



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-91-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.942

МЕТОДИКА МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

М. М. ТАТУР, Н. С. ИГНАТЮК, А. Д. КОНИКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 17.11.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Предложена формализованная методика модельно-ориентированного проектирования алгоритмов управления мобильными роботами. В основу методики положен альтернативный подход к разработке, когда сначала создается модель объекта управления, как инструмент проектирования, а затем разрабатываются алгоритмы управления. Это позволяет в процессе модельно-ориентированного проектирования найти наиболее удачные алгоритмы и подобрать параметры управления, близкие к оптимальным. В качестве примеров рассмотрены две типовые задачи из области управления мобильными платформами – управление торможением и рулением. Предложенная методика обладает достаточной унификацией, чтобы быть использованной при проектировании алгоритмов управления мобильными роботами различных типов, с разными системами позиционирования, принципами навигации и автопилотирования.

Ключевые слова: алгоритм управления, математическая модель объекта управления, модельно-ориентированное проектирование, системный анализ, адекватность модели, имитационное моделирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Татур, М. М. Методика модельно-ориентированного проектирования алгоритмов управления мобильными роботами / М. М. Татур, Н. С. Игнатюк, А. Д. Коников // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 91–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-91-99>.

METHODOLOGY FOR MODEL-BASED DESIGN OF MOBILE ROBOTS CONTROL ALGORITHMS

MIKHAIL M. TATUR, MIKITA S. IHNATSIUK, ALEKSANDR D. KONIKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.11.2023

Abstract. This article proposes the formalized methodology for model-based design of mobile platform management systems. The methodology is based on an alternative approach to development, when the model of controlled object is firstly created as a design tool, and then control algorithms are developed. This allows to find the most successful algorithms and select control parameters that are close to optimal in the process of model-based design. As examples, two typical tasks from the field of mobile platform management are given - braking and steering control. The proposed methodology has sufficient unification to be used in the design of control systems for mobile platforms of various types, with different positioning systems, principles of navigation and autopiloting.

Keywords: control algorithm, mathematical model of the controlled object, model-based design, system analysis, adequacy of the model, imitational modeling.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Tatur M. M., Ihnatsiuk M. S., Konikov A. D. (2024) Methodology for Model-Based Design of Mobile Robots Control Algorithms. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 91–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-91-99> (in Russian).

Введение

При разработке алгоритмов управления (рулением, трансмиссией, акселерацией, торможением, положением в пространстве и др.) мобильным роботом необходимо учитывать множество факторов, таких как положение робота относительно текущей точки маршрута, текущий угол поворота, скорость движения, угловая скорость поворота, объективные ограничения на досягаемость точки маршрута и многое другое. Очевидно, что результатом разработки может быть широкий спектр алгоритмов управления, основанных на различных эвристиках, с разными внутренними и внешними параметрами. В большинстве опубликованных работ по данной тематике [1–3], как правило, приводится финальный алгоритм управления конкретным агрегатом или определенным аспектом движения мобильного робота в целом, а затем – результаты моделирования либо реализации, подтверждающие его эффективность. Авторы настоящей статьи исходят из того, что разработка алгоритма управления является трудоемким итерационным процессом, связанным как с выдвижением идеи, математическим описанием, так и с его реализацией. Как в ходе разработки проверять адекватность моделей и осуществлять параметрическую оптимизацию? Этот вопрос нечасто подымается в публикациях, однако его актуальность не подлежит сомнению.

Важным шагом на пути решения проблем проектирования сложных систем стала стандартизация общих положений в сфере компьютерного моделирования и разработки цифровых двойников изделий [4]. Для того чтобы в процессе разработки выйти на наиболее удачные алгоритмы и подобрать параметры, близкие к оптимальным, необходимо процесс разработки сопровождать имитационным компьютерным моделированием. Данный подход известен как модельно-ориентированное проектирование (МОП). МОП сложных систем позволяет на ранних этапах разработки получить количественные и качественные оценки создаваемого технического решения [5], а в целом – повысить качество и снизить затраты на разработку. В настоящее время методология МОП приобретает все большую популярность среди разработчиков, а ресурс www.exponenta.ru является одним из активных организаторов в ее продвижении. Однако и здесь приоритет отдается получению конкретных технических решений, а методический аспект МОП остается без должного внимания.

Цель исследований авторов – формализация методики МОП применительно к разработке алгоритмов управления мобильными роботами. Для наглядности методика продемонстрирована на несложных (академических) примерах. Она может быть применена для проектирования систем управления широкого ряда исполнительных устройств и различных типов беспилотных средств.

Формализация методики модельно-ориентированного проектирования

Процесс проектирования рассматривают с позиций восходящей (компилятивной) либо нисходящей (от общего к частному) стратегии и обычно разделяют на ряд условных уровней. В статье рассмотрено МОП в классическом (нисходящем) варианте с делением на два уровня: верхний – системное (алгоритмическое) проектирование и нижний – собственно разработка программно-аппаратных средств.

В ходе системного проектирования закладываются основы будущей системы, исследуются различные концепции (подходы, принципы, методы) ее построения с последовательным уточнением постановки задачи, детализацией технических требований и ограничений, чтобы выбрать наиболее удачные решения. На нижнем уровне разрабатывается конкретное техническое решение, как частный случай из множества возможных вариантов реализации, отличающихся технико-эксплуатационными параметрами. МОП можно (и нужно) применять на обоих уровнях проектирования, но в данной статье сделан акцент на системный уровень. Именно на нем обычно возникают сложности в разработке у малоопытных специалистов, а ошибки проектирования обходятся наиболее дорого. Предлагаемая методика МОП включает следующие шаги.

М1. Представить задачу проектирования в виде обобщенной модели, где алгоритм управления взаимодействует с моделью объекта управления (рис. 1). Полагается, что модель объекта управления учитывает влияние внешней среды, т. е. на данном этапе нецелесообразно их дифференцировать. В последующем такое разделение возможно.

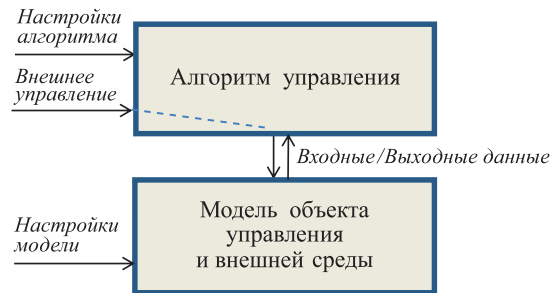


Рис. 1. Обобщенная модель постановки задачи модельно-ориентированного проектирования системы управления

Fig. 1. Generalized model for setting the problem of model-based design of a control system

Как видно из рис. 1, иногда (в образовательных целях, и не только) полезно в модель включить вход внешнего управления, например, оператором-экспертом. Как будет показано далее, это позволяет лучше понимать состав обобщенной модели – как модель объекта управления и внешней среды и, собственно, модель разрабатываемого алгоритма управления.

М2. Сформулировать задачу моделирования. Именно этот шаг является определяющим в спецификации входных и выходных данных, выборе уровня абстрагирования объекта управления и, в конечном итоге, в построении модели.

М3. Выбрать инструмент моделирования. В качестве таковых могут быть как универсальные средства исследователей (Mathcad, MathLab, Simulink), так и профессиональные (Python, TensorFlow и т. п.), в зависимости от исследуемой предметной области и выбранного для реализации подхода в МОП.

М4. Реализовать модель, выполнить моделирование. На данном шаге рекомендуется сначала разработать и протестировать модель объекта управления и внешней среды, а затем разрабатывать и отлаживать различные варианты алгоритмов управления.

М5. Интерпретировать результаты моделирования. В результате моделирования нужно дать научно обоснованный ответ на вопрос, сформулированный в М2, и обосновать адекватность результатов моделирования. Следует заметить, что именно сравнение различных вариантов алгоритмов, полученных в ходе разработки, позволяет обнаружить скрытые закономерности и найти наиболее рациональные (или даже оптимальные) технические решения.

Далее продемонстрируем предложенную методику на конкретных примерах, начиная с наиболее простых, с постепенным усложнением моделей и задач моделирования.

Моделирование торможения мобильной платформы

Рассмотрим классический процесс торможения мобильной платформы за счет «нажатия на педаль» с усилием F в условиях прямолинейного движения платформы по горизонтальной поверхности [5]. Исходные данные в задаче – начальная скорость платформы $v(0)$ и расстояние до препятствия $S(0)$. Необходимо разработать (и промоделировать) алгоритм управления торможением. Платформа должна плавно остановиться в непосредственной близости от препятствия. Пусть алгоритм управления торможением A постоянно получает текущие значения скорости $v(t)$ и расстояния $S(t)$, оставшегося до препятствия от соответствующих сенсоров, и вычисляет усилие F , прикладываемое к системе торможения (рис. 2). Изменение скорости и расстояния показано на рис. 3. Задача моделирования состоит в оценке качества алгоритма управления торможением (М1, М2). Будем полагать, что замедление (ускорение) a в нормальных условиях пропорционально силе нажатия на педаль тормоза F . Коэффициент пропорциональности k позволяет на начальном этапе исследований абстрагироваться от ряда факторов, таких как масса платформы, инерция, техническое состояние тормозной системы и т. п.

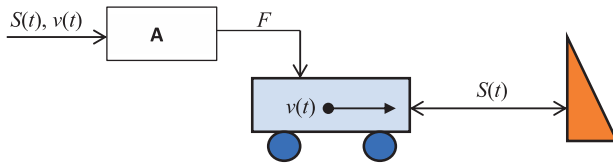


Рис. 2. Визуализация постановки задачи управления торможением
Fig. 2. Visualization of the formulation of the braking control problem

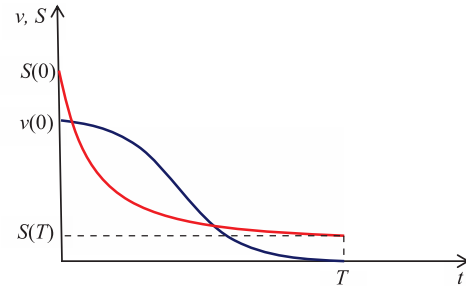


Рис. 3. Изменение скорости (синяя линия) и расстояния (красная линия)
Fig. 3. Change in speed (blue line) and distance (red line)

Как следствие, модель движения платформы может быть представлена общеизвестными соотношениями равнозамедленного движения. Как видно из приведенных ниже выражений, показания датчиков скорости и расстояния, оставшегося до препятствия, эмулируются вычислением соответствующих формул:

$$\begin{cases} a = kF; \\ v(t) = v(t-1) - a\Delta t; \\ \Delta x = v(t)\Delta t - a\left(\frac{\Delta t^2}{2}\right); \\ S(t) = S(t-1) - \Delta x, \end{cases} \quad (1)$$

где Δt – дискретное модельное время.

Для оценки качества алгоритма торможения воспользуемся следующей эвристикой. Будем считать, что имеется возможность выполнить торможение экспертом с использованием опции «внешнее управление» (рис. 1). При этом модель движения платформы сформирует (рассчитает) графики изменения скорости и расстояния, как показано на рис. 3. График изменения скорости (синяя линия) характеризует плавность торможения, а расстояния (красная линия) – «непосредственную близость» остановки платформы до препятствия, платформа плавно остановится через время T на расстоянии $S(T)$ от препятствия.

Используя модель (1) как инструмент МОП, можно приступать к разработке алгоритмов управления $F = f(v(t), S(t))$. При этом разработчик может применять методы как из теорий автоматического управления, нечетких множеств и других, так и произвольные эвристики. Значимость модели (1) состоит в том, что разработанные алгоритмы можно исследовать, построив графики $v(t)$, $S(t)$, сравнивая их между собой и с эталонными. Далее можно исследовать, как будут работать алгоритмы торможения в условиях различных начальных скоростей $v(0)$ и расстояний $S(0)$.

Следующим этапом исследований разработанных алгоритмов может стать постепенное усложнение модели объекта управления. Например, в реальных системах торможения сила нажатия на педаль F пропорциональна замедлению a только в очень ограниченных рамках. Поэтому несложно ввести ограничение на силу нажатия на педаль

$$F = f(v(t), S(t)) < \text{limit}, \quad (2)$$

а вместо постоянного коэффициента пропорциональности k применить переменный коэффициент на интервалах 0–30 %, 30–70 % и 70–100 % от максимального усилия:

$$k = \begin{cases} 0,5k, & \text{если } F = (0-30\%) \text{ limit}; \\ k, & \text{если } F = (30-70\%) \text{ limit}; \\ 0,3k, & \text{если } F = (70-100\%) \text{ limit}. \end{cases} \quad (3)$$

Напомним, что разработанный алгоритм управления должен стремиться отработать графики $v(t)$ и $S(t)$ близко к эталонному варианту. Следуя логике усложнения модели, эмулируем ситуацию, когда платформа на какое-то время $t_1 < t < t_2$ потеряла сцепление с дорогой:

$$k = \begin{cases} 0,5k, & \text{если } t < t_1; \\ 0, & \text{если } t_1 < t < t_2; \\ 0,3k, & \text{если } t > t_2. \end{cases} \quad (4)$$

«Умный» алгоритм должен справиться с такой ситуацией, если объективные условия (текущая скорость, оставшееся расстояние до препятствия и коэффициент k) позволяют это сделать. В [6] рассмотрен один из возможных алгоритмов управления торможением и приведены результаты модельных экспериментов, которые показывают реагирование на «нулевое торможение» и запаздывание срабатывания тормозной системы (рис. 4).

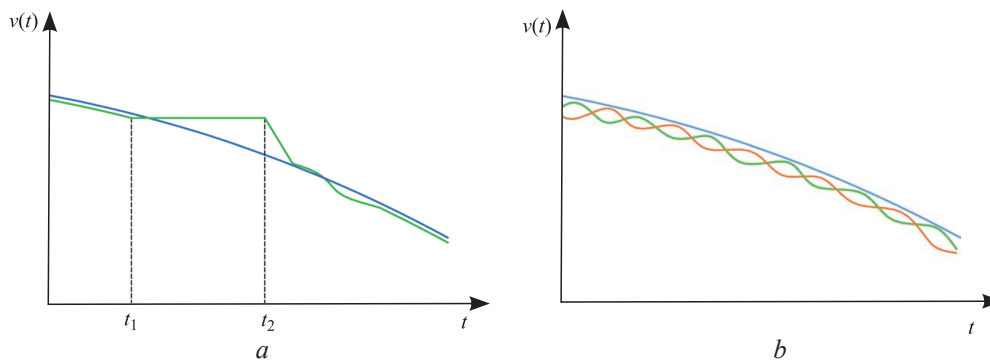


Рис. 4. Результаты моделирования алгоритма управления торможением (фрагмент):
a – эффект отсутствия сцепления колес платформы с дорогой в промежуток времени (t_1, t_2) ;
b – эффект запаздывания срабатывания системы торможения

Fig. 4. Results of modeling the braking control algorithm (fragment):
a – the effect of the lack of adhesion between the platform wheels and the road in the period of time (t_1, t_2) ;
b – delayed response effect of the braking system

Как видно из рис. 4, *a*, после обретения сцепления с дорогой (в момент t_2) алгоритм стремится компенсировать потерянное время торможения (зеленая линия) и приблизиться к эталону (синяя линия). Рассмотрим еще один вариант усложненной модели движения платформы. Общеизвестно, что реальные системы торможения имеют определенное время срабатывания τ с момента нажатия на педаль до начала торможения. С целью эмуляции такого запаздывания в модель следует ввести параметр τ , как дополнительное модельное время при рекуррентном вычислении текущих значений $v(t)$, $S(t)$. На рис. 4, *b* проиллюстрирована реакция системы торможения на различные реализации алгоритмов управления (зеленая и оранжевая линии) относительно идеализированной версии без задержек (синяя линия).

Напомним, что в статье не рассматриваются конкретные алгоритмы управления торможением, оптимизация регуляторов и не вводятся специальные метрики сравнительной оценки динамики отработки алгоритмов, поскольку это не ставилось целью данной публикации. Предлагаемая методика является лишь инструментом, позволяющим (точнее, помогающим) осуществлять сравнительный анализ и оптимизацию разрабатываемых алгоритмов управления.

Моделирование руления мобильной платформы

Пусть четырехколесная мобильная платформа осуществляет руление за счет поворота передних колес на угол φ относительно продольной оси платформы, а навигация осуществляется по заданному маршруту в прямоугольной системе координат. Колесная база платформы L , скорость $v(t)$, текущие координаты платформы и очередной точки маршрута известны. Визуализация постановки задачи управления рулением представлена на рис. 5. Математическая модель движения платформы в целом известна, нужно лишь адаптировать ее к оригинальной форме изложения и дополнить некоторыми пояснениями. Так, общеизвестной практикой упрощения кинематической схемы четырехколесной платформы является рассмотрение одной пары – переднего и заднего колес [7]. При разработке модели управления рулением важно определять не только координаты платформы, но и положение продольной оси в пространстве. Для этого необходимо

вычислять либо угол наклона Q оси в заданной (в рассматриваемом случае прямоугольной) системе координат либо определять координаты как переднего $(x_{п}, y_{п})$, так и заднего $(x_{з}, y_{з})$ колес. В простейшем случае разработка (или настройка) алгоритмов управления рулением будет сводиться к определению направления $Dir \{Left, Right\}$ и продолжительности руления (поворота колес) t_p , полагая, что угловая скорость поворота постоянна $|w_p| = const$, так, чтобы мобильный робот с известными координатами $x_{п}, y_{п}, x_{з}, y_{з}$ достиг текущей точки маршрута x_i, y_i , т. е. $Dir = f_1(x_{п}, y_{п}, x_{з}, y_{з}, x_i, y_i)$, $t_p = f_2(x_{п}, y_{п}, x_{з}, y_{з}, x_i, y_i)$.

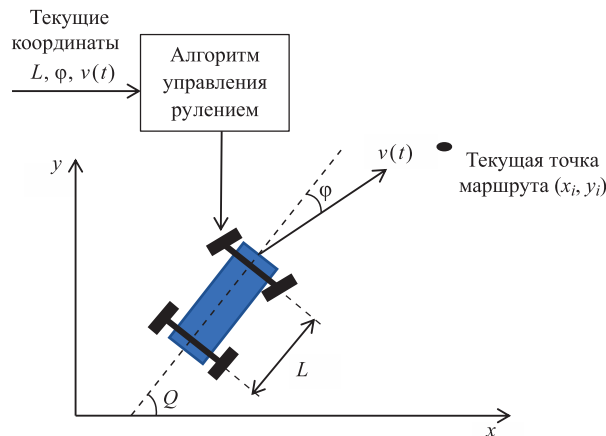


Рис. 5. Визуализация постановки задачи управления рулением
Fig. 5. Visualization of the steering control problem formulation

Пусть начальное положение платформы в пространстве задано координатами переднего и заднего колес соответственно $(x_{п0}, y_{п0}, x_{з0}, y_{з0})$, известна линейная скорость движения платформы $v(t)$, которую для простоты модели примем постоянной, известен начальный угол поворота колес относительно продольной оси платформы ϕ_0 . Таким образом, при построении модели движения платформы входными параметрами являются направление $Dir \{Left, Right\}$ и продолжительность поворота колес t_p , а выходными параметрами – координаты переднего и заднего колес мобильной платформы $x_{п}, y_{п}, x_{з}, y_{з}$.

На рис. 6 представлена кинематическая схема движения платформы для пояснения геометрических вычислений выходных данных $x_{п}, y_{п}, x_{з}, y_{з}$, где сохранены обозначения осей системы координат и углов ϕ, Q , как на рис. 5.

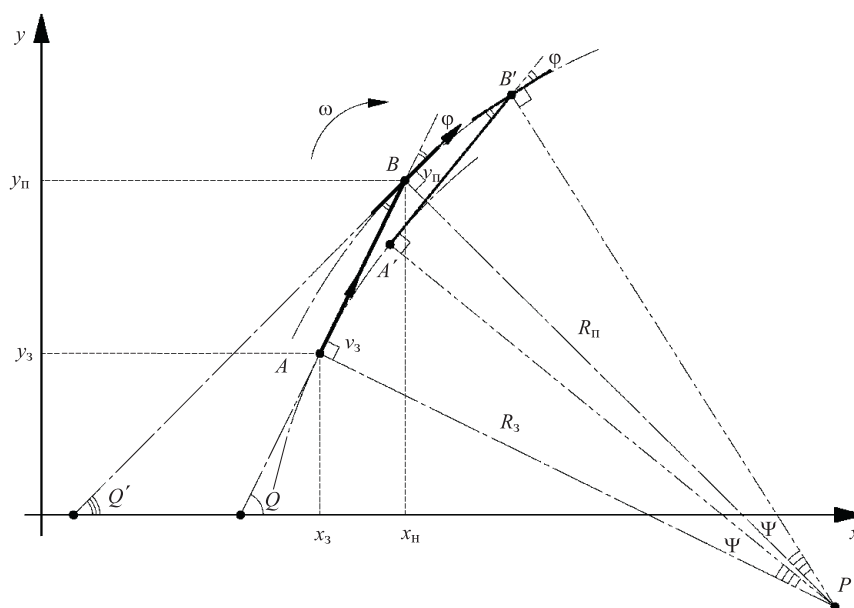


Рис. 6. Кинематическая схема движения платформы
Fig. 6. Kinematic diagram of platform movement

Колесная база платформы L обозначена отрезком AB . Известно, что если угол поворота колес $\varphi = \text{const} \neq 0$ и $v(t) = \text{const}$, то платформа будет двигаться по окружности с постоянной угловой скоростью ω . Для нахождения центра такой окружности проведем перпендикуляры к векторам скоростей заднего и переднего колес через их оси вращения. Точка пересечения перпендикуляров P будет точкой, относительно которой осуществляется поворот платформы, или мгновенным центром вращения.

За основу математической модели брали классическую формулу вычислений координат движения точки в прямоугольной системе координат и применяли отдельно для вычисления координат переднего и заднего колес, причем в качестве угла α для заднего колеса выступал угол Q , а переднего – угол Q' :

$$\begin{cases} x = x_0 + v \cos(\alpha) \Delta t; \\ y = y_0 + v \sin(\alpha) \Delta t. \end{cases} \quad (5)$$

При $\varphi \neq 0$ скорости переднего и заднего колес будут различными, что необходимо учитывать при вычислениях. Чем меньше будут скорость и модельное время Δt , тем меньше будет погрешность вычислений. Исходные данные позволяют вычислить радиусы окружностей движения переднего и заднего колес, соответствующие линейные скорости, угловую скорость поворота платформы вокруг центра окружностей P , а также угол поворота платформы Ψ в любой момент времени:

$$\begin{cases} Q = \arccos\left(\frac{x_{\text{п}} - x_3}{L}\right); \\ R_3 = \frac{L}{\tan \varphi}; \\ \frac{R_3}{R_{\text{п}}} = \cos \varphi; \\ v_{\text{п}} = \frac{v_3}{\cos \varphi}; \\ \omega = \frac{v_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} = \frac{v_3}{R_3}; \\ \Psi = \omega t. \end{cases} \quad (6)$$

Этого достаточно, чтобы подставить необходимые переменные в (5) и получить выходные данные:

$$\begin{cases} x_{\text{п}} = x_{\text{п}0} + v_{\text{п}} \cos(\pm Q + \varphi + \Psi) \Delta t; \\ y_{\text{п}} = y_{\text{п}0} + v_{\text{п}} \sin(\pm Q + \varphi + \Psi) \Delta t; \\ x_3 = x_{30} + v_3 \cos(\pm Q + \Psi) \Delta t; \\ y_3 = y_{30} + v_3 \sin(\pm Q + \Psi) \Delta t, \end{cases} \quad (7)$$

где $Q = \begin{cases} +Q, & \text{если } y_{\text{п}0} \geq y_{30}; \\ -Q, & \text{если } y_{\text{п}0} < y_{30}. \end{cases}$

При моделировании разрабатываемых алгоритмов управления будет изменяться угол поворота колес. В статическом варианте управления, если во время поворота скорость платформы $v = 0$, угол поворота колес:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_0 + \omega_p t_p, & \text{если } Dir = Left; \\ \varphi_0 - \omega_p t_p, & \text{если } Dir = Right. \end{cases} \quad (8)$$

В динамике, когда платформа движется, угол поворота рассчитывается в каждый интервал модельного времени Δt :

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_0 + \omega_p \Delta t, & \text{если } Dir = Left; \\ \varphi_0 - \omega_p \Delta t, & \text{если } Dir = Right. \end{cases} \quad (9)$$

Приведенные соотношения (5)–(9) составляют математическую модель движения платформы при рулении передними колесами. Этого достаточно, чтобы моделировать сложные алгоритмы управления рулением, включая изменение линейной скорости и угловой скорости поворота колес. Данная математическая модель не является единственной, возможны и другие способы вычислений. Если будет использоваться локальная (оптическая) система позиционирования или другая система координат, либо другой способ руления, то математическая модель будет совершенно иная.

Заключение

1. Предложена формализованная методика модельно-ориентированного проектирования, которая апробирована на типовых задачах управления мобильными роботами.

2. Принципиальное отличие методики состоит в том, что сначала разрабатывается модель внешней среды, как инструмент проектирования, а затем – алгоритмы управления. С использованием данного подхода исследования будут продолжены в следующих направлениях: разработка аналогичных актуальных моделей управления движением, например, для мобильных платформ с дифференциальным управлением руления, а также для некоторых типов летательных аппаратов; интеграция отдельных моделей управления рулением, торможением, акселерацией в общую модель для разработки и исследования различных программ автопилотирования [8, 9]; использование инновационных (локальных и комбинированных) способов позиционирования, альтернативных GPS; включение в данную методику элементов аппаратной реализации, так называемого Hardware In Loop (HIL-technique), и цифровых двойников [4, 10]; моделирование, исследование известных и разработка оригинальных инновационных алгоритмов управления.

Список литературы

1. Тимофеев, А. Н. Навигация автономного мобильного робота на основе адаптивного нейронечеткого контроллера / А. Н. Тимофеев, Ф. Дасеф // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 6. С. 268–272.
2. Тарасик, В. П. Методика имитационного моделирования режима испытаний на управляемость и устойчивость автомобиля при входе в поворот / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. 2019. № 2. С. 44–53.
3. Chi, Zhang. Noboru Noguchi Development of Robot Tractor Associating with Human-Drive Tractor for Farm Work / Chi Zhang, Liangliang Yang, Ze Zhang // 5th IFAC Conference on Bio-Robotics. 2013. Vol. 46, Iss. 4. P. 83–88. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00022>.
4. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: ГОСТ Р 57700.37–2021. Введ. 01.01.2022. М.: Российс. ин-т стандарт., 2021.
5. Татур, М. Учебная задача моделирования системы управления торможением мобильной роботизированной платформы / М. Татур, М. Лукашевич, М. Шавердо // Space Engineering, Technologies & Exploration Anthology of Scientific Research Papers: Applied Curricula in Space Exploration and Intelligent Robotic Systems. Berlin, 2018. P. 109–115.
6. Method of Reducing the Computational Complexity of Fuzzy Inference Algorithms for Implementation on a Microcontroller with Limited Computational Resources / M. G. Zhartybayeva [et al.] // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2019. Vol. 7, Iss. 1. P. 65–78.
7. Gerdts, M. Solving Mixed-Integer Optimal Control Problems by Branch&Bound: A Case Study from Automobile Test-Driving with Gear Shift / M. Gerdts // Optimal Control Applications and Methods. 2005. No 26. P. 1–18.
8. Степанов, Д. Н. Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров / Д. Н. Степанов, Е. Ю. Смирнова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 11. С. 752–757. DOI: 10.17587/mau.18.752-757.
9. Зенкевич, С. Л. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» / С. Л. Зенкевич, Хуа Чжу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 1. С. 30–34. DOI: 10.17587/mau.18.30-34.
10. Моделирование алгоритмов управления автоматических трансмиссий по обеспечению плавного включения передач / А. В. Белевич [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. Радиотехника. 2013, № 2. С. 40–44.

References

1. Timofeev A. N., Daeef F. (2021) Navigation of an Autonomous Mobile Robot Based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Controller. *Automation. Modern Technologies.* (6), 268–272 (in Russian).
2. Tarasik V. P. (2019) Methodology for Simulation Testing of the Test Mode for Controllability and Stability of a Car When Entering a Turn. *Bulletin of the Belarusian-Russian University.* (2), 44–53 (in Russian).
3. Chi Zhang, Liangliang Yang, Ze Zhang (2013) Noboru Noguchi Development of Robot Tractor Associating with Human-drive Tractor for Farm Work. *5th IFAC Conference on Bio-Robotics.* 46 (4), 83–88. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00022>.
4. State Standard GOST R 57700.37–2021. *Computer Models and Simulation. Digital Twins of Products. General Provisions.* Moscow, Russian Institute of Standardization (in Russian).
5. Tatur M., Lukashevich M., Shaverdo M. (2018) Training Task of Modeling the Braking Control System of a Mobile Robotic Platform. *Space Engineering, Technologies & Exploration Anthology of Scientific Research Papers: Applied Curricula in Space Exploration and Intelligent Robotic Systems.* Berlin. 109–115.
6. Zhartybayeva M. G., Tatur M. M., Shaverdo M. M., Iskakov K. T. (2019) Method of Reducing the Computational Complexity of Fuzzy Inference Algorithms for Implementation on a Microcontroller with Limited Computational Resources. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications.* 7 (1), 65–78.
7. Gerdts M. (2005) Solving Mixed-Integer Optimal Control Problems by Branch&Bound: A Case Study from Automobile Test-Driving with Gear Shift. *Optimal Control Applications and Methods.* (26), 1–18.
8. Stepanov D. N., Smirnova E. Yu. (2017) Method for Correcting the Assessment of the Position of a Mobile Robot Using Visual Location of Natural Landmarks. *Mechatronics, Automation, Control.* 18 (11), 752–757. DOI: 10.17587/mau.18.752-757 (in Russian).
9. Zenkevich S. L., Hua Zhu (2017) Control of the Movement of a Group of Robots in a “Convoy” Formation. *Mechatronics, Automation, Control.* 18 (1), 30–34. DOI: 10.17587/mau.18.30-34 (in Russian).
10. Belevich A. V., Lutsky V. I., Odinets D. N., Tatur M. M., Nguyen Trung Tin, Duong Quoc Hoang (2013) Modeling Control Algorithms for Automatic Transmissions to Ensure Smooth Gear Shifting. *Neurocomputers: Development, Application. Radio Engineering.* (2), 40–44 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Татур М. М., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронных вычислительных машин, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Игнатюк Н. С., магистрант каф. проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Коников А. Д., асп. каф. электронных вычислительных машин, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-64
E-mail: tatur@bsuir.by
Татур Михаил Михайлович

Information about the authors

Tatur M. M., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at Electronic Computing Machines Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Ihnatsiuk M. S., Master Student at the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Konikov A. D., Postgraduate at Electronic Computing Machines Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-64
E-mail: tatur@bsuir.by
Tatur Mikhail Mikchailovich