

Научная статья
УДК 004.896
doi:10.35694/YARCX.2024.67.3.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ИСКУССТВЕННЫМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ПОЛЕМ

Артем Сергеевич Угловский

Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Реферат. В данной научной статье предложена методология, основанная на использовании виртуальных полей для управления движением робота, а линии напряжённости определяют правильные траектории для движения. Для моделирования системы управления была применена среда разработки Matlab, которая позволила разработать двухконтурную систему управления, регулирующую как направление, так и скорость движения робота в соответствии с заданными траекториями. Эта методология обеспечивает более точный и гибкий подход к управлению мобильными роботами в различных средах. Исследование показало, что предложенная методология управления движением робота с использованием силы притяжения и ограничения угловой скорости, обеспечивает эффективное движение в рабочем пространстве с препятствиями. Однако на практике наблюдаются ошибки локализации, особенно при изменении ориентации и поворотах, что может привести к неспособности робота избежать препятствий и достичь конечного пункта назначения. Эти ошибки, накапливаемые локализацией Рунге-Кутты, требуют дальнейшего изучения и улучшения для повышения точности и надёжности системы управления. Предложенная стратегия управления движением мобильных роботов, основанная на информационных искусственных потенциальных полях, успешно обеспечивает целенаправленное движение с обходом препятствий. Двухконтурная система управления, регулирующая скорость и направление, показала высокую эффективность в моделировании движения робота в среде Matlab. Результаты моделирования подтверждают применимость и эффективность новой методологии в реальных условиях, что открывает новые возможности для развития автономных систем управления в робототехнике.

Ключевые слова: планирование пути, мобильный робот, дифференциальный привод, препятствия, энкодер

MOBILE ROBOT PATH PLANNING STUDY WITH ARTIFICIAL POTENTIAL FIELD

Artem S. Uglovskiy

Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Abstract. This scientific article proposes a methodology based on the use of virtual fields to control the movement of the robot, and the lines of tension determine the correct trajectories for movement. To simulate the control system, the Matlab development environment was used, which made it possible to develop a two-circuit control system that regulates both the direction and speed of the robot's motion in accordance with the given trajectories. This methodology provides a more precise and flexible approach to controlling mobile robots in different environments. The study showed that the proposed methodology for controlling the movement of the robot using the attractive power and limiting the angular rate, provides effective movement in the operating space with obstacles. However, localization errors are observed in practice, especially when changing orientation and turning, which can lead to the inability of the robot to avoid obstacles and reach its final destination. These errors accumulated by the localization of Runge-Kutta require further study and improvement to increase the accuracy and reliability of the control system. The proposed strategy for controlling the movement of mobile robots, based on information artificial potential fields, successfully provides goal directed movement while avoiding obstacles. A two-circuit control system that regulates speed and direction has shown high efficiency in simulating robot motion in a Matlab environment. The modeling results confirm the applicability and effectiveness of the new methodology in real conditions, which opens up new opportunities for the development of autonomous control systems in robotics.

Keywords: path planning, mobile robot, differential drive, obstacles, encoder

Введение. В наши дни мобильные роботы вошли в различные сферы деятельности. Чаще всего используются роботы с тремя [1–3] или четырьмя колёсами, оснащённые разными видами приводов. Роботы с дифференциальным приводом считаются наиболее универсальными и подходящими для нужд аграрного сектора. Существует множество исследований, посвящённых вопросам управления такими роботами с контролем угла поворота [4; 5], однако без конкретного заданного маршрута, что особенно важно при создании адаптивных роботизированных систем в сельском хозяйстве. В связи с важностью, которую приобретают эти системы в современном мире, большое количество компаний финансируют проекты по оптимизации стоимости и производительности таких роботов. Достаточно полное представление о современном состоянии метода и особенностях его применения в робототехнике дают работы [3–11].

Проблематика статьи заключается в представлении планирования движения мобильного робота в определённой среде с известными препятствиями. В статье представлен модуль локализации, используемый для понимания того, как робот движется в окружающей среде. Представлено создание модели в среде Simulink, используемой для моделирования мобильного робота.

Модель робота описывается уравнениями:

$$\dot{x} = \cos(\theta) v, \quad (1)$$

$$\dot{y} = \sin(\theta) v, \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega, \quad (3)$$

В качестве входных данных используются скорости правого и левого колёс, ω_r и ω_l . Взаимосвязь между линейной и угловой скоростью и скоростями каждого из колёс можно выразить следующим образом:

$$v = r \frac{\omega_r + \omega_l}{2}, \quad (4)$$

$$\omega = r \frac{\omega_r - \omega_l}{2d}, \quad (5)$$

где r – радиус колёс; d – расстояние между центрами колёс; θ – угол поворота робота; v – линейная скорость робота; ω – угловая скорость.

Материалы и методы исследований. Для исследования планирования пути мобильного робота с искусственным потенциальным полем использовалась программа Matlab/Simulink, а для написания программы для микроконтроллера – Arduino IDE.

Аппаратное обеспечение, кроме ПК, использовалось следующее:

- плата Arduino Mega в качестве микроконтроллера;
- Ada-fruit Motor Shield – для управления двигателями напрямую через задание скорости без учёта входных напряжений и ШИМ;

- четыре двигателя, каждый из которых имеет инкрементальный энкодер и колесо;

- модуль Bluetooth Arduino HC-06 – для осуществления связи с другими устройствами.

Цель данной научной статьи заключается в определении оптимальных параметров регулятора мобильного робота. Данный регулятор позволит роботу выбирать соответствующий путь, имея некоторую информацию о рабочем пространстве.

Использование искусственного потенциального поля позволит роботу определять оптимальный маршрут в реальном времени, учитывая расположение препятствий в среде.

Мобильные сельскохозяйственные роботы часто используют искусственное потенциальное поле для ориентации и навигации в сложных сельскохозяйственных условиях. Данное поле создаётся с помощью специальных алгоритмов и датчиков, которые позволяют роботу определять оптимальный путь движения.

Метод вероятностной дорожной карты (ВДК) – это метод планирования движения мобильных роботов, который позволяет им ориентироваться в пространстве и находить оптимальные пути для перемещения. Этот метод основан на концепции искусственного потенциального поля.

Концепция искусственного потенциального поля состоит в том, чтобы создать силы притяжения, которые заставят робот двигаться в желаемом направлении, и силы отталкивания, соответствующие препятствиям, которые заставят робот избегать их. Таким образом, общий потенциал представляет собой сумму полей притяжения и отталкивания, а отрицательный градиент этого потенциала указывает направление движения.

В методе искусственного потенциального поля робот представляет своё окружение в виде поля сил, где каждая точка пространства характеризуется определённой силой. Эти силы могут быть двух типов:

1. Притягивающие силы – направлены к целевой точке или области, которую робот должен достичь.

2. Отталкивающие силы – возникают вокруг препятствий и препятствуют роботу приближаться к ним.

Для поля притяжения используется комбинация двух полей: параболического и конического. Параболоид удобен для использования вблизи желаемого конечного положения. Итак, потенциал определяется:

$$U_a(q) = \frac{1}{2} k_a \|e(q)\|^2 \quad \text{если } \|e(q)\| \leq \rho, \quad (6)$$

$$U_a(q) = k_b \|e(q)\| \quad \text{если } \|e(q)\| > \rho, \quad (7)$$

где $e(q) = q_g - q$ – ошибка положения, разница между текущей конфигурацией и желаемой конфигурацией (q_g); k_a – коэффициент усиления регулятора. Для достижения непрерывности при переходе сил требуется, чтобы $k_b = \rho k_a$.

3. Параболоидальное поле было выбрано для использования вблизи желаемого конечного положения, так как оно обеспечивает более плавный переход и лучшую управляемость робота при приближении к цели по сравнению с коническим полем. Параболоид позволяет создать потенциал, который мягко направляет робота к желаемой точке, в то время как конический потенциал создаёт более резкие силы вблизи цели.

Для удержания машины вдали от препятствий, как уже было отмечено ранее, необходим отталкивающий потенциал. Для каждого препятствия создаётся выпуклое потенциальное поле:

$$U_{r,i}(q) = \frac{k_{r,i}}{\gamma} \left(\frac{1}{\eta_i(q)} - \frac{1}{\eta_{0,i}} \right)^\gamma \quad \text{если } \eta_i(q) \leq \eta_{0,i}, \quad (8)$$

$$U_{r,i}(q) = 0 \quad \text{если } \eta_i(q) > \eta_{0,i}, \quad (9)$$

где η_i – клиренс, минимальное расстояние робота от препятствия; где k_r – коэффициент усиления регулятора; $\eta_{0,i}$ – указывает расстояние робота от препятствия, при котором потенциал равен нулю. В данном случае было выбрано $\gamma = 2$. Клиренс мобильного робота – это расстояние между нижней частью робота и поверхностью, по которой он передвигается.

По принципу суперпозиции получаем, что общее силовое поле определяется выражением:

$$f_t(q) = -\nabla U_t(q) = -\nabla(U_a(q) + U_r(q)) = f_a(q) + \sum_i f_{r,i}(q). \quad (10)$$

В качестве сил отталкивания использовались вихревые силы [1]. Это означает, что силы отталкивания определяются выражением:

$$f_r = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_{r,i}}{\partial y} \\ -\frac{\partial U_{r,i}}{\partial x} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Кроме того, препятствиями, которые будут рассматриваться, являются цилиндры, поэтому клиренс можно рассчитать по формуле:

$$\eta_i = \sqrt{\frac{x_{0,i}^2 + y_{0,i}^2}{\left(\frac{x_{0,i}}{q} - \frac{y_{0,i}}{q} \right)^2}} \cdot r_{npen,i}, \quad (12)$$

где $x_{0,i}, y_{0,i}$ – центр i -го препятствия; r_{npen}, i – его радиус.

Благодаря силам притягивания и отталкивания

можно использовать различные методы управления роботом. Итак, уравнение закона управления:

$$\dot{q} = f_t(q). \quad (13)$$

Этот закон управления гарантирует асимптотическую устойчивость q_g при отсутствии локальных минимумов. Применяя этот закон управления к кинематической модели робота, решение методом наименьших квадратов определяется следующим образом:

$$v = f_{t,x} \cos \theta + f_{t,y} \sin \theta, \quad (14)$$

$$\omega = f_{t,\theta}. \quad (15)$$

Для дифференциального привода:

$$\omega_R = \frac{v}{r} + \frac{d}{2r} \omega, \quad (16)$$

$$\omega_L = \frac{v}{r} - \frac{d}{2r} \omega, \quad (17)$$

где r – радиус колёс; d – расстояние между осями двух колёс; $f_{t,x}$ – компонента суммарной силы притяжения вдоль оси x ; $f_{t,y}$ – компонента суммарной силы притяжения вдоль оси y .

Определим силу $f_{t,\theta}$ таким образом, чтобы робот был выровнен по всему полю:

$$\omega = f_{t,\theta} = k_\theta (\text{atan2}(f_{t,y}, f_{t,x}) - \theta), \quad (18)$$

где k_θ – коэффициент усиления регулятора.

Предложенная автором методология использует искусственное потенциальное поле для планирования оптимального пути движения мобильного робота с учётом расположения препятствий. Основные шаги методологии включают в себя: представление рабочего пространства в виде силового поля, расчёт закона управления на основе этого поля и применение данного закона к кинематической модели робота.

Моделирование всей системы было реализовано с использованием программного обеспечения Simulink (рис. 1). Путём моделирования была получена настройка коэффициентов усиления потенциальных полей. Для модели робота использован дифференциальный привод (рис. 2). Положение робота рассчитывается по локализации Рунге-Кутты.

Регулятор рассчитывает входные данные в зависимости от конфигурации робота, такая конфигурация получается из модели дифференциального привода. Входные данные – v и ω , которые внутри модели используются для расчёта реальных входных данных для робота – ω_R и ω_L (рис. 2). Для реализации алгоритма, базирующегося на методе искусственного потенциального поля, создадим блок «Потенциал», включая в него выражение (18), как показано на рисунке 3. Эти подсистемы показаны ниже:

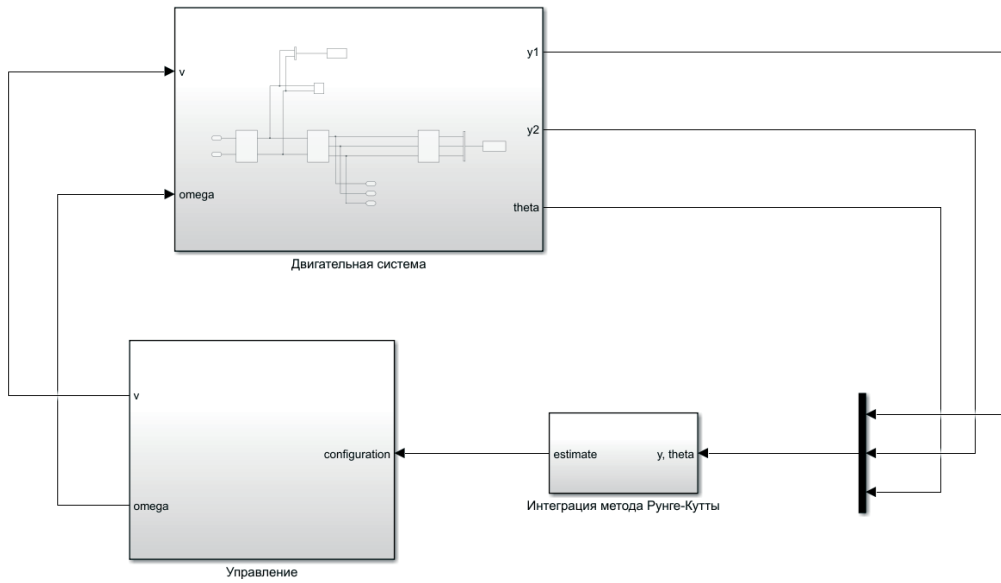


Рисунок 1 – Моделирование двигательной системы

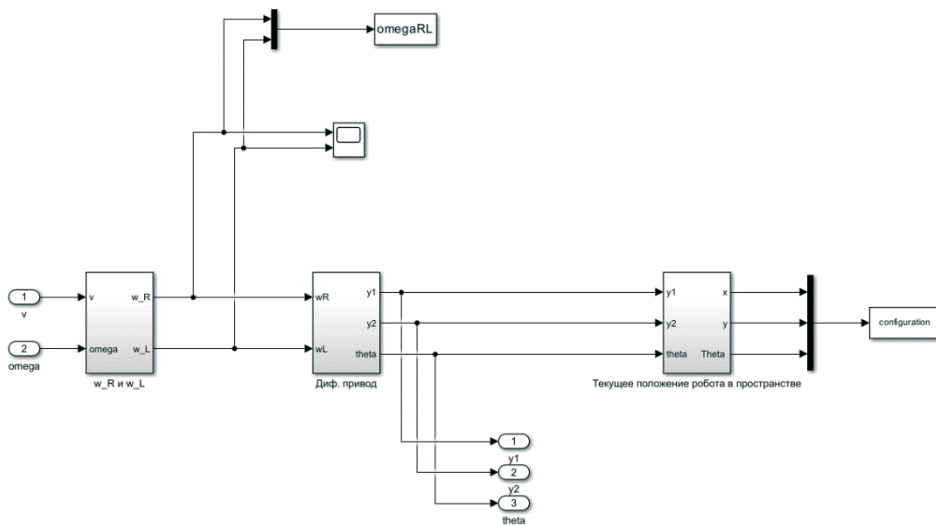


Рисунок 2 – Модель с дифференциальным приводом в среде Simulink

Результаты. При моделировании движения робота в рабочем пространстве рассматриваются два препятствия (в виде окружностей, рис. 4). При этом коэффициент усиления был выбран таким, чтобы угловые скорости, необходимые для достижения конечного положения, не были слишком большими. В частности, максимальная скорость реального робота составляет около 6 рад/с, поэтому лучше не превышать это значение. При коэффициенте усиления $k_a = 10$, в общем случае без препятствий, требуемая скорость имеет максимум около 3 рад/с. Теперь, учитывая наличие препятствий, необходимо выбрать усиление отталкивающих сил. В формуле отталкивающих сил коэффициент усиления k_r умножается на значения порядка 10^{-4} , поэ-

тому для k_r необходимо большое значение, чтобы создать отталкивающую силу того же порядка притягивающей. Было выбрано значение $k_r = 60000$. Последним коэффициентом усиления, который необходимо выбрать, является коэффициент усиления k_{gr} , равный 5. При очень низком значении этого усиления робот объедет первое препятствие, не достигнув конечного положения.

На рисунке 4 показан запланированный путь, робот представлен треугольником, а препятствия – кругами.

Рассмотрим программно-аппаратную реализацию. Вся система реализации характеризуется различными блоками (рис. 5), основных подсистем три:

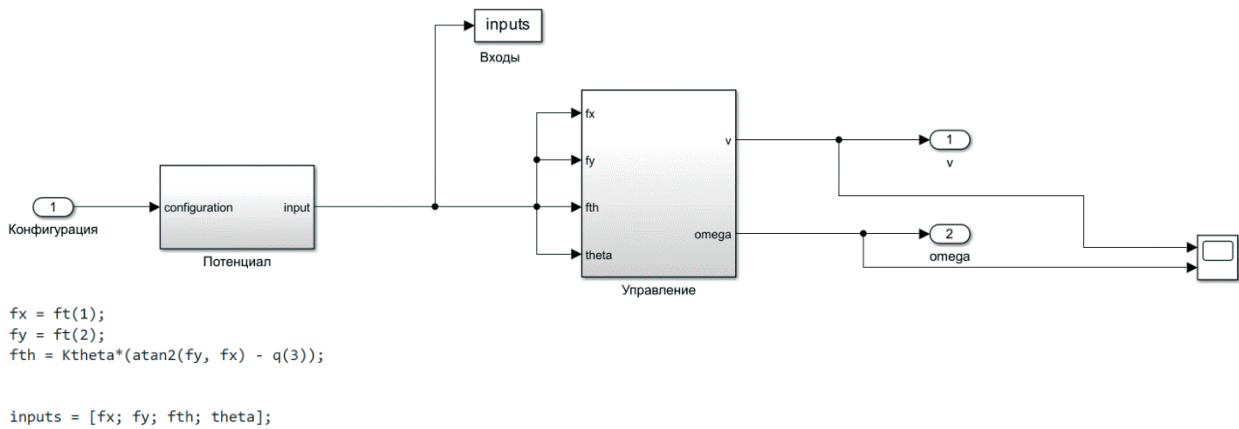


Рисунок 3 – Регулятор искусственного потенциального поля

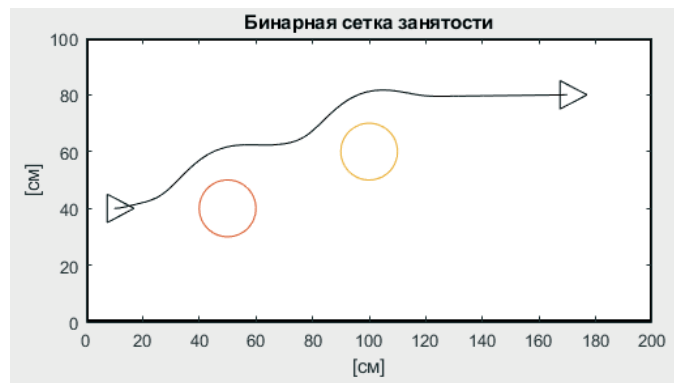


Рисунок 4 – Путь с круговыми препятствиями без учёта ограничений мобильного робота

1. Подсистема Matlab;

1.1. Блок «Локализация», используемый для получения текущего положения и ориентации робота с использованием интеграции модели Рунге-Кутты второго порядка;

- 2. Подсистема связи;
- 3. Подсистема Arduino.

Помимо формирования сигнала, используемого для связи с Arduino, блок Matlab работает

так же, как и в моделировании. Действительно, создание и локализация траектории рассчитываются одинаково как для модели робота, так и для реального робота.

Вторая подсистема, коммуникационная, состоит из одного модуля, выполняющего задачи:

- 1) отправление эталонной скорости колёс на робот;

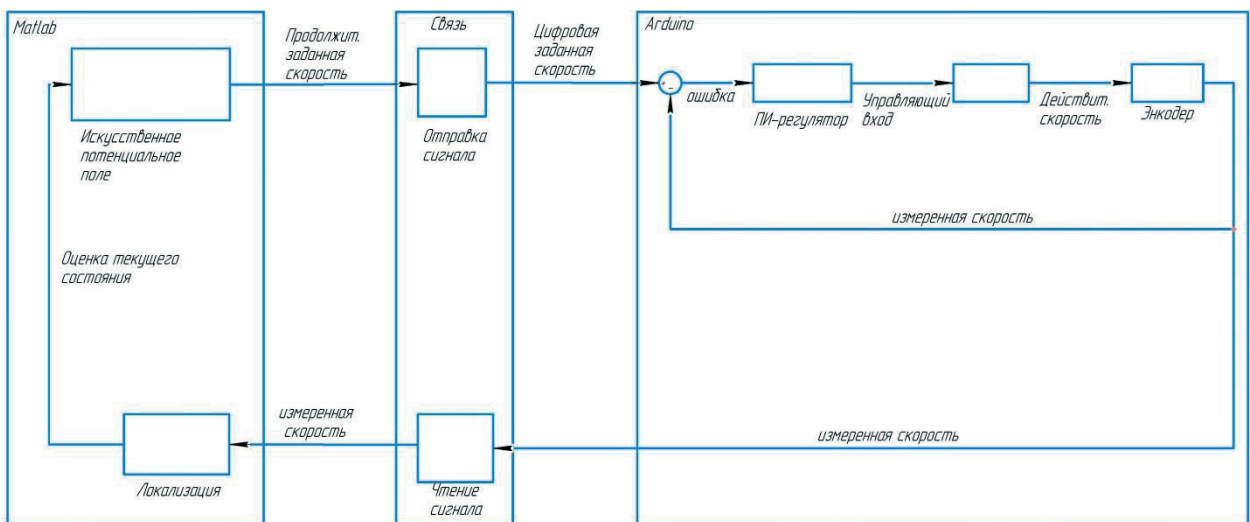


Рисунок 5 – Программно-аппаратная реализация робота

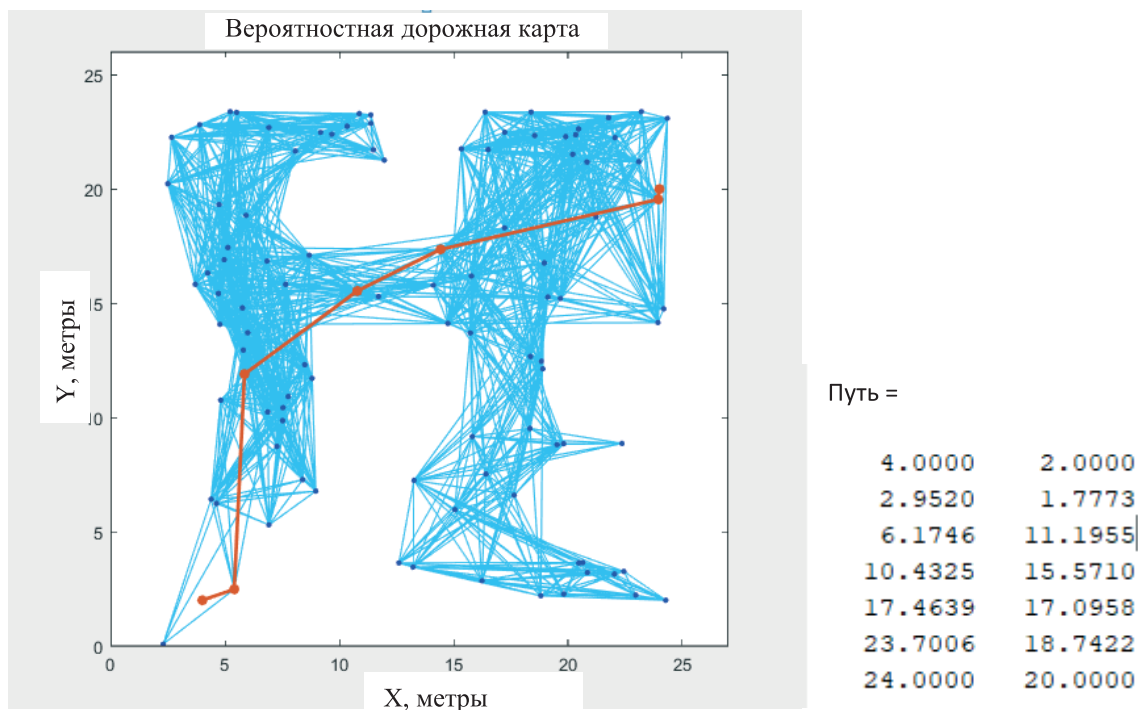


Рисунок 6 – Вероятностная дорожная карта

2) считывание скорости вращения колёс с энкодеров и передача этих данных в Matlab;

3) ПИ-регулирование скорости четырёх колес (по одному регулятору на каждое колесо);

4) активация регулируемого задания, рассчитанного ПИ-регулятором.

На рисунке 6 показана вероятностная дорожная карта (ВДК), представленная в виде графа.

Узлы графа соответствуют точкам в пространстве, а рёбра – возможным путям между ними.

Узлы графа выбираются случайным образом в свободном пространстве. Для сельскохозяйственных роботов такая карта позволяет учитывать

особенности рельефа, наличие препятствий, неровностей почвы и т.д., что необходимо для планирования безопасного и эффективного движения робота по полю.

Анализируя вероятностную дорожную карту, можно определить оптимальные пути движения робота, избегая препятствий и неровностей. Это позволяет повысить производительность и безопасность работы сельскохозяйственных роботов.

Координаты, показанные на рисунке 6, представляют собой узлы в вероятностной дорожной карте, которые робот может использовать для планирования своего движения. Анализируя эти

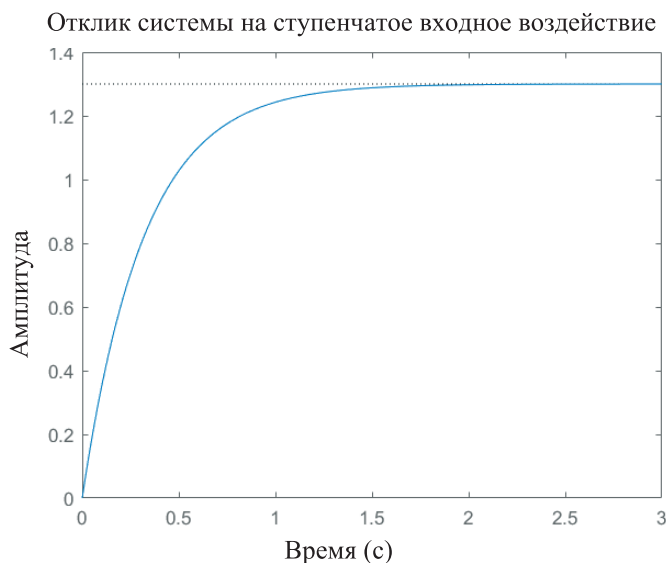


Рисунок 7 – Переходная характеристика передаточной функции процесса из уравнения (19)

Исследование планирования пути мобильного робота с искусственным потенциальным полем

точки, можно определить оптимальный маршрут, избегающий препятствий, или выявить проблемные участки, требующие особого внимания.

Благодаря соединению Bluetooth между Arduino и ПК, данные можно записывать и читать с высокой скоростью (скорость связи: 115200 бод). Задача записи направлена на отправку импульсов с энкодера правого и левого колёс в подсистему Arduino. Эти импульсы строго связаны со скоростью колёс, они пропорциональны изменениям углового положения колеса за время выборки, и эти значения являются хорошим приближением к реальной скорости. После записи этих данных в Arduino подсистема Matlab будет ждать ответа от микроконтроллера, который после сбора импульсов колёс с энкодерами будет отправлять эти значения по последовательному каналу Bluetooth. Как только Matlab получает новые значения, он выполняет свой цикл управления, состоящий из локализации и искусственного потенциального поля. Важным аспектом блока связи является синхронизация между Matlab и Arduino.

Что касается ПИ-регулятора, то выбранный регулятор имеет только пропорциональное и интегративное действие, поэтому возникла необходимость настройки только коэффициентов K_p и K_i . Прежде всего, поведение процесса было аппроксимировано как система первого порядка за счёт использования нескольких входных сигналов разной амплитуды и сбора данных с энкодера о вращении вала двигателей. Испытания, проведённые с разными амплитудами шага, позволили найти среднее значение поведения процесса, которое было использовано для настройки регулятора.

Передаточная характеристика П-регулятора была получена путём аппроксимации экспериментальных данных о динамике реальных двигателей робота. Наличие постоянной времени $\tau = 0,32$ в знаменателе свидетельствует о наличии инерционных свойств в поведении исполнительных механизмов, которые были учтены при моделировании:

$$P(s) = \frac{1,2}{1 + 0,32s}. \quad (19)$$

Характеристиками этого процесса являются (рис. 7):

- 1) время стабилизации = 1,25 с;
- 2) время нарастания = 0,703 с;
- 3) пик = 0%.

Настройка ПИ-регулятора выполняется ПИД-тюнером Matlab, который позволяет наблюдать, как изменяется поведение замкнутого контура, используя различные члены K_p и K_i . Настройка сводилась к удовлетворению требований ко времени выборки, а также устойчивости к изменениям, чтобы избежать колебаний. Согласно программному

обеспечению, выбранные значения параметров $K_p = 0,6$ и $K_i = 5$:

$$PI(s) = 0,6 + \frac{5}{s}. \quad (20)$$

После того, как эти значения были использованы, стало очевидно, что такой подход к настройке ПИ-регулятора содержит неопределённости, внося значительное перерегулирование и существенно снижая время установления замкнутой системы. Были некоторые улучшения, но из-за аппроксимированного процесса, используемого при моделировании Matlab, ожидаемые характеристики не были достигнуты. После некоторых испытаний найденные коэффициенты ПИ-регулятора были установлены: $K_p = 1$ и $K_i = 4$, а передаточная функция регулятора имела вид:

$$PI(s) = 1 + \frac{4}{s}. \quad (21)$$

Окончательная передаточная функция обратной связи с П и ПИ-регуляторами:

$$\frac{PI(s) \cdot P(s)}{1 + PI(s) \cdot P(s)} = \frac{1,3s + 5,2}{0,32s^2 + 2,3s + 5,2}. \quad (22)$$

Характеристики этой передаточной функции с обратной связью (рис. 8):

- 1) время стабилизации = 0,623 с;
- 2) время нарастания = 0,421 с;
- 3) пик = 1,38%.

Указанные значения идеально вписываются в схему реализации, поскольку они гарантируют, что робот может достичь истинной скорости за короткое время, не замедляя синхронизацию всей схемы и не внося никаких колебаний.

На рисунке 9 можно наблюдать, как ведут себя двигатели реальной модели робота [1] с использованием различных коэффициентов ПИ, найденных путём моделирования ($K_p = 0,6$ и $K_i = 5$) и в ходе испытаний ($K_p = 1$ и $K_i = 4$).

Предложенная схема управления хорошо работает для задачи обхода препятствий, искусственные потенциальные поля являются эффективным инструментом для планирования движения.

Выводы. В результате проведённых исследований была разработана модель мобильного робота, описываемая уравнениями движения, и применена для планирования пути с использованием искусственного потенциального поля. Моделирование системы в среде Simulink позволило настроить коэффициенты усиления потенциальных полей и провести анализ поведения робота в различных ситуациях.

Предложенная схема управления показала хорошую работоспособность при обходе препятствий, что подтверждается результатами моделирования. Искусственные потенциальные поля

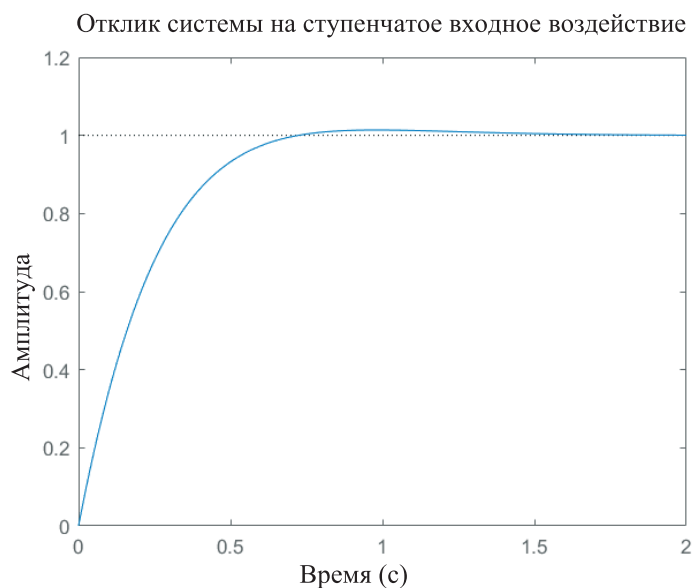


Рисунок 8 – Передаточная функция обратной связи из уравнения (22)

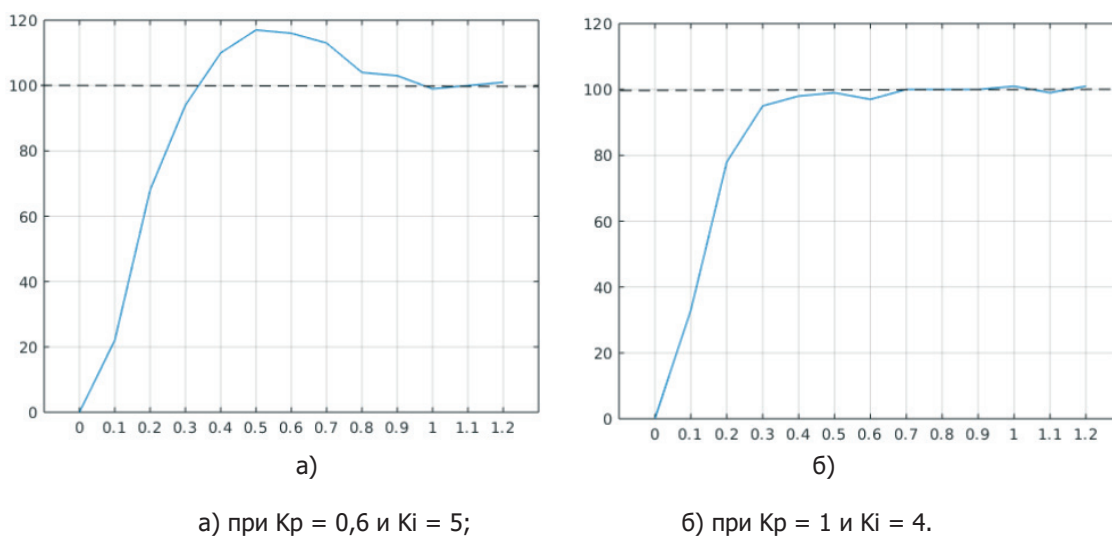


Рисунок 9 – Поведение двигателя

оказались эффективным инструментом для планирования движения мобильных роботов.

Кроме того, были определены следующие оптимальные значения параметров для мобильного робота: коэффициент усиления регулятора мобильного робота $k_a = 10$, коэффициент усиления для выравнивания маршрута $k_\theta = 5$, а также параметры ПИ-регулятора $K_p = 1$ и $K_i = 4$. Значение коэффициента усиления отталкивающих сил потенциального поля ($k_r = 60000$) было задано изначально на основе предварительных предположений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение точности и быстродействия системы управления, а также на адаптацию методов искусственного потенциального поля для работы в различных условиях, включая сельское хозяйство.

Таким образом, результаты данного исследования могут быть использованы в разработке мобильных роботов для сельскохозяйственных целей и в других областях, где требуется навигация в сложных условиях.

Список источников

1. Тетерев А. В. Обоснование выбора системы позиционирования для управления движением мобильного сельскохозяйственного робота // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 4. С. 63–70. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70. EDN LCBPCX.
2. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Моделирование работы мобильного робота для обоснования его функциональных параметров и алгоритма управления // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4 (117). С. 57–72. DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71. EDN NNUDIN.
3. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2017 : материалы III Всеросс. науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (Севастополь, 18–20 сентября 2017 г.) / науч. редактор А. Т. Барабанов. Севастополь : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2017. С. 157–160. EDN ZOXTNZ.
4. Liu S., Tang J., Wang C. [et al.] A unified cloud platform for autonomous driving // Computer. 2017. Vol. 12. P. 42–49. DOI 10.1109/MC.2017.4451224.
5. Liu S., Li L., Tang J. [et al.] Creating autonomous vehicle systems // Synthesis Lectures on Computer Science. 2017. 6 (1). 186 p. DOI 10.1007/978-3-031-01802-2.
6. Tang J., Liu S., Liu L. [et al.] LoPECS: A low-power edge computing system for real-time autonomous driving services // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 30467–30479. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2970728.
7. Liu S., Liu L., Tang J. [et al.] Edge computing for autonomous driving: Opportunities and challenges // Proceedings of the IEEE, 2019. Vol. 107, № 8. P. 1697–1716. DOI 10.1109/JPROC.2019.2915983.
8. Geiger A., Lenz P., Stiller C. [et al.] Vision meets Robotics: The KITTI Dataset // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, № (11). P. 1231–1237. DOI 10.1177/0278364913491297.
9. Beniak R., Pyka T. Influence of PWM to trajectory accuracy in mobile robot motion // Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. 2012. Vol. 6, № 4. P. 50–56.
10. Капитанюк Ю. А., Капитонов А. А., Чепинский С. А. Разработка системы траекторного управления мобильным роботом с роликонесущими колесами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 65–71. EDN SAGVLN.
11. Хабибуллин Р. М., Хабибуллин А. М., Хасанов А. Р., Хасанов А. Р. Управление мобильным роботом с помощью четырех DC-моторов с энкодерами через Raspberry Pi 4 // Перспективы науки. 2022. № 8 (155). С. 86–89. EDN UVDUUY.

References

1. Teterev A. V. Obosnovanie vybora sistemy pozicionirovaniya dlya upravleniya dvizheniem mobil'nogo sel'skokozyajstvennogo robota // Sel'skokozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2020. T. 14, № 4. S. 63–70. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70. EDN LCBPCX.
2. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Modelirovanie raboty mobil'nogo robota dlya obosnovaniya ego funkcional'nyh parametrov i algoritma upravleniya // AgroEkoInzheneriya. 2023. № 4 (117). S. 57–72. DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71. EDN NNUDIN.
3. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Metodologiya iskusstvennyh potencial'nyh polej v zadachah lokal'noj navigacii mobil'nyh robotov // Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mekhatronika – 2017 : materialy III Vseross. nauch.-tekhnich. konf. molodyh uchenykh, aspirantov i studentov (Sevastopol', 18–20 sentyabrya 2017 g.) / nauch. redaktor A. T. Barabanov. Sevastopol' : Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet», 2017. S. 157–160. EDN ZOXTNZ.
4. Liu S., Tang J., Wang C. [et al.] A unified cloud platform for autonomous driving // Computer. 2017. Vol. 12. P. 42–49. DOI 10.1109/MC.2017.4451224.
5. Liu S., Li L., Tang J. [et al.] Creating autonomous vehicle systems // Synthesis Lectures on Computer Science. 2017. 6 (1). 186 p. DOI 10.1007/978-3-031-01802-2.
6. Tang J., Liu S., Liu L. [et al.] LoPECS: A low-power edge computing system for real-time autonomous driving services // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 30467–30479. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2970728.
7. Liu S., Liu L., Tang J. [et al.] Edge computing for autonomous driving: Opportunities and challenges // Proceedings of the IEEE, 2019. Vol. 107, № 8. P. 1697–1716. DOI 10.1109/JPROC.2019.2915983.
8. Geiger A., Lenz P., Stiller C. [et al.] Vision meets Robotics: The KITTI Dataset // The International Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32, № (11). P. 1231–1237. DOI 10.1177/0278364913491297.
9. Beniak R., Pyka T. Influence of PWM to trajectory accuracy in mobile robot motion // Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. 2012. Vol. 6, № 4. P. 50–56.
10. Kapitanjuk Yu. A., Kapitonov A. A., Chepinskij S. A. Razrabotka sistemy traektornogo upravleniya mobil'nym

robotom s rolikonesushchimi kolesami // Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2014. № 2 (90). S. 65–71. EDN SAGVLN.

11. Khabibullin R. M., Khabibullin A. M., Khasanov A. R., Khasanov A. R. Upravlenie mobil'ny'm robotom s pomoshch'yu chetyrekh DC-motorov s enkoderami cherez Raspberry Pi 4 // Perspektivy nauki. 2022. № 8 (155). S. 86–89. EDN UVDUUY.

Сведения об авторе

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Information about the author

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 3717-5731.

**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ ФГБОУ ВО «ЯРОСЛАВСКИЙ ГАУ» В 2024 ГОДУ ВЫШЛА
МОНОГРАФИЯ**

ВЕРА ВИТАЛЬЕВНА ЖОЛУДЕВА

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

В монографии рассмотрены различные методы современной математики, применяемые в сельском хозяйстве при моделировании экономики АПК. Для пояснения особенностей рассмотренных моделей приводятся конкретные примеры.

Монография предназначена для научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов сельскохозяйственных и смежных специальностей вузов, а также представителям бизнеса и органам власти, имеющим отношение к агробизнесу.

УДК 519.87.631; ББК 22.18; ISBN 978-5-98914-277-4; 90 СТР.

ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:

150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, ФГБОУ ВО «Ярославский ГАУ»

e-mail: e.bogoslovskaya@yarcx.ru