеко-машинный интерфейс. Однако зачастую видеопоток с робота и данные с сенсоров расположены в разных частях пользовательского интерфейса и для снятия показаний с датчиков оператору необходимо переключаться между частями интерфейса. Для работы с наземным роботом необходимо оптимизировать пользовательский интерфейс и разработать компактное представление разнородных данных в едином пространстве с наложением визуальных данных на видеопоток. Для такой задачи подходит технология Head-up дисплея, который в настоящее время находит применение на наземных и воздушных средствах передвижения как дисплей дополненной реальности [1, 2].

Head-up дисплей предназначен для визуализации показаний с сенсоров и датчиков в режиме реального времени. Данная технология широко распространена в авиационной, военной, а также в гражданской сферах, например, в автомобилях. Изначально Head-up дисплеи получили распространение в военной авиационной сфере. В частности, они использовались для более эффективного отслеживания параметров полета пилотом [3, 4], а в последствии заняли свое место и в гражданской авиации [5], став неотъемлемой частью авиаиндустрии. Такие дополняющие дисплеи

помогают при работе с информацией, при этом не нарушая фокусировку на конкретной текущей задаче. В дальнейшем Head-up дисплеи получили свое распространение и в автомобильной отрасли. Производители начали использовать HUD для проекции основных параметров на лобовое стекло транспортного средства.

С точки зрения конечного потребителя, в [6] исследователями был проведен опрос на базе выборки, состоящей из 539 человек, в которой респондентам предлагалось дать оценку системе HUD. Большинство респондентов (87%) согласилось с эффективностью восприятия информации в виде Head-up дисплея при управлении транспортным средством. В то же время, в [7] был проведен практический эксперимент, в котором группе людей требовалось проехать два незнакомых маршрута на автомобиле, при этом для визуализации навигационной информации по одному маршруту использовался обычный дисплей мультимедийной системы, а на втором маршруте использовался Head-up дисплей. В результате эксперимента исследователи сделали вывод, что водители допускают меньшее количество навигационных ошибок (0,7 против 1,1) при визуализации примитивной информации на HUD.

Технология Head-up дисплеев развивается параллельно развитию технологий машинного обучения, искусственного интеллекта и беспилотного гражданского транспорта. Уже сейчас HUD внедряются в сферу автономного вождения [8].

Однако перенасыщение информации на таких дополнительных дисплеях может приводить к негативным последствиям. Так, при перегрузке данных пользователь начинает терять фокус с дороги и риск возникновения опасных ситуаций может возрастать [7, 9]. Поэтому необходимо обеспечить фильтрацию информации, которую необходимо выводить на HUD.

Для проектирования Head-up дисплеев существуют определенные правила и классификации объектов, которые должны быть визуализированы. Например, в исследовании [10] были предложены 4 варианта интерфейса отображения информации на лобовом стекле автомобиля, варианты были оценены фокус группой, состоящей из 30 человек. Интерфейсы тестировались в симуляторе вождения. В результате эксперимента были получены выводы по информации, визуализация которой повышает безопасность использования автомобилем. Дисплеи, визуализирующие скорость движения, заставляли участников эксперимента реже превышать скорость и на части маршрута ехать даже немногим медленнее разрешенной скорости. Также в ходе эксперимента исследователи получили информацию о предпочтительных данных, выводимых на HUD, такими данными оказались скорость автомобиля, ограничение скорости, индикация при движении по пересеченной местности, ин-

дикация при движении на малом расстоянии до впереди идущего автомобиля и навигационные подсказки.

Также и в [11, 12] исследователи получили выводы, что наиболее подходящей является визуализация текущей скорости, знаков ограничения скорости и оповещения на критические события, а также выявили недостатки с компоновкой существующих Head-up дисплеев.

В свою очередь проектирование авиационного HUD обладает своими правилами и особенностями. В работе [13] автор рассматривает проектирование такого дисплея и в качестве вывода выделил некоторые правила проектирования: линейные шкалы, более толстая ширина линий (поскольку в большинстве случаев задним фоном выступает голубое небо), градация цветов отображения элементов и сообщений об ошибках – зеленый, желтый, красный.

На основе проведенного выше анализа работ составлена классификация основных визуализируемых объектов Head-up дисплея. В первую очередь стоит разделить дисплеи, предназначенные для наземных транспортных средств и авиационные. На рис. 1 представлена схема с классификацией объектов HUD.

Несмотря на развитие Head-up дисплеев, остаются области, где данная технология еще слабо внедрена. Одной из таких областей являются автономные наземные роботизированные средства.

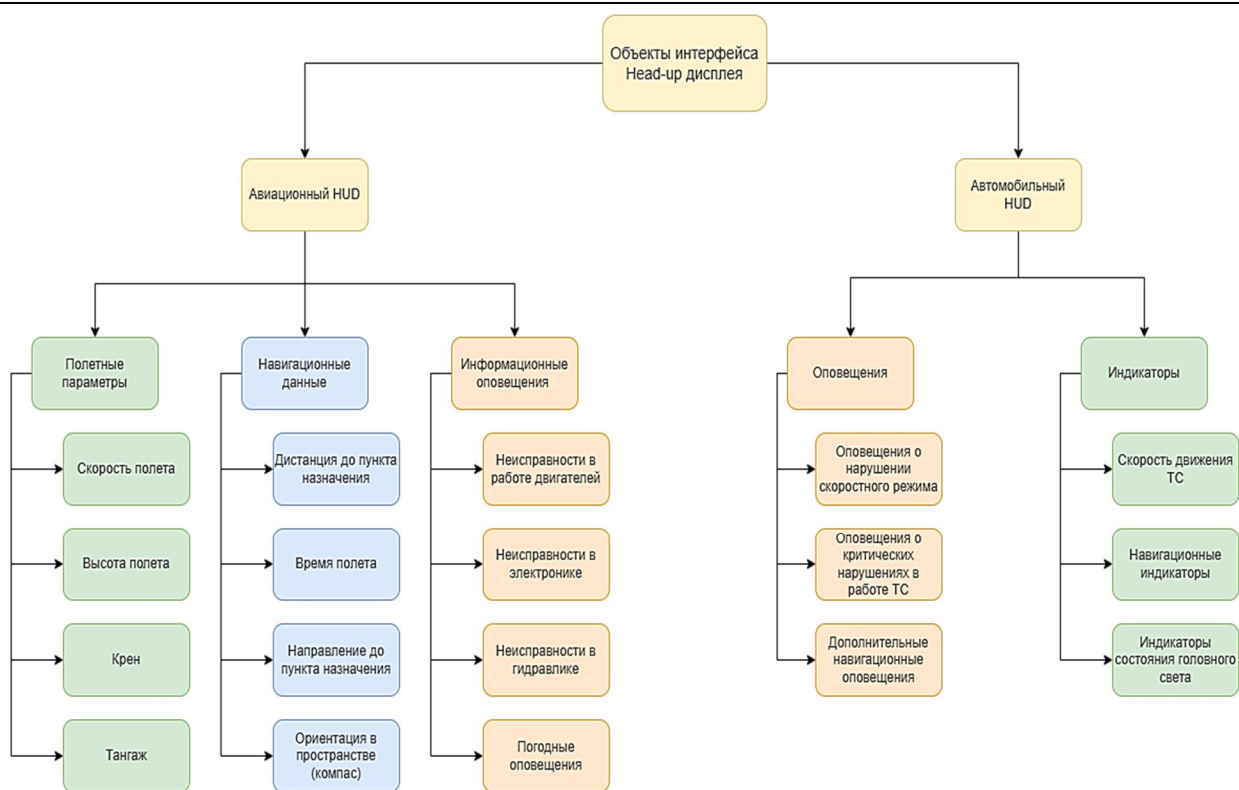


Рис. 1. Классификация объектов HUD

Fig. 1. Classification of HUD objects

Для обеспечения функционирования наземных робототехнических средств используются различные типы сенсорных устройств, с которых поступают разнообразные данные. При отображении таких данных оператору зачастую сложно воспринимать большой объем информации одновременно и своевременно корректировать процесс функционирования робота. Для решения данной проблемы в работе был разработан метод динамического формирования Head-up дисплея пользователя с учетом текущего процесса функционирования автономного робототехнического средства.

Оптимизационная задача, которую необходимо решить для повышения качества взаимодействия пользователя с интерфейсом, заключается в следую-

щем. Необходимо минимизировать количество отображаемой информации D на Head-up дисплее в зависимости от типа выполняемой роботом задачи. Таким образом необходимо найти такой элемент графического интерфейса i используемый в задаче j – x_{ij} , чтобы минимизировать количество информации D .

$$f(D) = \min_{x_{ij}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}.$$

Значение x_{ij} определяется использованием i -го элемента в j -ой задаче. Где элемент $i = 1, \dots, m$; задача $j = 1, \dots, n$. Таким образом формируется матрица состояний R . Если элемент используется в задаче, то поле матрицы приравнивается к 1, в случае если не используется – к 0:

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

Метод, обеспечивающий решение поставленной задачи, описан в следующем разделе.

Материалы и методы

Архитектура системы для динамического формирования HUD представлена на рис. 2.

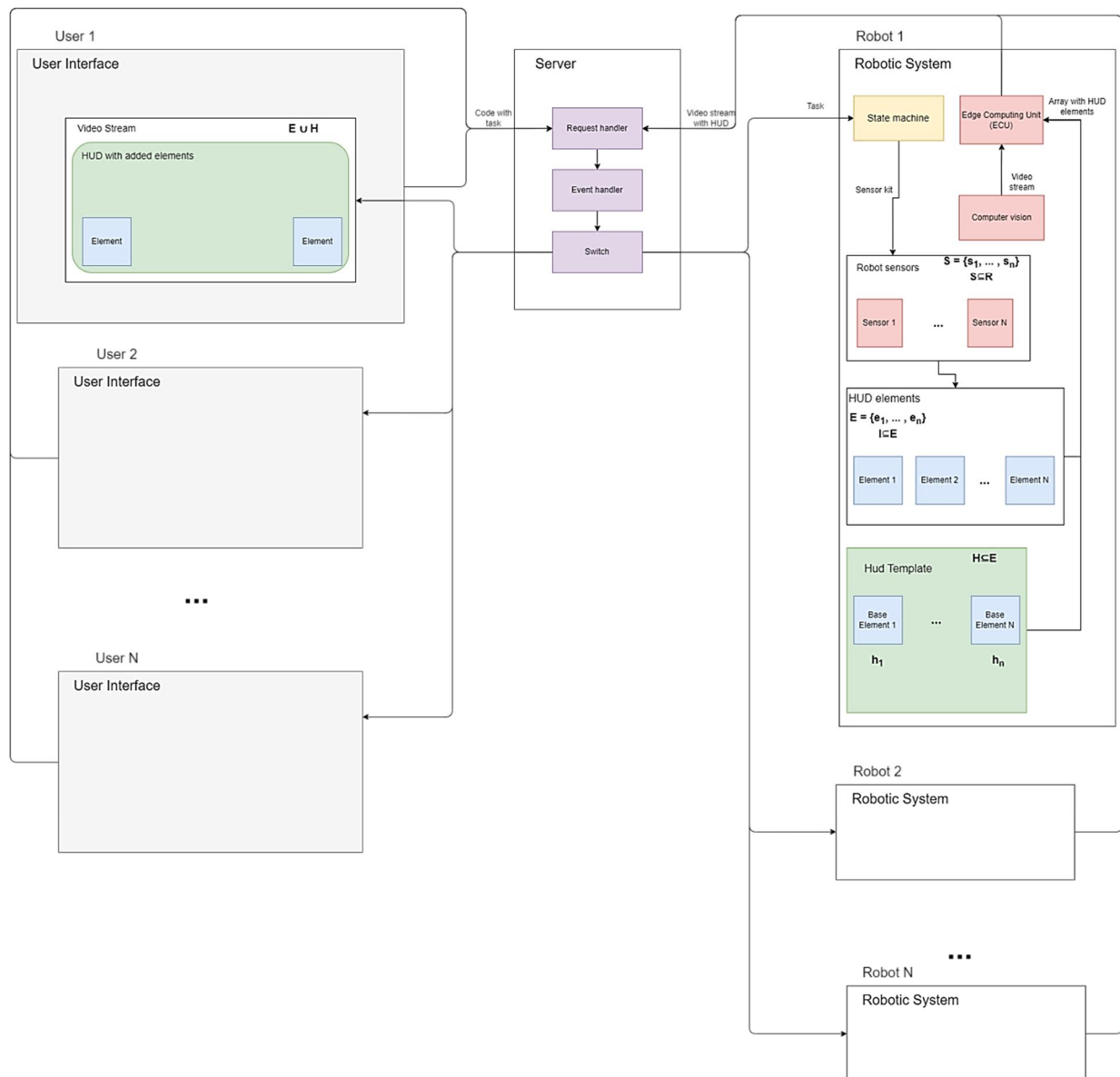


Рис. 2. Архитектура системы для динамического формирования HUD

Fig. 2. System architecture for dynamic HUD formation

Динамическое изменение элементов Head-up дисплея позволяет системе подстраиваться под определенную задачу, выполняемую пользователем и

повышать качество восприятия данных, автоматически выводимых на Head-up дисплей в процессе функционирования. Для повышения качества восприятия

информации с Head-up дисплея был разработан метод динамического формирования HUD'a.

Далее опишем метод для динамического формирования HUD. Основными частями архитектуры являются робототехнические платформы, которые включают в себя множество сенсорных узлов, формирующие данные: $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$.

Робототехническое средство выполняет задачи, поставленные пользователем – $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$, на основе машины состояний, представленной множеством $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_a\}$, где m – это одно из состояний, в которых может прибывать робот.

При выполнении определенной задачи t используется одно или более состояний из M . С помощью графического интерфейса пользователем назначаются задачи робототехническому средству и происходит отслеживание процесса выполнения данной задачи оператором с помощью Head-up дисплея, состоящего из видеопотока об окружающем роботе пространстве и наложенными на него графическими элементами интерфейса $\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_d\}$, где $e \in E$.

Шаблон базового Head-up дисплея $H \subset E$, формируется единожды для каждой определенной системы в зависимости от ее датчиков, обработанные данные с которых необходимо визуализировать вне зависимости от текущего состояния функционирования робота.

На основе текущего состояния m определяется множество данных от сенсорных узлов $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_j\}$,

где $W \subset S$. Основываясь на типах датчиков, которые формируют данные $w \in W$, формируется множество элементов i , где $i \in I$ и $I \subseteq E$. I – это множество дополнительных элементов для визуализации информации с датчиков, которые используются в текущем состоянии робототехнического средства $m \in M$, где $f(t): W \rightarrow I, \forall t \in T$. Для формирования конечного вида Head-up дисплея происходит объединение множеств $I \cup H$ и наложение полученных элементов e из двух множеств на видео поток.

Таким образом решением оптимизационной задачи будет являться матрица состояний R , размерностью $E \times T$, состоящая из элементов x_{ij} . Следовательно, матрица состояний будет иметь вид:

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1T} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{E1} & \dots & x_{ET} \end{bmatrix}.$$

Как видно из архитектуры на рис. 2, наложение элементов HUD на исходные данные для визуализации окружающего пространства происходят на робототехническом средстве и относятся к граничным вычислениям. Граничные вычисления сосредоточены на развертывании в различных сценариях для сокращения сетевого трафика и задержек при принятии решений [14]. Алгоритм для формирования изображения при определенном состоянии m представлен на рис. 3.

В результате работы метода будет формироваться выводимый пользователю графический интерфейс с видеопотоком.

током и наложенными на него элементами Head-up дисплея, отражающего данные с датчиков, необходимых при текущем процессе функционирования.

Данный метод позволяет снизить количество элементов интерфейса и

упростить пользователю восприятие информации при работе с робототехнической системой, что влияет на эргономику процесса управления и упрощает взаимодействие с робототехнической системой.

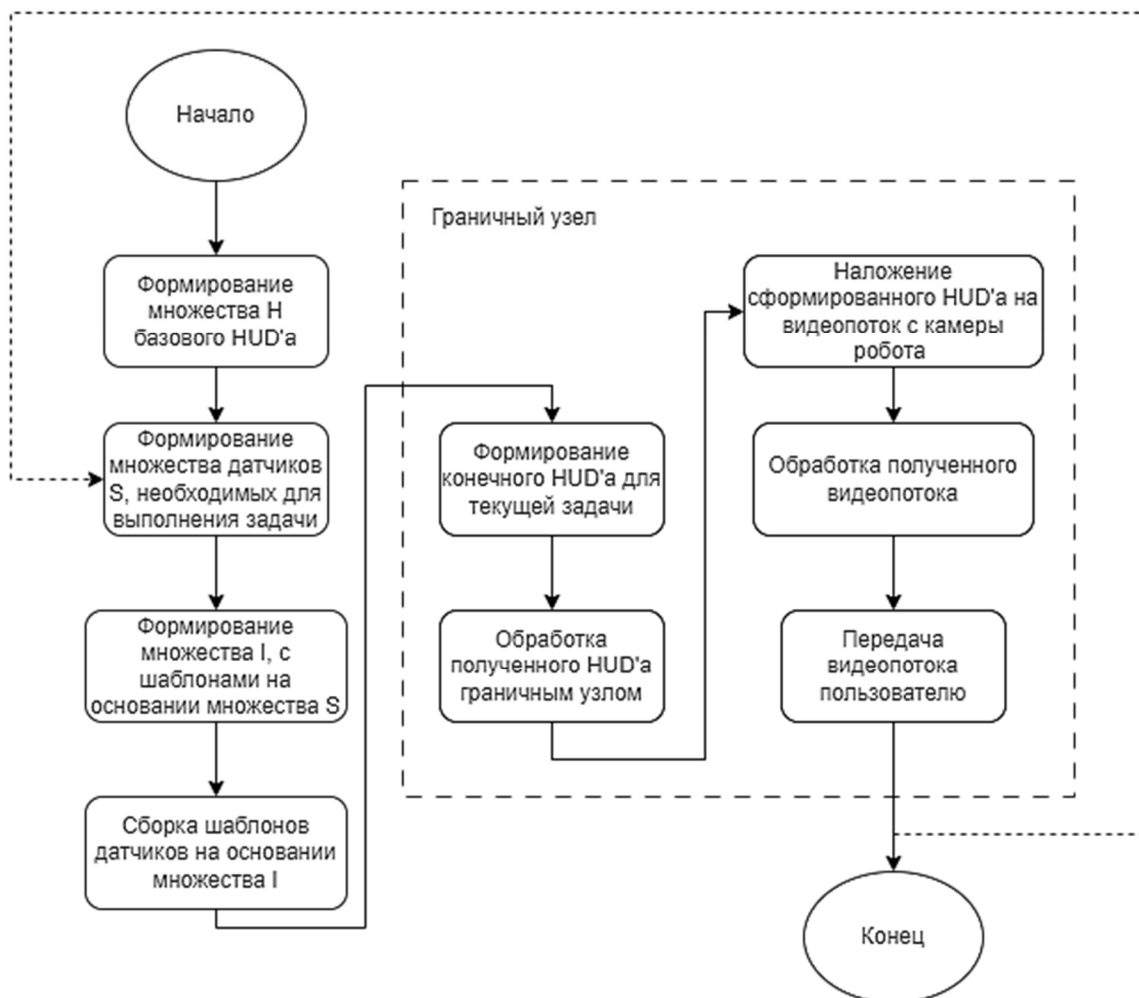


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования изображения для HUD пользователя

Fig. 3. Block diagram of the image generation algorithm for the user's HUD

Результаты и их обсуждение

В качестве платформы для внедрения Head-up дисплея будет выступать наземная робототехническая платформа (НРП) [15-17]. Она представляет собой шасси с четырехколесной кинематикой дифференциального типа и распределенной трехуровневой архитектурой

системы управления ее электротехническим оснащением (рис. 4).

Рассматриваемая НРП предназначена для апробации базовых принципов функционирования наземных робототехнических систем (РС), программирования многофункциональных роботов с распределенной сенсорной системой [18-20].

Как видно из рис. 4 в состав базовых элементов конструкции наземной робототехнической платформы входят:

Микрокомпьютер Raspberry Pi 4;
Ультразвуковой датчик;
Электропривод колесной пары с датчиком оборотов;
RFID-датчик;

Инфракрасные датчики;
Светодиоды видимого и ультрафиолетового спектров;
Сервопривод USB-камеры технического зрения;
USB-камера;
Широконаправленная RPi-камера.

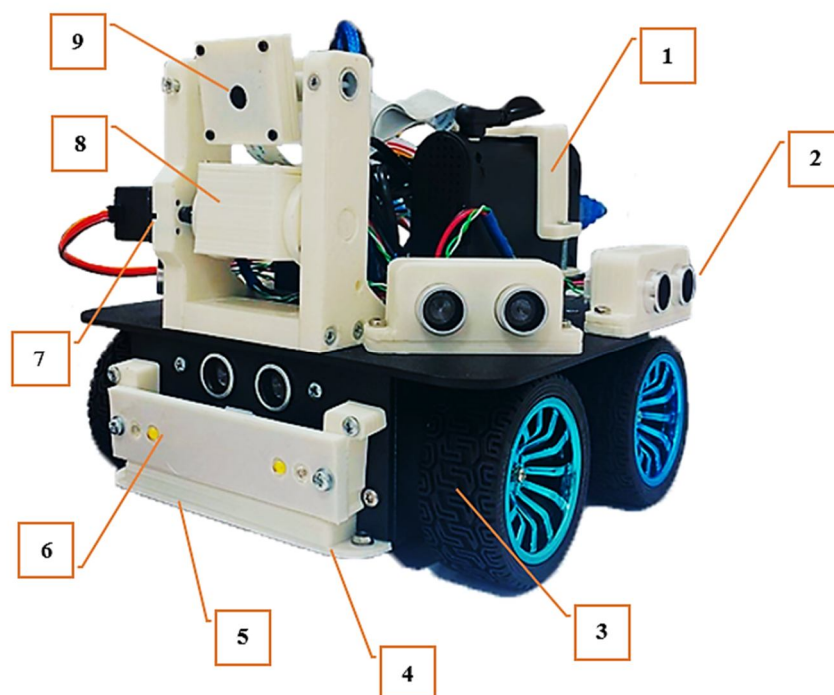


Рис. 4. Наземная робототехническая платформа

Fig. 4. Ground robotic platform

Датчики, перечисленные выше, представляют из себя множество узлов робототехнической платформы *R*.

Был разработан дизайн интерфейса Head-up дисплея, на котором реализована визуализация значений с вышеперечисленных датчиков. Цветом интерфейса был выбран зеленый. Такой выбор обусловлен восприятием данного цвета человеком. В [21] было проведено исследование, и из полученных результатов можно сделать вывод, что для взрослого

человека визуальные объекты зеленого цвета вызывают чувство спокойствия и меньшее раздражение глаз. Это обусловлено короткой волной данного цвета, а также психологически сложившейся ассоциации данного цвета с положительными и спокойными эмоциями. Кроме того, в пользовательских интерфейсах часто зеленым цветом обозначают положительный результат или начало действия, например кнопки «Начать». Элементы HUD'а представлены на рис. 5.

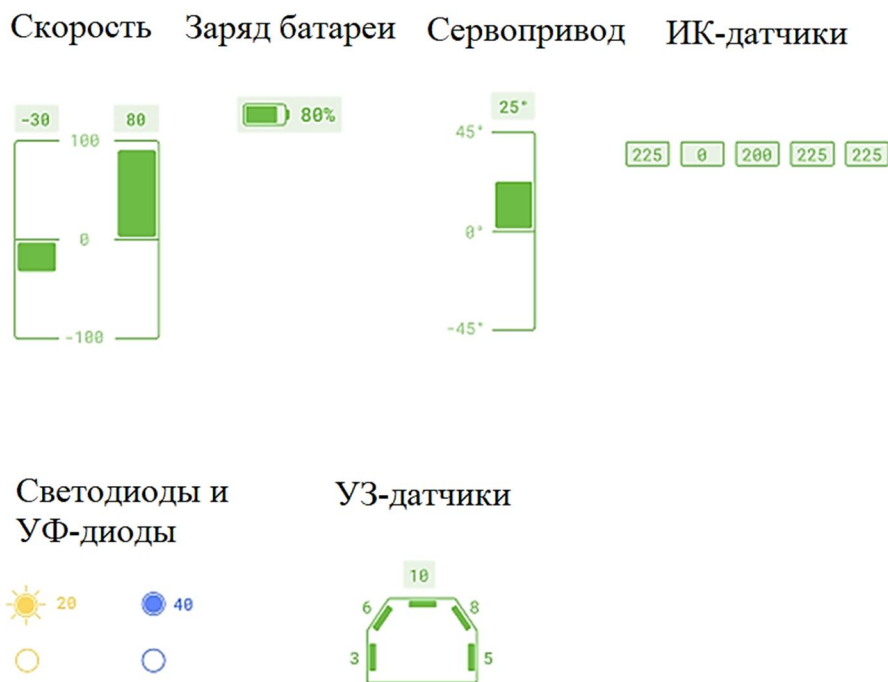


Рис. 5. Элементы Head-up дисплея

Fig. 5. Head-up display elements

Множество элементов H будет состоять из датчиков скорости (v), заряда батареи (b), сервопривода (s), диодов (d). Таким образом можно записать $H = \{v, b, s, d\}$. Эти элементы формируют базовый HUD.

Динамически могут быть добавлены элементы ИК-датчиков (r) и УЗ-датчиков (z). Таким образом множество $I = \{r, z\}$.

Также можно сформировать множество элементов $E = \{v, b, s, d, r, z\}$.

Далее будут рассмотрены три задачи:

- 1) свободное движение робота;
- 2) перемещение робота по лабиринту;
- 3) движение по смешанной трассе, включающей движение по лабиринту, движение по линии и свободное движение.

Таким образом можно составить матрицу состояний S для поставленной

задачи. Имеется 6 датчиков (i) и 3 сценария (j), соответственно матрица состояний будет размерностью 6×3 :

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Зависимость состояний от определенных задач, описанных выше, отображена на диаграмме состояний на рис. 6.

При включении базового сценария свободного движения, на HUD выводятся только датчики, входящие в множество H . Наземный робот с наложенным интерфейсом HUD представлен на рис. 7.

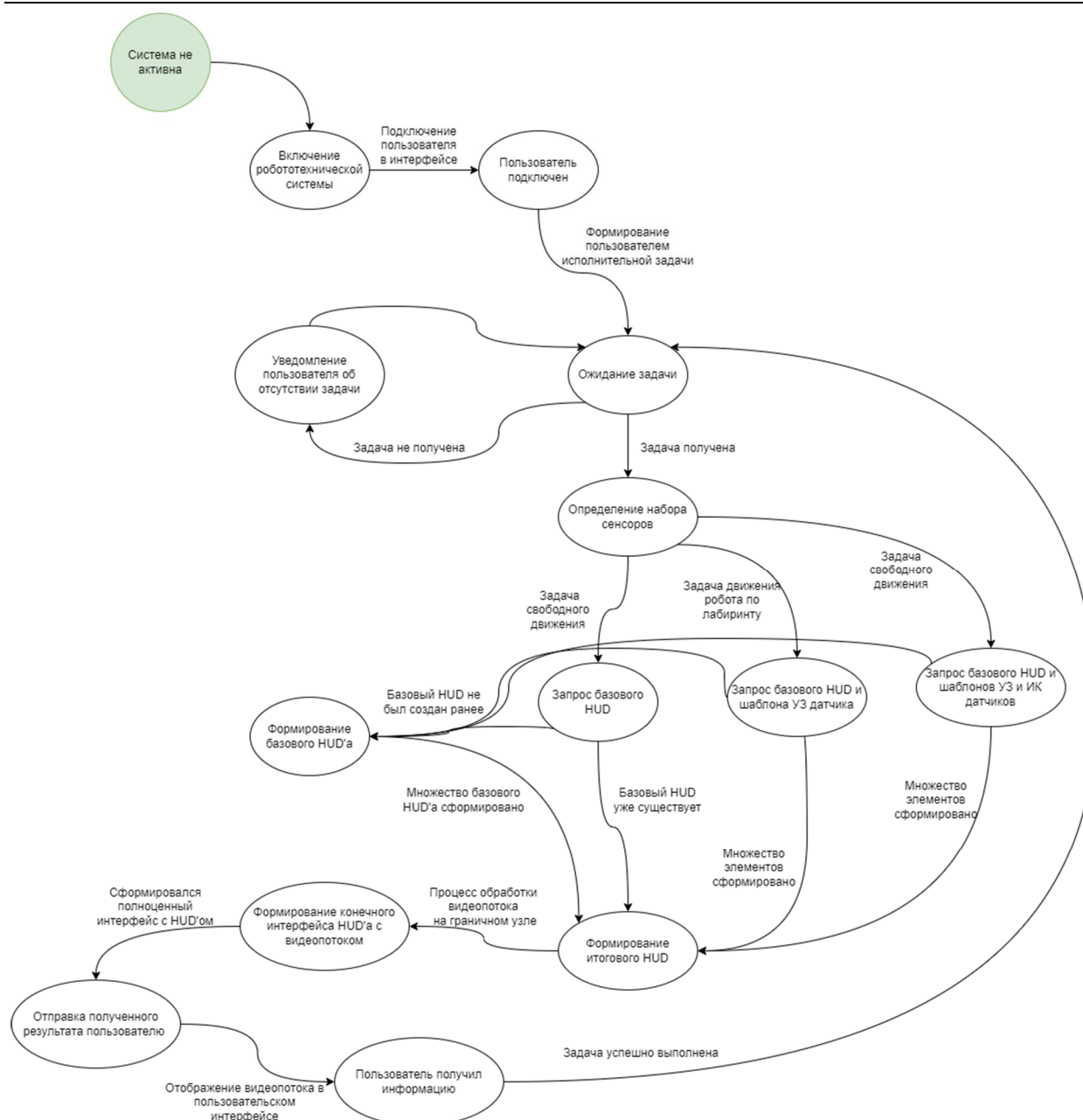


Рис. 6. Диаграмма состояний

Fig. 6. State diagram

Как видно на рис. 7, базовый сценарий позволяет отслеживать только основные параметры робототехнической системы. В данном сценарии не используются дополнительные датчики, их отображение будет негативно сказываться на пользовательском интерфейсе и удобстве взаимодействия с роботом. Однако пользователь может в любой мо-

мент поменять выполняемый сценарий, назначив другую задачу. В этом случае благодаря методу динамического изменения HUD будет выведена информация и о датчиках, не представленных в задаче свободного движения. Применение других сценариев использования продемонстрировано на рис. 8 и 9.



Рис. 7. Интерфейс HUD при запуске базовой задачи

Fig. 7. HUD interface when starting a basic task

При функционировании робота в режиме прохождения в лабиринте с использованием УЗ-датчиков помимо базовых значений добавляется множество E , состоящее в данном случае из одного элемента $E = \{z\}$.

Как видно на рис. 8, при запуске задачи с отслеживанием расстояний используется группа УЗ-датчиков, которые отображаются в правом нижнем уг-

лу интерфейса. Данный режим предназначен для использования робота в режиме прохождения лабиринта.

При решении комплексной задачи движения с использованием всех дополнительных датчиков, помимо базовых значений добавляется множество E , состоящее в данном случае из двух элементов $E = \{z, r\}$.

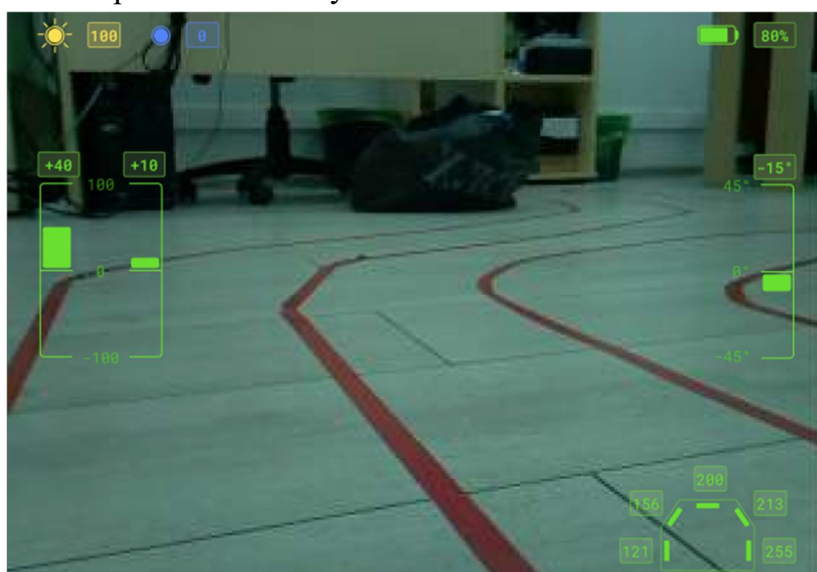


Рис. 8. Интерфейс HUD при запуске задачи с использованием УЗ-датчиков

Fig. 8. HUD interface when starting a task using ultrasonic sensors



Рис. 9. Интерфейс HUD при запуске задачи с использованием всех датчиков

Fig. 9. HUD interface when starting a task using all sensors

На рис. 9, при запуске комбинированной задачи используется группа УЗ-датчиков, которые отображаются в правом нижнем углу интерфейса, и группа ИК-датчиков, которые отображаются в левом нижнем углу интерфейса. Данный режим предназначен для использования робота в комбинированных условиях движения как по линии, так и в лабиринте. При помощи полученной информации оператор сможет в реальном времени наблюдать за параметрами с датчиков, при этом не отвлекаясь от процесса управления.

Исследование на контрольной группе

Для апробации разработанного решения была собрана фокус группа, состоящая из 32 человек. Для эксперимента использовалась наземная робототехническая платформа в трех задачах:

1. Движение по RFID меткам со считыванием ArUco-маркеров, расположен-

ных на разной высоте от земли. В данном сценарии использовался только базовый набор датчиков.

2. Движение по лабиринту, при этом с преодолением зон с затемнением, в которых необходимо включать светодиоды. В данной задаче к базовому набору датчиков добавляются еще данные с УЗ-датчиков.

3. Движение по лабиринту по заранее подготовленной кривой линии. В данной задаче использовался полный набор датчиков. Для движения по кривой использовался набор ИК-датчиков.

Каждую из задач пользователи проходили трижды: первый раз без использования HUD, второй с использованием фиксированного HUD и третий с использованием динамически формируемого Head-up дисплея. После тестирования всех трех типов визуализации данных респондентам было предложено выбрать наиболее удобный для них ва-

риант работы с наземной робототехнической платформы. Большинство опрошенных (28 из 32, 87,5%) отдали предпочтение работе с динамическим HUD. Несколько участников (3 из 32, 9,375%) предпочли использовать статический фиксированный HUD. Только один участник (3,125%) предпочел работу без использования Head-up дисплея, а данные с датчиков отслеживать в отдельном окне, при этом переключаясь с вкладки с видеопотоком, приостанавливая работу. Большинство участников отметили улучшение восприятия информации при работе с динамическим HUD, а также улучшенную эргономику в процессе управления. В качестве заключения можно отметить, что разработка динамически формируемого Head-up дисплея для наземных робототехнических средств является актуальной задачей.

Выводы

В данной статье проведен анализ применимости Head-up дисплеев в сферах авиации и автомобильной техники. На базе полученных данных была составлена классификация выводимой на HUD информации. Был предложен метод и описана архитектура для динамического формирования Head-up дисплея для робототехнических систем. Была произведена разработка Head-up дисплея для наземной робототехнической платформы, проанализирован ряд задач, где использовались различные комбинации сенсоров робототехнического средства. Апробация разработанного метода показала, что 28 из 32 человек предпочли использовать динамически формируемые HUD, что показывает перспективность дальнейшего развития данного решения.

Список литературы

1. Yamin P.A.R., Park J., Kim H.K. Towards a Human-Machine Interface Guidance for in-Vehicle Augmented Reality Head-up Displays // *ICIC Express Letters*. 2021; 15(12): 1313–1318.
2. Head-up display with dynamic depth-variable viewing effect / K. Li, Y. Geng, A.Ö. Yöntem, D. Chu, V. Meijering, E. Dias, L. Skrypchuk // *Optik*. 2020; 221: 165319.
3. Fadden S., Ververs P.M., Wickens C.D. Costs and benefits of head-up display use: A meta-analytic approach // In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. 1998; 42(1): 16–20.
4. A cognitive study of multicolour coding for the head-up display (HUD) of fighter aircraft in multiple flight environments / B. Ling, L. Bo, S. Bingzheng, Q. Lingcun, X. Chengqi, N. Yafeng // In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1215(1): 012032.
5. Head-up display architecture development for perspective civil aircraft / E.S. Neretin, S.A. Dyachenko, V.A. Chufirin, D.M. Ilyashenko // In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 868(1): 012030.

6. Analyzing Drivers' Attitude towards HuD system using a stated Preference survey / H. Guo, F. Zhao, W. Wang, X. Jiang // *Advances in Mechanical Engineering*. 2014; 6: 380647.
7. Burnett G.E. A road-based evaluation of a head-up display for presenting navigation information // In *Proc. of the Tenth International Conference on HumanComputer Interaction (2003)*. 2019: 180–184.
8. Murugan S., Sampathkumar A., Kanaga Suba Raja S., Ramesh S., Manikandan R., Gupta D. Autonomous vehicle assisted by heads up display (HUD) with augmented reality based on machine learning techniques // In *Virtual and Augmented Reality for Automobile Industry: Innovation Vision and Applications*. 2022: 45–64.
9. Hit the brakes! Augmented reality head-up display impact on driver responses to unexpected events / M. Smith, L. Jordan, K. Bagalkotkar, S. Sai Manjuluri, R. Nittala, J. Gabbard // In *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2020: 46–49.
10. Pečecnik K.S., Tomažič S., Sodnik J. Design of head-up display interfaces for automated vehicles // *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023; 177: 103060.
11. Liu Y.C., Wen M.H. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan // *International Journal of Human-Computer Studies*. 2004; 61(5): 679–697.
12. A study on user experience of automotive HUD systems: Contexts of information use and user-perceived design improvement points / D. Beck, J. Jung, J. Park, W. Park // *International Journal of Human–Computer Interaction*. 2019; 35(20): 1936–1946.
13. Ergonomic design and evaluation of visual coding for aircraft head-up display / X. Xiao, X. Wanyan, D. Zhuang, Z. Wei // In *2012 5th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics* 2012: 748–752.
14. All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey / A. Yousefpour, C. Fung, T. Nguyen, K. Kadiyala, F. Jalali, A. Niakanlahiji, J. Kong, J.P. Jue // *Journal of Systems Architecture*. 2019; 98: 289–330.
15. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2022; 10(3): 201–212.
16. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами / А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев // *Информатика и автоматизация*. 2021; 20(6): 1279–1306.
17. Алгоритм планирования локальных траекторий движения наземного робототехнического средства с учетом глобального маршрута / А.И. Савельев, К.В. Камынин, А.А. Ерашов, Е.О. Черских // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2023; 11(3): 188–196.
18. Kuznetsov L., Kozyr P., Levonevskiy D. Algorithm of Target Point Assignment for Robot Path Planning Based on Costmap Data // In *Electromechanics and Robotics: Proceed-*

ings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"(ER (ZR) 2021). 2022: 121–130.

19. Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 107–125.

20. Черноусова П.М., Савельев А.И., Черских Е.О. Образовательный онлайн-курс наземной робототехники СПб ФИЦ РАН // XIV Санкт-Петербургский конгресс «Профессиональное образование, наука и инновации В XXI веке». СПб., 2022: 230–234.

21. Rider R.M. Color psychology and graphic design applications // *Senior Honors Theses*. 2010.

References

1. Yamin P.A.R., Park J., Kim H.K. Towards a Human-Machine Interface Guidance for in-Vehicle Augmented Reality Head-up Displays. *ICIC Express Letters*. 2021; 15(12): 1313–1318.

2. Li K., Geng Y., Yöntem A.Ö., Chu D., Meijering V., Dias E., Skrypchuk L. Head-up display with dynamic depth-variable viewing effect. *Optik*. 2020; 221: 165319.

3. Fadden S., Ververs P.M., Wickens C.D. Costs and benefits of head-up display use: A meta-analytic approach. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. 1998; 42(1): 16–20.

4. Ling B., Bo L., Bingzheng S., Lingcun Q., Chengqi X., Yafeng N. A cognitive study of multicolour coding for the head-up display (HUD) of fighter aircraft in multiple flight environments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1215(1): 012032.

5. Neretin E.S., Dyachenko S.A., Chufirin V.A., Ilyashenko D.M. Head-up display architecture development for perspective civil aircraft. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 868(1): 012030.

6. Guo H., Zhao F., Wang W., Jiang X. Analyzing Drivers' Attitude towards HuD system using a stated Preference survey. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014; 6: 380647.

7. Burnett G.E. A road-based evaluation of a head-up display for presenting navigation information. In *Proc. of the Tenth International Conference on HumanComputer Interaction (2003)*. 2019: 180–184.

8. Murugan S., Sampathkumar A., Kanaga Suba Raja S., Ramesh S., Manikandan R., Gupta D. Autonomous vehicle assisted by heads up display (HUD) with augmented reality based on machine learning techniques. In *Virtual and Augmented Reality for Automobile Industry: Innovation Vision and Applications*. 2022: 45–64.

9. Smith M., Jordan L., Bagalkotkar K., Sai Manjuluri S., Nittala R., Gabbard J. Hit the brakes! Augmented reality head-up display impact on driver responses to unexpected events. In *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2020: 46–49.

10. Pečečnik K.S., Tomažič S., Sodnik J. Design of head-up display interfaces for automated vehicles. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023; 177: 103060.

11. Liu Y.C., Wen M.H. Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2004; 61(5): 679–697.
12. Beck D., Jung J., Park J., Park W. A study on user experience of automotive HUD systems: Contexts of information use and user-perceived design improvement points. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2019; 35(20): 1936–1946.
13. Xiao X., Wanyan X., Zhuang D., Wei Z. Ergonomic design and evaluation of visual coding for aircraft head-up display. In *2012 5th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics 2012*: 748–752.
14. Yousefpour A., Fung C., Nguyen T., Kadiyala K., Jalali F., Niakanlahiji A., Kong J., Jue J.P. All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey. *Journal of Systems Architecture*. 2019; 98: 289–330.
15. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Razrabotka arhitektury i obobshchennoj struktury modulej raspredelennoj sistemy upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami razlichnogo naznacheniya [Development of the architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for robotic complexes for various purposes]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2022; 10(3): 201–212.
16. Erashov A.A., Kamynin K.V., Krestovnikov K.D., Saveliev A.I. Metod ocenki vremeni besprovodnoj peredachi energeticheskikh resursov mezhdvumya robotami [A method for estimating the time of wireless transfer of energy resources between two robots]. *Informatika i avtomatizaciya = Informatics and Automation*. 2021; 20(6): 1279–1306.
17. Saveliev A.I., Kamynin K.V., Erashov A.A., Cherskikh E.O. Algoritm planirovaniya lokal'nyh traektorij dvizheniya nazemnogo robototekhnicheskogo sredstva s uchetom global'nogo marshruta [An algorithm for planning local trajectories of movement of a ground-based robotic vehicle, taking into account the global route]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2023; 11(3): 188–196.
18. Kuznetsov L., Kozyr P., Levonevskiy D. Algorithm of Target Point Assignment for Robot Path Planning Based on Costmap Data. In *Electromechanics and Robotics: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"(ER (ZR) 2021)*. 2022: 121–130.
19. Zakharov K. S., Saveliev A. I. Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 107–125 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
20. Chernousova P.M., Saveliev A.I., Cherskikh E.O. [Educational online course on ground robotics of St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences]. XIV Sankt-Peterburgskij kongress “Professional'noe obrazovanie, nauka i innovacii V XXI veke” = XIV St. Petersburg Congress “Vocational education, science and innovation in the 21st century”. St. Petersburg, 2022: 230–234 (In Russ.).

21. Rider R.M. Color psychology and graphic design applications. *Senior Honors Theses*. 2010.

Информация об авторах / Information about the Authors

Заикин Михаил Игоревич, аспирант, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>.

Mikhail I. Zaikin, Post-Graduate Student, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zmaik@live.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-8149-5804>

Летенков Максим Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: o1prime@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5745-5354>

Maksim A. Letenkov, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian, e-mail: o1prime@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5745-5354>.

Камынин Константин Викторович, программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kamynin.k@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8096-4156>.

Konstantin V. Kamynin, Programmer of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian, e-mail: kamynin.k@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-8096-4156>

Астапова Марина Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>

Marina A. Astapova, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: astapova.m@iias.spb.su, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9121-894X>