



Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы

М. В. Чугунов^{1*}, И. Н. Полунина¹, А. Г. Дивин²,
А. А. Генералова³, А. А. Никулин³, Д. С. Бычков³

¹ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

² Тамбовский государственный технический университет

(г. Тамбов, Российская Федерация)

³ Пензенский государственный университет

(г. Пенза, Российская Федерация)

* m.v.chugunov@mail.ru

Аннотация

Введение. Комитет «Умное агро» научно-образовательного центра «Инженерия будущего» определил ряд задач, актуальных для повышения эффективности точного, почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Одной из таких задач является разработка цифровой мультиагентной системы, обеспечивающей ряд сервисов, предоставляемых агропредприятиям, разработчикам и производителям сельскохозяйственной техники. Целью настоящего исследования является моделирование автономной мобильной роботизированной платформы и разработка программно-аппаратных средств тракторного управления.

Материалы и методы. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи используются современные САХ-системы и их приложения, методы 3D- и натурного моделирования, численного решения задач в терминах механики деформируемого твердого тела. Для расширения и углубления штатного функционала САХ-систем (SolidWorks) в части программной реализации алгоритмов тракторного управления используются методы и технологии программирования с использованием API SolidWorks в среде VisualStudio C++ (MFC, ATL, COM), а для построения натуральных моделей – платформы Arduino и fischertechnik.

Результаты исследования. Результатом исследования является программно-аппаратный модуль тракторного управления для интегрированной (натурной и виртуальной) модели мобильной роботизированной платформы, который может быть предоставлен потребителю как сервис автономизации техники. Для разработанной модели выполнено тестирование алгоритмов управления для тракторных различного вида.

Обсуждение и заключение. Разработанная интегрированная программно-аппаратная модель тракторного управления может быть использована как разработчиками и производителями сельскохозяйственной техники, так и непосредственно агропредприятиями для выполнения типовых технологических процессов. Особенностью реализации является открытый программно-аппаратный интерфейс, обеспечивающий интеграцию мобильных роботизированных платформ на базе цифровой мультиагентной системы.

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Дивин А. Г., Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: роботизированная транспортно-технологическая платформа, CAD/CAE, автономизация техники, натурные и виртуальные модели, траекторное управление, параметрическое проектирование, цифровая мультиагентная платформа

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов, а также выражают признательность руководству и модераторам НОЦ «Инженерия будущего» за помощь, оказанную в процессе подготовки проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы / М. В. Чугунов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 609–627. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>

Original article

Integrated Mobile Robotic Platform Model

**M. V. Chugunov^{a*}, I. N. Polunina^a, A. G. Divin^b,
A. A. Generalova^c, A. A. Nikulin^c, D. S. Bychkov^c**

^a *National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)*

^b *Tambov State Technical University
(Tambov, Russian Federation)*

^c *Penza State University (Penza, Russian Federation)*

* *m.v.chugunov@mail.ru*

Abstract

Introduction. The “Smart Agro” committee of Research and Education Center “Engineering of the Future” has identified a number of tasks relevant for improving the efficiency of precision, soil-protecting and conservation agriculture. One of these tasks is the development of a digital multi-agent system, which provides a number of services for agricultural enterprises, developers and manufacturers of agricultural machinery. The purpose of the present study is to model an autonomous mobile robotic platform, including the development of software and hardware for trajectory control.

Materials and Methods. To solve the problem, there are used modern CAx systems and their applications, the methods of 3D and full-body modeling, and the method of numerical solution of problems in solid mechanics. To expand and improve the standard functionality of CAx-systems (SolidWorks) in the software implementation of trajectory control algorithms, the methods and technologies of programming using API SolidWorks, VisualStudio C++ (MFC, ATL, COM) are used, and to build physical full-scale models – Arduino and fischertechnik platforms.

Results. The result of the study is a software and hardware module of trajectory control for an integrated (physical and virtual) model of a mobile robotic platform, which can be provided to the consumer as a service for technology automation. For the developed integrated model, control algorithms for various types of trajectories were tested.

Discussion and Conclusion. The developed integrated software and hardware model of trajectory control can be used by developers and manufacturers of agricultural machinery, and directly by agro-enterprises for implementing typical technological processes. A feature of the implementation is an open hardware and software interface that provides the integration of mobile robotic platforms based on a digital multi-agent system.

Keywords: robotic transport and technology system, CAD/CAE, technology automation, physical and virtual models, trajectory control, parametric design, digital multi-agent template

Acknowledgments: The authors would like to thank the anonymous reviewers, as well as the management and moderators of the Research and Education Center “Engineering of the Future” for their assistance in the preparation of the project.

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Divin A.G., et al. Integrated Mobile Robotic Platform Model. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):609-627. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>

Введение

Научно-образовательный центр (НОЦ «Инженерия будущего») – это межрегиональное объединение вузов 6 субъектов Российской Федерации (Самарской, Пензенской, Тамбовской, Ульяновской, Астраханской областей, Республики Мордовия), призванное объединить науку и реальный сектор экономики¹. Целью НОЦ является достижение мирового лидерства в научно-технологическом развитии и подготовке кадров по направлениям деятельности центра.

Одним из таких направлений является агрокибернетика. Комитет «Умное агро» НОЦ разрабатывает цифровую мультиагентную систему. Система включает ряд сервисов для агропредприятий, разработчиков и производителей сельскохозяйственной техники.

В частности, сервис автономизации техники решает задачу беспилотного управления роботизированными транспортно-технологическими системами в контексте более общих задач, решаемых комитетом и направленных на повышение эффективности точного, почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Среди основных задач такого типа следует указать следующие:

- панорамное гиперспектральное и 3D-сканирование объектов агроценоза;
- выполнение типовых технологических операций (химическая и механическая обработка растений, сбор и сортировка урожая фруктов и овощей с сопутствующим контролем качества

на основе анализа гиперспектров и полученных вегетационных индексов);

- формирование виртуальных моделей для объектов агроценоза и ассоциативных двунаправленных связей между физическими (натурными) и виртуальными объектами;

- комбинированное траекторное управление мобильными системами с использованием современных методов навигации и позиционирования.

Для решения указанных задач необходима транспортно-технологическая автономная роботизированная платформа, отличающаяся маневренностью, высокой точностью управления и позиционирования.

Проект роботизированной платформы включает несущую систему, ходовую часть, систему торможения, управления, очувствления, а также робота-манипулятора и технологический блок. Проект реализуется в виде интегрированных САХ-моделей, предусматривающих анализ и оптимизацию проектных решений. При этом неременным требованием к проекту в целом является возможность глубокой интеграции всех программных, аппаратных модулей и САХ-моделей. САХ-модели формируются в базовой САХ-среде (SolidWorks) с использованием разработанного в рамках проекта программного обеспечения, расширяющего и дополняющего штатный функционал базовой системы в части задач синхронного управления мобильным

¹ НОЦ «Инженерия будущего»: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://nocsamara.ru/> (дата обращения: 20.06.2021).

роботом (физическим объектом) и его виртуальной САХ-моделью.

Таким образом, целью работы является построение киберфизической робототехнической системы как сервиса, обеспечивающего автономизацию сельскохозяйственной техники. При этом открытый программно-аппаратный интерфейс обеспечивает возможность интеграции платформы в базовую мультиагентную киберфизическую систему в качестве агента.

Обзор литературы

Задача автономизации техники является сложной, междисциплинарной и решается, как правило, для множества разных, но взаимосвязанных объектов (агентов), имеющих единую систему управления. При этом одним из аспектов автономизации является киберфизическая интеграция данных единой цифровой платформы с объектами техники, которые рассматриваются как агенты этой базовой мультиагентной системы [1]. Этот факт предполагает взаимодействие не только агентов техники друг с другом, но еще и с агентами других типов (физических, химических, биологических) [2].

В одной из работ приведен всесторонний анализ структуры, технологий и инструментов, необходимых для реализации киберфизических систем в области интеллектуального агропредприятия в сравнении с аналогичными промышленными комплексами [2]. Общей особенностью этих систем является глубокая интеграция физических и виртуальных компонентов. При этом под виртуальными компонентами понимаются 3D- (САХ: CAD/CAE), математические и программные модели, обладающие достаточной степенью адекватности физическим объектам [3].

Для построения мультиагентных робототехнических систем необходимо решить задачи траекторного управления,

которые сводятся к выводу робота на заданную траекторию из произвольного положения и стабилизации движения по данной траектории.

Среди всего многообразия методов решения этих задач следует указать следующие основные методы: скольжение (sliding / слайдинг), обратный обход интегратора (back-stepping / бэкстеппинг), пропорционально-дифференциально-интегральное регулирование ПИД (proportional-differential-integral control PID) и линеаризация обратной связью (feedback linearization).

Скольльзящие методы обеспечивают сходимость за конечное время, но отличаются сингулярностью. Бэкстеппинг и ПИД-регулирование на практике не допускают аналитическую форму представления и сложны в реализации. Различные модификации этих методов направлены, как правило, на преодоление указанных недостатков [4]. Эту же цель преследуют многочисленные комбинированные методы, которые в последнее время явно преобладают в научной литературе. В работах обоснован комбинированный метод, который сочетает в себе пропорционально-интегральное (ПИ / PI) управление со слайдингом [5], а также слайдинг с бэкстеппингом [6; 7].

Наше исследование затрагивает ту же проблему, что и ряд работ иностранных коллег [8–10]. При проведении экспериментов были использованы методы, описанные в других статьях [11; 12]. Особое место в исследованиях последнего времени занимает проблема формирования двунаправленных связей между реальным объектом (роботом или его натурной моделью) и его виртуальной моделью. Эта проблема хорошо описана в контексте управления мобильными роботами [13–15]. Также проведен всесторонний сравнительный анализ методов управления мобильными роботами [16].

В данной работе для траекторного управления используется метод точной линеаризации замыкающей нелинейной обратной связью, делающей рассматриваемую систему линейной [17]. Метод является отечественной разработкой и отличается непрерывностью управления, задается аналитически, невосприимчив к вибрациям (чаттерингу). При этом полученные стабилизирующие обратные связи обеспечивают экспоненциальное убывание заданной нормы отклонения от целевой траектории.

В пространстве «расстояние до траектории – ориентация» определены области притяжения для выхода на заданную траекторию с установленными показателями экспоненциальной устойчивости и получены управления для стабилизации по прямолинейному пути, по дуге окружности и составным траекториям, сформированным из отрезков прямых и дуг окружностей [17]. Аналогичная задача решена для целевой кривой, заданной параметрически с учетом динамики рулевого привода [18], в работе Л. Б. Рапопорта – для кривой, заданной явно аналитически [19], а в другом исследовании – для криволинейного пути с учетом неровностей поверхности движения [20]. Были рассмотрены варианты замены переменных для кинематической модели, приводящие к точной линеаризации уравнений движения. При этом отмечено, что ключевой проблемой для рассматриваемой задачи является определение расстояния от произвольной точки до целевой кривой [21]. Выполнен анализ результатов, полученных на основе законов управления, синтезированных с помощью разных канонических представлений [22].

Материалы и методы

В качестве базовой транспортной системы рассматривается самоходная база «Туман 1-М» индустриального партнера НОЦ «Пегас-Агро» (рис. 1), эксплуатационные параметры которой являются достаточными для размещения технологического оборудования, разрабатываемого в рамках проектов НОЦ «Умное агро», а также систем энергоснабжения² [23].

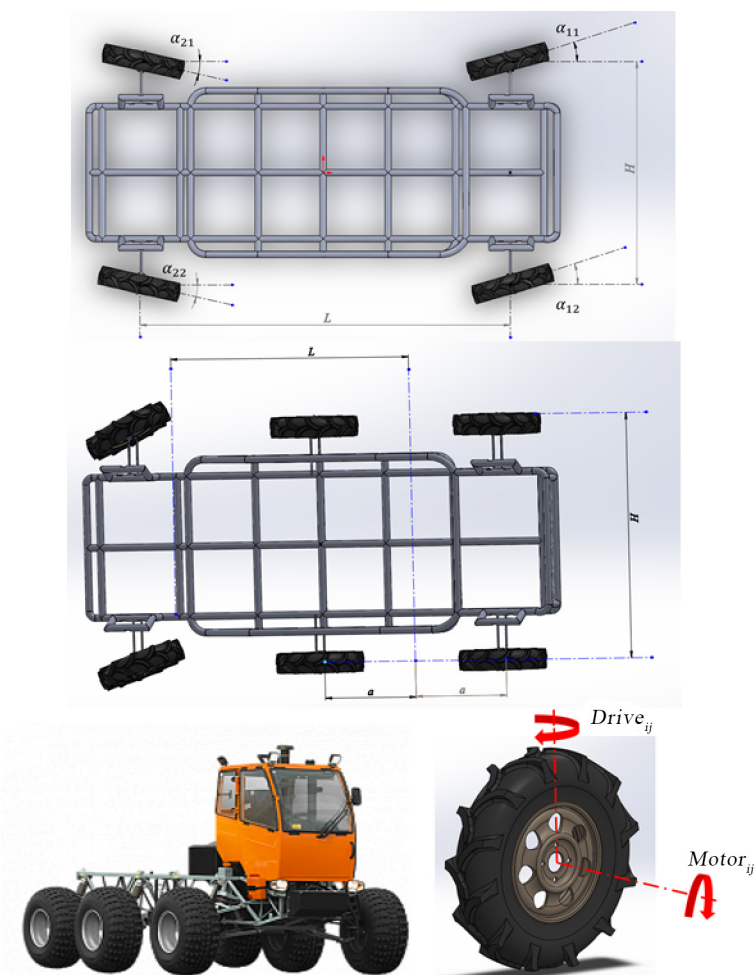
В качестве модели шасси используется универсальная параметрическая CAD/CAE-модель (SolidWorks), разработанная авторами. Она легко адаптируется для разных проектных решений «Пегас-Агро» и предусматривает следующие виды компоновки: двухосевую и трехосевую, заднеприводную, переднеприводную и полноприводную. Модель оснащена одноосевым, двухосевым и дифференциальным управлением с учетом угла Аккермана [9; 24].

На рисунке 1 показаны варианты как двухосевой, так и трехосевой компоновки. Заметим, что для решения задачи траекторного управления существенное значение имеют лишь величины L (колесная база) и H (размер колеи), которые определяются так, как показано на рисунке 1.

В сформированную таким образом CAD/CAE-модель на несущие оси каждой из четырех подвесок установлено по два виртуальных мотора (рис. 1). Первый ($Motor_{ij}$) передает крутящий момент в вертикальной плоскости непосредственно на движитель и моделирует работу мотор-колеса. Второй мотор ($Drive_{ij}$) передает крутящий момент в горизонтальной плоскости и моделирует работу системы управления на базе шагового (серво) двигателя. Работу системы управления иллюстрирует видеоролик³.

² Пегас-Агро : сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://pegas-agro.ru/> (дата обращения: 20.06.2021).

³ URL: <https://drive.google.com/file/d/1HrWptGiffLpuuYdZ4kroUwCJUHy4RNpp/view?usp=sharing> (дата обращения: 20.06.2021).



Р и с. 1. Самоходная база «Туман-1М» и модель компоновки для шасси робота
 F i g. 1. Fog-1M self-propelled base and layout model for robot chassis

$Motor_{ij}$, $Drive_{ij}$ установлены попарно на каждой подвеске и обеспечивают универсальность модели мобильного робота для наиболее общего случая его компоновки и управления ($i = 1, 2$, $j = 1, 2$: индекс i соответствует номеру оси, индекс j – позициям «справа» и «слева» соответственно).

Управляющими параметрами являются угловые кинематические характеристики и углы поворота вокруг вертикальных осей для колес, отвечающих

за управление роботом. Таким образом задается угол Аккермана и моделируется функция механического дифференциала. При этом программный модуль допускает возможность адаптации к различным вариантам компоновки, а сама модель имеет иерархическую структуру, исключая упругие и демпфирующие элементы на стадии решения задачи траекторного управления, что существенно снижает вычислительные затраты. Так, в случае

классического варианта в качестве целевой точки рассматривается срединная точка задней оси с координатами x_c и y_c , ориентация робота задается углом θ между центральной осью платформы и осью x . Рассматривается движение робота без проскальзывания. Углы поворота передних колес α_1 и α_2 (рис. 1), отвечающие за ориентацию робота, определяются из соотношений:

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{uL}{1 - \frac{uH}{2}} \text{ — для внутренней траектории,}$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = \frac{uL}{1 + \frac{uH}{2}} \text{ — для внешней траектории,}$$

где u — мгновенное значение кривизны траектории, описываемой целевой точкой [17]. Во всех других случаях компоновки актуальные параметры управления автоматически связываются с кривизной u .

Уравнения движения робота имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= v_c \cos \theta, \\ \dot{y}_c &= v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= v_c u, \end{aligned}$$

где $v_c = \|V_c\|$ при движении вперед; $v_c = -\|V_c\|$ при движении задним ходом; V_c — вектор мгновенной скорости целевой точки.

Результаты исследования

Ниже приведены результаты для моделирования траекторного управления для различных траекторий.

Случай движения по прямой

Для прямолинейной траектории, проходящей через начало отсчета под углом β к оси x необходимо выполнить преобразование координат:

$$\begin{aligned} \xi &= x_c \cos \beta + y_c \sin \beta, \\ \eta &= y_c \cos \beta - x_c \sin \beta, \\ \psi &= \theta - \beta. \end{aligned}$$

Как показано в работе Л. Б. Рапорта, управление вида

$$u = - \left(\frac{2\lambda + \lambda^2 z_2}{(1 + z_3^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \quad (1)$$

где $z_2 = \eta$, $z_3 = \operatorname{tg} \psi$, обеспечивает экспоненциальную скорость убывания z_2 и z_3 с показателем $-\lambda$ [17].

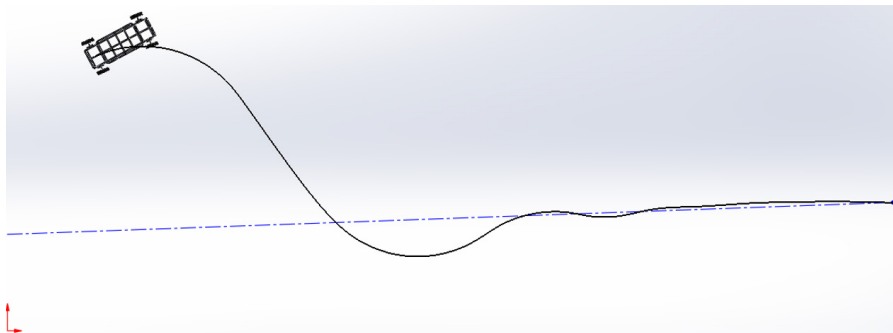
На рисунке 2 показаны результаты численного эксперимента для некоторого произвольного начального положения робота и $\beta = 10^\circ$, $\lambda = 1$, а видеоролик демонстрирует процесс стабилизации во времени⁴. При этом учитывались ограничения на углы поворота передних колес, то есть управление было задано в виде

$$u = -s_{\underline{u}} \left(\frac{2\lambda + \lambda^2 z_2}{(1 + z_3^2)^{\frac{3}{2}}} \right),$$

где $s_{\underline{u}} = [-\underline{u}$ при $u \leq -\underline{u}$, u при $|u| < \underline{u}$, \underline{u} при $u \geq \underline{u}$],

где \underline{u} — ограничение на кривизну траектории, связанное с ограничениями на поворот передних колес.

⁴ URL: https://drive.google.com/file/d/1PqzSYMxwTjmcZyu6n8oml2DC5H3zw_G/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).



Р и с. 2. Результаты численного моделирования для вывода и стабилизации движения робота по прямолинейной траектории

F i g. 2. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along straight path

Случай движения по дуге окружности

Дуга окружности задается центром x_0 , начальной точкой x_b , радиусом R и углом сектора. Обозначим также угол τ между осью x и радиусом-вектором $X_c - X_0$ [17]. Тогда

$$\eta = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2},$$

$$\xi = \tau R, \psi = \theta + \tau,$$

$$z_1 = \xi, z_2 = \eta - R, z_3 = \text{tg} \psi.$$

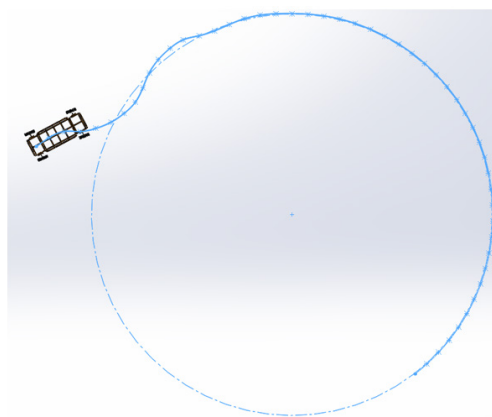
Аналогично (1), (2) управление может быть выбрано в виде

$$u = -s_u \left(\frac{\sigma + \frac{1}{R}(1 + z_3^2)}{\left(1 + \frac{z_2}{R}\right)\left(1 + z_3^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \right)$$

где s_u определяется по-прежнему аналогично (2) [5].

На рисунке 3 показаны результаты численного эксперимента при $\lambda = 1$, $X_0 = (10, 20)$ м, заданном радиусе окружности $R = 12$ м. Результаты

демонстрируются для некоторого произвольного начального положения робота, параметры которого считаются с виртуальных сенсоров. Видеоролик демонстрирует процесс движения⁵.



Р и с. 3. Результаты численного моделирования для вывода и стабилизации движения робота по окружности

F i g. 3. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along arc path

Случай движения по сплайну

Введем следующие обозначения: C – текущая позиция робота; A – ближайшая к ней точка на целевой

⁵ URL: https://drive.google.com/file/d/19U2y90vggNrNAzrA_TqE1WS4znHoAjEQ/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).

траектории; O – мгновенный центр кривизны целевой траектории в точке A ; $OA = R(s) = 1/s$; $k(s)$ – значение кривизны траектории в точке A ; τ – угол между касательной к траектории в точке A и осью x , и $\psi = \theta - \tau$ [20].

В качестве фазовых переменных примем z_1 – расстояние от целевой точки до целевой траектории CA , $z_2 = \text{tg}(\psi)$, при этом управление формируется согласно результатам, представленным в работе А. В. Пестерева и Л. Б. Рапортта [22]. Таким образом,

$$u = s_u \left(\frac{k(s)}{\sqrt{1+z_2^2} (1-k(s)z_1)} - \frac{\sigma(z)}{(1+z_2^2)^{3/2}} \right),$$

где $z = (z_1, z_2)^T$, а функция сатуратор s_u , обусловленная ограничениями на ресурс управления, как и ранее, определена как

$$s_u = \{-\underline{u}, u \leq -\underline{u}, u, \quad |u| \leq \underline{u}, u, \quad u \geq \underline{u}\},$$

где \underline{u} – заданное ограничение, а линейная функция $\sigma(z)$ задается в виде

$$\sigma(z) = \lambda^2 z_1 + 2\lambda z_2, \quad \lambda > 0.$$

В рассматриваемой постановке исходная задача траекторного управления в целом не разделяется для реального робота, его натурной и виртуальной моделей, за исключением лишь способов определения фазовых переменных z_1 и z_2 .

Для виртуальной модели фазовые переменные могут быть определены следующими двумя способами:

а) на основе использования известных кинематических соотношений

и аналитических зависимостей для сплайнов и других траекторий, экспортированных с использованием API САХ-систем и их приложений⁶;

б) на основе непосредственного экспортирования значений переменных z_1 и z_2 из САХ-модели в процессе моделирования движения.

Вторая процедура возможна, если параметрические свойства модели должным образом сформированы, например так, как это показано на рисунке 4. Видеоролик наглядно демонстрирует эти свойства⁷. В этом случае в зависимости от положения робота изменяются $z_1 = \|CA\|$ и $z_2 = t(\psi) = \text{tg}(\theta - \tau)$, но при этом сохраняются заданные параметрические взаимосвязи (принадлежности, касательности, перпендикулярности).

Проведенные нами численные эксперименты показали, что результаты, полученные способами «а» и «б» близки друг другу с высокой (не менее $1e-07$) точностью. Способ «б» имеет особое значение в тех случаях, когда траекторию трудно задать аналитически.

Натурная реализация и моделирование

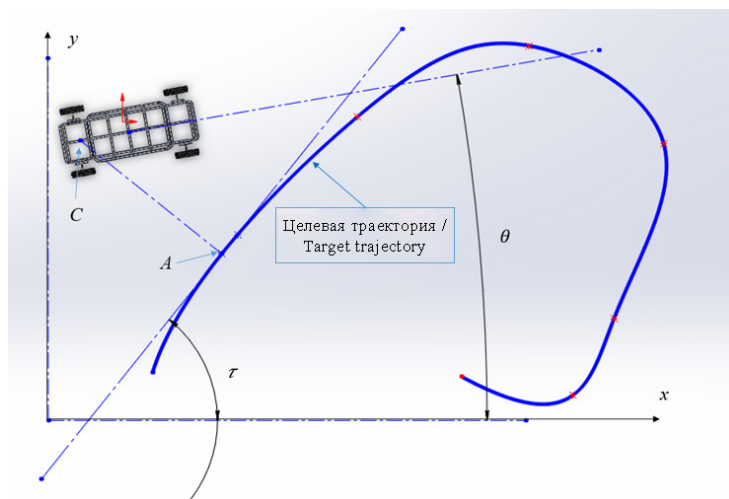
Для натурной модели платформы значения фазовых переменных определяются на основе анализа данных, поступающих от трех модулей чувствительной роботизированной системы:

– модуль визуальной одометрии состоит из двух цифровых камер, определяющих смещение и поворот платформы в пространстве на основе данных с камер⁸ [25];

⁶ SOLIDWORKS API Help [Электронный ресурс]. URL: <https://help.solidworks.com/2021/English/api/sldworksapiproguide/Welcom.htm?verRedirect=1> (дата обращения: 20.06.2021).

⁷ URL: https://drive.google.com/file/d/1O_AbrWxUhw3DoQwuE2D7BNeQg4H9zrbq/view?usp=sharing (дата обращения: 20.06.2021).

⁸ Хабибуллин Р. Р., Бычков Д. С., Генералова А. А. Навигация автотракторной техники // Инновационное развитие современной науки : сборник научных трудов по материалам XXV Международной научно-практической конференции (10 июля 2020 г.). Анапа : ООО «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2020. С. 21–24.



Р и с. 4. Параметрическая модель для траекторного управления по сплайну
 Fig. 4. Results of numerical simulation to bring and to stabilize robot motion along spline path

– модуль инерциальной навигации состоит из гироскопа и акселерометра и позволяет определить линейные и угловые перемещения платформы в пространстве [26];

– модуль спутниковой навигации с приемником спутникового сигнала по типу GPS/GLONASS [27].

Программно-аппаратный модуль управления тестировался на натурной модели, собранной на платформе Arduino и fischertechnik [28–30]. Заметим при этом, что последующий перенос программного обеспечения с натурной модели на реальную платформу потребует лишь настроить интерфейс на конкретные физические сенсоры, обеспечивающие точное определение фазовых переменных.

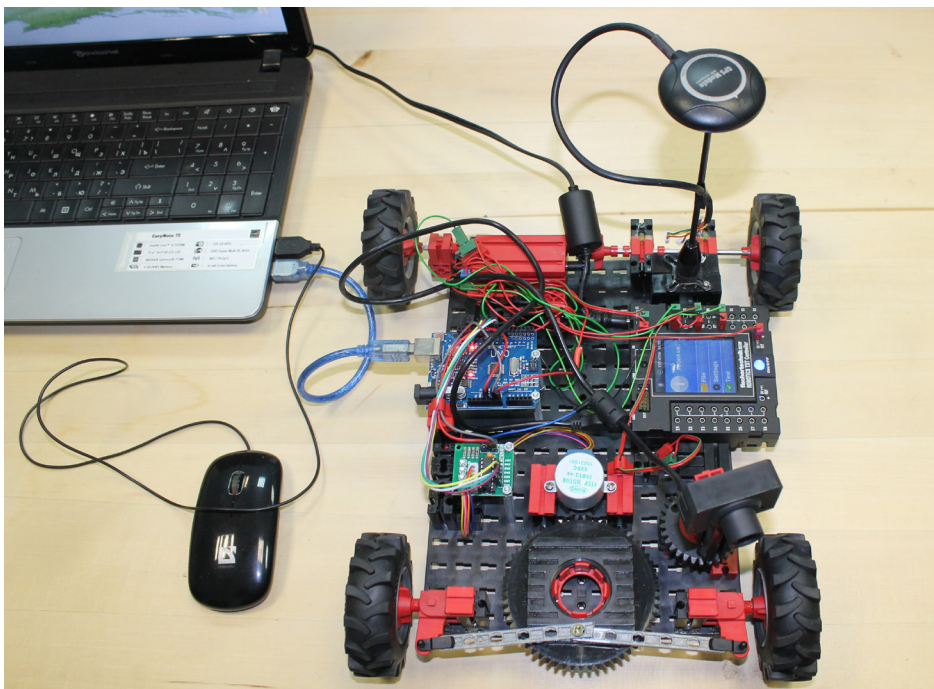
На рисунке 5 показана натурная модель, обеспечивающая тестирование всех рассмотренных алгоритмов и включающая в себя основной привод

двигателей, рулевое управление (в варианте классической компоновки) и поворот видеокамеры. Видеоролик наглядно иллюстрирует работу натурной модели⁹. Траекторное управление рассчитывалось при этом сразу для всей траектории, то есть возможное проскальзывание, неровность поверхности движения и прочие возмущения не учитывались.

Программный модуль представляет собой многодокументное Windows-приложение архитектуры «документ-вид» (среда разработки MS VisualStudio C++/MFC/COM/vMicro(Arduino)/APISolidWorks) и развивает опыт авторов в разработке приложений данного типа¹⁰ [31; 32]. В окне вида отображается масштабированная карта местности, полученная с геоинформационных систем или наземных станций управления и предназначенная для планирования траектории движения робота.

⁹ URL: <https://drive.google.com/file/d/1aQhJ4RHHQg1Qing3JexzDIIfc-rR8wa0/view?usp=sharing> (дата обращения: 20.06.2021).

¹⁰ Программа траекторного управления колесным роботом : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021618351 Российская Федерация / Чугунов М. В. [и др.]. № 2544631 ; заявл. 19.05.2021 ; опубл. 26.05.2021.



Р и с. 5. Натурная модель мобильного робота

F i g. 5. Physical model for mobile robot

Основная особенность программной реализации состоит в том, что управление как функция времени формируется и передается в качестве входных данных на виртуальные и физические устройства (моторы) в рамках одного программного модуля, сформированного одним проектом (project-solution) MS VisualStudio C++.

Окно приложения показано на рисунке 6. Модальная диалоговая панель служит для постановки задачи, ввода исходных данных и компоновки шасси. Возможны два следующих режима работы программы:

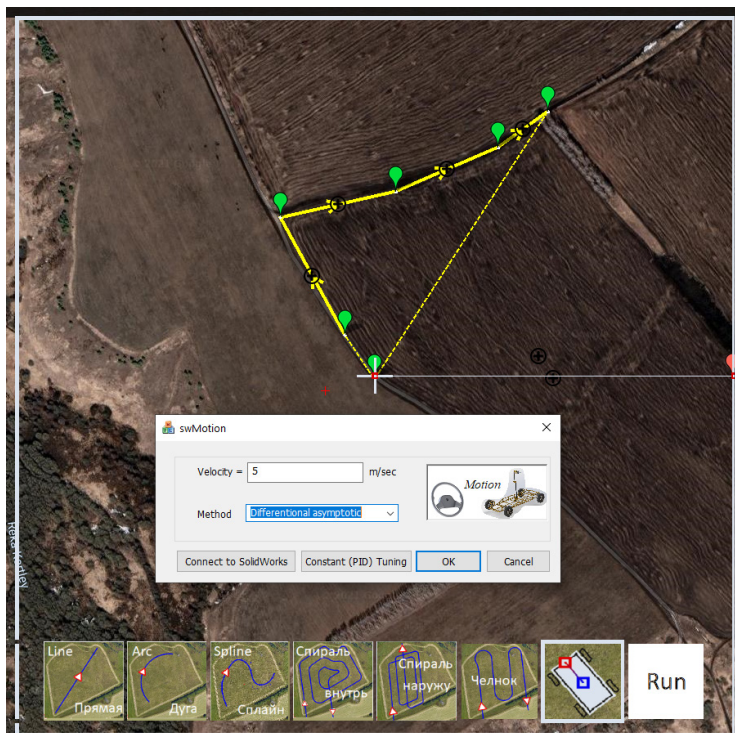
1) с использованием базовой САх-системы в качестве COM-сервера и, соответственно, с использованием API этой системы (на рисунке 8 показан пример в варианте САх SolidWorks);

2) работа в автономном режиме.

В первом случае карта местности загружается в эскиз документа САх, во втором случае – в окно вида приложения. Первый режим работы целесообразно использовать, если есть необходимость анализа проектного решения соответствующих статических, кинематических, динамических и прочих характеристик системы.

Траектория в обоих случаях формируется пользователем непосредственно в окне вида или документа (эскиза) с использованием стандартных средств графического редактирования.

Первый этап состоит в организации импорта-экспорта данных для САх-модели робототехнической системы и тракторного управления. В качестве базовой САх-среды используется SolidWorks, а решение задачи импорта-экспорта решается с использованием COM-интерфейсов и API SolidWorks.



Р и с. 6. Окно приложения
F i g. 6. Application window

Наше приложение относится к типу Stand-Alone, которое подключается к текущему экземпляру COM-сервера sldworks.exe на локальном компьютере посредством использования smart-указателя CComPtr<ISldWorks> и вызова для него функции CoCreateInstance. Функция-обработчик кнопки Connect CAx реализует также определение указателя на текущий документ или открытие необходимого документа SolidWorks.

В контексте рассматриваемой задачи необходимо отметить два момента, которые требуют рассмотрения с точки зрения программной реализации: получение (импорт) данных из CAx-модели; определение (экспорт) данных для моделирования в CAx-среде.

На рисунке 7 показан фрагмент программного кода, реализующего

доступ к фичерам модели, в частности, к эскизу с именем Position и мотору в дереве моделирования с именем Drive₁₁ (в наших обозначениях Drive_{*i*}_{*j*}, *i* = 1, *j* = 1), а также чтение (импорт) значения размера с именем Distance. В наших обозначениях этому параметру соответствует фазовая переменная $z_1 = \|CA\|$ (рис. 4).

Задача экспорта данных решается сразу в двух направлениях, то есть полученные управления экспортируются в качестве входных данных как для виртуальной модели (виртуальных шаговых моторов), так и аналогичных физических устройств натурной модели.

На рисунке 8 показан фрагмент кода для экспорта данных моделирования, причем на рисунке 8а в направлении CAx SolidWorks, в частности,

```

doc->IFirstFeature(&pFeature);
while (pFeature) // Цикл по фитчерам
{
    pFeature->get_Name(&Name);
    if (Name == _T("Position")) // получение имени фитчера и проверка требу-
        емого имени
    {
        VARIANT_BOOL ret;
        pEnumDispDim = NULL;
        pFeature->Select(TRUE, &ret); //выбор текущего фитчера
        pFeatureControl = pFeature;
        pFeatureControl->EnumDisplayDimensions(&pEnumDispDim); // получе-
            ние указателя на размеры модели
        if (pEnumDispDim)
        {
            pEnumDispDim->Next(1, &pDisplayDimension, &NumberDim);
            while (NumberDim) // цикл по размерам
            {
                pDisplayDimension->IGetDimension(&pDim);
                pDim->get_FullName(&Name); // получение имени размера
                pDim->get_Value(&Value); // получение значения размера
                с именем Distance
                if (Name == _T("Distance@Position")) Distance = Value;
                // определение других требуемых параметров аналогично
                pDisplayDimension = pDisplayDimensionNext;
                pEnumDispDim->Next(1, &pDisplayDimension, &NumberDim);
            }
        }
    }
    //
    if (Name == CComBSTR(_T("Drive11"))) // Если имя фитчера Drive11
    {
        pSubFeature->GetDefinition(&pDisp);
        pDisp->QueryInterface(&pFeatureMotorData_u1);
    }
}

```

Р и с. 7. Доступ к фитчерам модели

F i g. 7. Accessing to model features

```

// Определение входных данных для мотора как
// фитчера моделирования
doc->EditSketch(); // Режим редактирования эскиза
VARIANT spData_u1; // Определение объекта
// типа Variant
SafeDoubleArray my_u1(spData_u1); // Опреде-
// ление безопасного массива
double CurrentTime = 0.0;
for (int k = 0; k <= NumberTimeLineStep; k++) //
// Цикл по времени
{
    my_u1[k] = CurrentTime;
    my_u1[k + NumberTimeLineStep + 1] = u1[k];
    // Упаковка сформированных данных
    // в массив
    CurrentTime += TimeLineStep; // Шаг по
    // времени
}
pFeatureMotorData_u1->put_SplineData(spData_u1);

GStepper< STEPPER2WIRE> stepper(steps, step,
dir); // steps – количество шагов на один обо-
// рот вала, step, dir – порт ввода-вывода общего
// назначения
k=0;
void loop()
{
    stepper.tick(); // time_step – шаг таймера
    // в миллисекундах
    static uint32_t tmr2;
    if (millis() - tmr2 > time_step)
    {
        tmr2 = millis();
        static float val;
        if (millis() == my_u1[k]*1000)
        {
            val = u1[k]; k++;
            stepper.setTarget(val); // ставим новую
            // позицию для шагового мотора
        }
    }
}

```

a)

b)

Р и с. 8. Экспорт управления в виртуальную модель и натуральный объект

F i g. 8. Export of control to virtual model and to physical object

выполняется определение исходных данных для $Drive_{11}$, то есть массив mu_u1 содержит данные табулирования функции

$$tg(\alpha_1) = \frac{uL}{1 - \frac{uH}{2}}.$$
 На рисунке 8b та же задача решается для определения входных данных для физических устройств, управляемых контроллером семейства Arduino с использованием библиотеки управления шаговыми двигателями Stepper¹¹.

Обсуждение и заключение

Разработан программно-аппаратный модуль траекторного управления интегрированной виртуальной и натурной моделью для мобильной роботизированной платформы. Выполнено тестирование алгоритмов, обеспечивающих экспоненциальную устойчивость управления для траекторий различного вида: отрезка прямой, дуги окружности, сплайна (Безье).

При этом виртуальная САД/CAE-модель позволяет исследовать состояние и поведение конструкции как многотельного объекта в различных режимах ее эксплуатации в терминах механики деформируемого твердого тела. Программно-аппаратные модули имеют открытый интерфейс и могут быть легко интегрированы в киберфизические системы управления и автономизации техники более общего

вида. При этом полученное управление как функция времени передается в виде управляющего сигнала как на виртуальные, так и на физические устройства. Программно-аппаратное обеспечение и виртуальные модели платформы предусматривают различные варианты компоновки, могут быть адаптированы к требованиям потребителя и предоставлены ему как сервис.

В части использованных алгоритмов управления и их программной реализации отсутствуют существенные различия между управлением реальным объектом, его виртуальной и натурными моделями. В этом смысле проект готов к практической реализации и внедрению в практику точного земледелия.

В качестве перспектив проекта следует указать следующие:

1. Аппаратная реализация управления самоходными базами «Пегас-Агро». Эта задача предусматривает совместную с «Пегас-Агро» разработку мехатронных систем, максимально адаптированных к конструктивным особенностям самоходных баз и технологической среде предприятия.

2. Интеграция мобильной роботизированной платформы в мультиагентную систему в качестве агента.

При этом для решения каждой из этих двух задач программное обеспечение системы управления каких-либо существенных изменений не потребует.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gorodetsky V., Skobelev P., Mařík V. System Engineering View on Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Barriers and Prospects // Cybernetics and Physics. 2020. Vol. 9, Issue 1. P. 13–30. doi: <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2020-9-1-13-30>

2. Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry [Электронный ресурс] / P. Gonzalez-de-Santos [et al.] // Agronomy. 2020. Vol. 10, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>

¹¹ Библиотека для шагового двигателя ARDUINO v2.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://alexgyver.ru/gyverstepper/> (дата обращения: 20.06.2021).

3. Real-Time 3D Unstructured Environment Reconstruction Utilizing VR and Kinect-Based Immersive Teleoperation for Agricultural Field Robots [Электронный ресурс] / Y. Chen [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
4. Matraji K., Al-Wahedi K., Al-Durra A. Higher-Order Super-Twisting Control for Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 124712–124721. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007784>
5. P+d Plus Sliding Mode Control for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot / L. R. Salinas [et al.] // International Journal of Control, Automation and Systems. 2018. Vol. 16. P. 1927–1937. doi: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0439-x>
6. Xincheng G., Zhenying L., Caihong L. Finite Time Tracking Control of Mobile Robot Based on Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode // Systems Science & Control Engineering. 2018. Vol. 6, Issue 1. P. 492–500. doi: <https://doi.org/10.1080/21642583.2018.1542636>
7. Backstepping Trajectory Tracking Based on Fuzzy Sliding Mode Control for Differential Mobile Robots / X. Wu [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2019. Vol. 96. P. 109–121. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-00980-9>
8. Research and Development in Agricultural Robotics: a Perspective of Digital Farming [Электронный ресурс] / R. R. Shamshiri [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
9. Extended Ackerman Steering Principle for the Coordinated Movement Control of a Four Wheel Drive Agricultural Mobile Robot / Q. Qiu [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 152, Issue 9. P. 40–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.036>
10. Gao G., Qin Q., Chen Sh. Turning Control of a Mobile Robot Forgreenhouse Spraying Based on Dynamic Sliding Mode Control [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14, Issue 6. doi: <https://doi.org/10.1177/1729881417744754>
11. Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot Based on Adaptive Second Order Sliding Mode Control / I. Matraji [et al.] // Control Engineering Practice. 2018. Vol. 72, Issue 3. P. 167–176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.11.009>
12. LAMDA Control Approaches Applied to Trajectory Tracking for Mobile Robots / L. Morales [et al.] // IEEE Access. 2021. Issue 9. P. 37179–37195. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062202>
13. Slawiński E., Santiago D., Mut V. Dual Coordination for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot with Time Varying Delay // IEEE Latin America Transactions. 2020. Vol. 18, Issue 10. P. 1777–1784. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387669>
14. Haptic Tele-Driving of Wheeled Mobile Robots under Non-ideal Wheel Rolling, Kinematic Control and Communication Time Delay / W. Li [et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020. Vol. 50, Issue 1. P. 336–347. doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2738670>
15. Evaluation of a Predictor-Based Framework in High-Speed Teleoperated Military UGVs / Y. Zheng [et al.] // IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2020. Vol. 50, Issue 6. P. 561–572. doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.3018684>
16. Tzafestas S. G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. Vol. 91. P. 35–58. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>
17. Rapoport L. B. Estimation of Attraction Domains in Wheeled Robot Control // Automation and Remote Control. 2006. Vol. 67. P. 1416–1435. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117906090062>
18. Gilimyanov R. F., Pesterev A. V., Rapoport L. B. Motion Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2008. Vol. 47. P. 987–994. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230708060129>
19. Rapoport L. B. The Periodic Solution of Two-Dimensional Linear Nonstationary Systems and Estimation of the Attraction Domain Boundary in the Problem of Control of a Wheeled Robot // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72. P. 2339–2347. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117911110087>
20. Pesterev A. V., Rapoport L. B. Stabilization Problem for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path on Uneven Terrain // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2010. Vol. 49. P. 672–680. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>

21. Pesterev A. V. Synthesis of a Stabilizing Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path // Automation and Remote Control. 2012. Vol. 73. P. 1134–1144. doi: <https://doi.org/10.1134/S000511791207003X>
22. Pesterev A. V., Rapoport L. B. Canonical Representation of the Path Following Problem for Wheeled Robots // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74. P. 785–801. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117913050044>
23. Mechatronic System for Fruit and Vegetables Sorting [Электронный ресурс] / P. Balabanov [et al.] // II International Scientific Conference “Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering” (18–21 November 2019). Vol. 734. Krasnoyarsk, 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012128>
24. Берестова С. А., Мисюра Н. Е., Митюшов Е. А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25, № 2. С. 254–266. URL: <http://www.mathnet.ru/links/0ee54f8b9a883b3110138244e322e405/vuu482.pdf> (дата обращения: 14.02.2021).
25. Девятчиков Е. А. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 12. С. 705–715. URL: <https://elck.ru/YK7bM> (дата обращения: 14.02.2021).
26. A General Euler Angle Error Model of Strapdown Inertial Navigation Systems [Электронный ресурс] / J. Li [et al.] // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.3390/app8010074>
27. Sekaran J., Kaluvan H., Irudhayaraj L. Modeling and Analysis of GPS–GLONASS Navigation for Car Like Mobile Robot // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2020. Issue 15. P. 927–935. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00365-1>
28. Stelian-Emilian O. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 32. P. 572–577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.254>
29. Al-Sahib N. K. A., Azeez M. Z. Build and Interface Internet Mobile Robot using Raspberry Pi and Arduino // Innovative Systems Design and Engineering. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 106–114. URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/19583>
30. Mikheenko I. S., Romanov A. M. Unified Control System for Modular Reconfigurable Robots // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (28–31 Jan. 2019). Saint Petersburg, Moscow : IEEE, 2019. P. 661–665. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656759>
31. Чугунов М. В., Полунина И. Н. Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 181–190. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>
32. Чугунов М. В., Полунина И. Н., Попков М. А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 169–186. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

Поступила 28.06.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 17.09.2021

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Рузавского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Рузавского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат педагогических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, Researcher ID: H-7473-2018, my_pk@mail.ru

Дивин Александр Георгиевич, профессор кафедры мехатроники и технологических измерений Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, agd@yandex.ru

Генералова Александра Александровна, доцент кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3900-619X>, Researcher ID: AAS-6867-2021, generalova_aa@mail.ru

Никулин Артем Анатольевич, аспирант кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1834-6053>, artem.nikulin2003@yandex.ru

Бычков Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1648-2289>, Researcher ID: AAS-5799-2021, deceptikon@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Чугунов – концепция и структура проекта, разработка моделей движения и каркаса при-
ложения.

И. Н. Полунина – 3D-моделирование деталей и сборок, разработка программного обеспечения.

А. Г. Дивин – разработка математических моделей и алгоритмов.

А. А. Генералова – разработка натурной модели.

А. А. Никулин – проведение численных экспериментов.

Д. С. Бычков – проведение натуральных экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gorodetsky V., Skobelev P., Mařík V. System Engineering View on Multi-Agent Technology for Industrial Applications: Barriers and Prospects. *Cybernetics and Physics*. 2020; 9(1):13-30. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2020-9-1-13-30>
2. Gonzalez-de-Santos P., Fernández R., Sepúlveda D., et al. Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry. *Agronomy*. 2020; 10(11). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>
3. Chen Y., Zhang B., Zhou J., et al. Real-Time 3D Unstructured Environment Reconstruction Utilizing VR and Kinect-Based Immersive Teleoperation for Agricultural Field Robots. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 175. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
4. Matraji K., Al-Wahedi K., Al-Durra A. Higher-Order Super-Twisting Control for Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot. *IEEE Access*. 2020; 8:124712-124721. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007784>
5. Salinas L.R., Santiago D., Sławiński E., et al. P+d Plus Sliding Mode Control for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2018; 16:1927-1937. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0439-x>
6. Xincheng G., Zhenying L., Caihong L. Finite Time Tracking Control of Mobile Robot Based on Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode. *Systems Science & Control Engineering*. 2018; 6(1):492-500. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/21642583.2018.1542636>
7. Wu X., Jin P., Zou T., et al. Backstepping Trajectory Tracking Based on Fuzzy Sliding Mode Control for Differential Mobile Robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019; 96:109-121. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-00980-9>
8. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A., et al. Research and Development in Agricultural Robotics: a Perspective of Digital Farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(4). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.4278>
9. Qiu Q., Fan Z., Meng Z., et al. Extended Ackerman Steering Principle for the Coordinated Movement Control of a Four Wheel Drive Agricultural Mobile Robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 152(9):40-50. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.036>
10. Gao G., Qin Q., Chen Sh. Turning Control of a Mobile Robot Forgreenhouse Spraying Based on Dynamic Sliding Mode Control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017; 14(6). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1177/1729881417744754>

Technologies and means of agricultural mechanization

11. Matraji I., Al-Durra A., Haryono A., et al. Trajectory Tracking Control of Skid-Steered Mobile Robot Based on Adaptive Second Order Sliding Mode Control. *Control Engineering Practice*. 2018; 72(3):167-176. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.11.009>
12. Morales L., Herrera M., Camacho O., et al. LAMDA Control Approaches Applied to Trajectory Tracking for Mobile Robots. *IEEE Access*. 2021; (9):37179-37195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062202>
13. Slawiński E., Santiago D., Mut V. Dual Coordination for Bilateral Teleoperation of a Mobile Robot with Time Varying Delay. *IEEE Latin America Transactions*. 2020; 18(10):1777-1784. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387669>
14. Li W., Ding L., Gao H., Tavakoli M. Haptic Tele-Driving of Wheeled Mobile Robots under Non-ideal Wheel Rolling, Kinematic Control and Communication Time Delay. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2020; 50(1):336-347. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2738670>
15. Zheng Y., Brudnak M., Jayakumar P., Stein J.L. Evaluation of a Predictor-Based Framework in High-Speed Teleoperated Military UGVs. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2020; 50(6):561-572. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.3018684>
16. Tzafestas S.G. Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018; 91:35-58. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>
17. Rapoport L.B. Estimation of Attraction Domains in Wheeled Robot Control. *Automation and Remote Control*. 2006; 67:1416-1435. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117906090062>
18. Gilimyanov R.F., Pesterev A.V., Rapoport L.B. Motion Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008; 47:987-994. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230708060129>
19. Rapoport L.B. The Periodic Solution of Two-Dimensional Linear Nonstationary Systems and Estimation of the Attraction Domain Boundary in the Problem of Control of a Wheeled Robot. *Automation and Remote Control*. 2011; 72:2339-2347. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117911110087>
20. Pesterev A.V., Rapoport L.B. Stabilization Problem for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path on Uneven Terrain. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2010; 49:672-680. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>
21. Pesterev A.V. Synthesis of a Stabilizing Control for a Wheeled Robot Following a Curvilinear Path. *Automation and Remote Control*. 2012; 73:1134-1144. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S000511791207003X>
22. Pesterev A.V., Rapoport L.B. Canonical Representation of the Path Following Problem for Wheeled Robots. *Automation and Remote Control*. 2013; 74:785-801. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117913050044>
23. Balabanov P.V., Divin A.G., Egorov A.S., Yudaev V.A. Mechatronic System for Fruit and Vegetables Sorting. In: II International Scientific Conference “Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering” (18-21 November 2019). Vol. 734. Krasnoyarsk; 2019. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012128>
24. Berestova S.A., Misyura N.E., Mityushov E.A. Kinematic Control of Vehicle Motion. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki* = Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2015; 25(2):254-266. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/0ee54f8b9a883b3110138244e322e405/vuu482.pdf> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Devyaterikov E.A. Algorithm Describing Mobile Robot Path Using the Visual Odometer Data for Automatic Returning to Operator. *Nauka i obrazovanie. MG TU im. N. E. Bauman* = Science & Education. Bauman MSTU. 2014; (12):705-715. Available at: <https://clck.ru/YK7bM> (accessed 14.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Li J., Dang P., Li Y., Gu B. A General Euler Angle Error Model of Strapdown Inertial Navigation Systems. *Applied Sciences*. 2018; 8(1). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/app8010074>
27. Sekaran J., Kaluvan H., Irudhayaraj L. Modeling and Analysis of GPS-GLONASS Navigation for Car Like Mobile Robot. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020; (15):927-935. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00365-1>
28. Stelian-Emilian O. Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation. *Procedia Manufacturing*. 2019; 32:572-577. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.254>

29. Al-Sahib N.K.A., Azeez M.Z. Build and Interface Internet Mobile Robot using Raspberry Pi and Arduino. *Innovative Systems Design and Engineering*. 2015; 6(1):106-114. (In Eng.) URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/19583>

30. Mikheenko I.S., Romanov A.M. Unified Control System for Modular Reconfigurable Robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (28-31 Jan. 2019). Saint Petersburg, Moscow: IEEE; 2019. p. 661-665. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656759>

31. Chugunov M.V., Polunina I.N. Interdisciplinary Modelling of Robots Using CAD/CAE Technology. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(2):181-190. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.181-190>

32. Chugunov M.V., Polunina I.N., Popkov M.A. The Quadcopter Design Based on Integrated Model Environment. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(2):169-186. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>

Submitted 28.06.2021; approved after reviewing 10.08.2021; accepted for publication 17.09.2021

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Head of the Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor of the Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Ped.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, Researcher ID: H-7473-2018, my_pk@mail.ru

Alexander G. Divin, Professor of the Chair of Mechatronics and Technological Measurement, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), Dr.Sci (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, agd@yandex.ru

Aleksandra A. Generalova, Associate Professor the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3900-619X>, Researcher ID: AAS-6867-2021, generalova_aa@mail.ru

Artem A. Nikulin, Postgraduate Student of the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1834-6053>, artem.nikulin2003@yandex.ru

Dmitriy S. Bychkov, Postgraduate Student of the Chair of Transport Machinery, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1648-2289>, Researcher ID: AAS-5799-2021, deciptikon@mail.ru

Contributions of the authors:

M. V. Chugunov – concept and structure of the project, development of traffic models and the application framework.

I. N. Polunina – 3D modeling of parts and assemblies, software development.

A. G. Divin – development of mathematical models and algorithms.

A. A. Generalova – development of the field model.

A. A. Nikulin – numerical experiments.

D. S. Bychkov – conducting field experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.