

УДК 004.89+004.032.26+007.52

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.52.1.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.52.1.004)

Миварные модель и алгоритм обработки информации для избегания динамических препятствий с изменяющейся зоной безопасности

Ц. Шэнь✉

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация*

Резюме. В статье предложены миварная модель и миварный алгоритм для динамического планирования траекторий в больших помещениях с плотным скоплением перемещающихся людей. Основная идея заключается в вычислении параметров эллиптической изменяющейся зоны безопасности для динамических препятствий на основе интеграции семантического детектирования объектов и геометрического картирования. Миварная модель опирается на семантическую информацию: класс объекта, скорость и факторы сцены. Миварная экспертная система рассчитывает ключевые параметры зоны безопасности и позиции прогнозирования, что обеспечивает дифференцированный запас безопасности для различных семантических целей, например, таких как дети, пожилые люди, взрослые. Рассчитанная зона безопасности будет рассматриваться в планировании пути как размер самого препятствия. Научная новизна заключается в использовании динамических эллипсов, изменяющих свои размеры в зависимости от семантической информации, для определения зоны безопасности динамических препятствий. Миварный алгоритм верифицирован на платформе, реализованной в Python с использованием Pygame, с интеграцией интерфейса обмена данными с КЭСМИ Wi!Mi, что позволило визуализировать процесс планирования, подтвердить эффективность и количественно оценить прирост безопасности. Перспективы исследований включают глубокую интеграцию с методами машинного обучения для усиления робастности и гибкости обновления правил.

Ключевые слова: динамические препятствия, изменяющаяся зона безопасности, семантическое восприятие, миварная экспертная система, КЭСМИ, планирование траектории робота, управление безопасностью, распознавание сцены, логический искусственный интеллект.

Для цитирования: Шэнь Ц. Миварные модель и алгоритм обработки информации для избегания динамических препятствий с изменяющейся зоной безопасности. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2115> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.004

Mivar model and algorithm of information processing for avoiding dynamic obstacles with a changing safety zone

Q. Shen✉

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. We propose a mivar model and a mivar algorithm for dynamic trajectory planning in large indoor spaces with dense crowds of moving people. The main idea is to calculate the parameters of an elliptical changing safety zone for dynamic obstacles by integrating semantic object detection and geometric mapping. The mivar model relies on semantic information: object class, speed, and scene factors. The mivar expert system calculates key parameters of the safety zone and prediction position, providing differentiated safety margins for various semantic targets, such as children, the elderly, and adults. The calculated safety zone will be considered in path planning as the size of the obstacle itself. The scientific innovation lies in the use of dynamic ellipses, changing their size depending on semantic information, to determine the safety zone of dynamic obstacles. The mivar algorithm was verified on a

platform implemented in Python using Pygame, with integration of the data exchange interface with the Wi!Mi. This allowed for visualization of the planning process, confirmation of effectiveness, and quantification of safety gains. Prospects for research include deep integration with machine learning methods to enhance the robustness and flexibility of rule updates.

Keywords: dynamic obstacles, changing safety zone, semantic perception, mivar expert system, KESMI, robot trajectory planning, safety control, scene recognition, logical artificial intelligence.

For citation: Shen Q. Mivar model and algorithm of information processing for avoiding dynamic obstacles with a changing safety zone. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2115> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.004

Введение

В настоящее время робототехника [1] и технологии машинного обучения [2] развиваются чрезвычайно быстро. Роботы находят широкое применение в промышленном производстве¹, бытовом обслуживании и сфере общественных услуг [3]. В этих областях ведутся активные исследования по разработке сценариев применения роботов [4] с целью снижения трудовых затрат человека [5]. В сфере общественных услуг [6], таких как железнодорожные вокзалы, гостиницы, аэропорты, торговые центры [7] и больницы, где структура персонала сложна, а среда неструктурирована, роботы сталкиваются с двойным вызовом, связанным с обеспечением как эффективности, так и безопасности.

Мобильные роботы, работающие в больших внутренних пространствах (аэропорты, торговые центры, вокзалы), должны обеспечивать безопасное и эффективное передвижение в переполненной, динамичной и семантически сложной среде. Традиционные алгоритмы [8] планирования, основанные исключительно на геометрических препятствиях, затрудняют различение значимости таких объектов, как дети, пожилые люди, взрослые, группы людей или статичные объекты, к примеру, ребенок, двигаясь вперед, может внезапно отвлечься на что-то поблизости и сразу же побежать в сторону, это создает риск быстрого изменения направления и скорости. Следовательно, для таких объектов необходимо предусмотреть большую зону безопасности, чем для взрослых людей, которые, прежде чем изменить направление движения, обычно оценивают обстановку, осматриваются по сторонам, а затем меняют траекторию движения. Кроме того, в случае столкновения с роботом взрослый человек обладает большей устойчивостью к возможным травмам, поэтому их зона безопасности меньше. Это может привести к двум противоположным ситуациям: недостаточному запасу безопасности или чрезмерной консервативности [9]. Компьютерное зрение для обнаружения объектов способно предоставить семантическую информацию, такую как тип объекта, его категория и поза, однако для инженерной реализации важно определить, как объединить эту информацию с геометрическими данными в интерпретируемые и управляемые ограничения планирования действий робота [10]. В работе [11] представлен алгоритм избегания динамических препятствий роботом, применимый в больших внутренних помещениях.

Целью данной работы является улучшение планирования траекторий мобильных роботов на основе эллиптической изменяющейся зоны безопасности для динамических препятствий (различных людей) в больших помещениях. Для достижения цели необходимо решить следующие 3 задачи:

- 1) создать миварную модель в формализме миварной базы знаний;

¹ Вепплинг Д., Эрикссон А., Йоханссон Э. Система передачи промышленного робота, промышленный робот и способ для поглощения влаги. Патент на изобретение № RU 2529932 С2: заявл. 29.06.2010; опубл. 10.10.2014.

- 2) разработать миварный алгоритм обработки информации;
- 3) провести экспериментальные исследования созданного программного обеспечения планирования траекторий мобильных роботов.

Также в данной работе используется технология распознавания изображений [12] для обнаружения объектов в поле зрения робота, вычисление их относительного положения и скорости [13], с присвоением динамическим объектам расширенной «зоны безопасности». Кроме того, распознаванием сцены [14] определяется текущая сцена для корректировки стратегии. Зона безопасности представляет собой виртуальное препятствие. Модифицирована математическая модель: уточнен фактор упреждения, что позволяет «зоне безопасности» смещаться на заданное расстояние вдоль направления скорости, повышая ее адекватность. Для реализации обработки информации на основе логических правил применяется миварная экспертная система (МЭС): с помощью небольшого числа физически интерпретируемых параметров учитываются факторы влияния, такие как «категория/скорость/сцена», на большую и малую оси эллипса, его ориентацию и степень упреждения. Эти параметры поступают в планировщик траектории [15] для формирования полного пути движения. Модель обеспечивает как интерпретируемость, так и дифференцируемость и может служить «мостом» между логическим искусственным интеллектом и рефлексными статистическими системами машинного обучения [16].

В данной работе, основываясь на предыдущей работе [11], улучшена модель эллиптической зоны безопасности с учетом слияния семантики и геометрии. Таким образом, тема работы актуальна и имеет большое практическое значение.

Описание предметной области. Миварная технология обработки информации [17] представляет собой передовую технологию логического искусственного интеллекта. Метод логического вывода, реализованный в миварной экспертной системе (МЭС), обладает линейной вычислительной сложностью. Применение миварной сети [18] обеспечивает удобное и быстрое построение алгоритма обработки информации и принятия решения.

В настоящее время миварная технология успешно применяется во многих областях, таких как слияние информации от множественных сенсоров [19], конфигурирование задач для складских роботов [20], автоматическое создание миварных баз знаний [21], разработка медицинских баз знаний [22], эргономический анализ [23] и др. Таким образом, универсальность миварной технологии достаточна для создания логического «мозга» робота.

Хотя введение визуальной и семантической информации [24] способствует повышению способности принятия решений, существующие методы семантической навигации по-прежнему имеют существенные ограничения в инженерной реализации: большинство методов полагаются на нейронные сети типа «черный ящик», которые напрямую выводят команды уклонения или карты стоимости, что затрудняет интерпретацию [25], калибровку и аудит в сценариях с повышенными требованиями к безопасности. Кроме того, наблюдается недостаточная характеристика запаса безопасности в переднем и заднем направлениях с учетом скорости, отсутствие гладкой и непрерывной модели зоны безопасности с четким физическим смыслом, а также недостаточно систематизированные адаптивные стратегии для различных пространственных форм и плотности людских потоков, что затрудняет быструю миграцию и развертывание в разных сценариях с использованием небольшого числа калибровочных параметров [26].

С другой стороны, экспертные системы или «системы, основанные на правилах», обладают естественными преимуществами в плане интерпретируемости [27] и контролируемости [28], но их традиционная реализация в основном ограничивается

символьным логическим выводом [29] и не имеет эффективного интерфейса с планировщиками траекторий и контроллерами на основе непрерывной оптимизации. В связи с этим основной задачей настоящего исследования выступает создание «моделимости», которая динамически взаимодействует с факторами «категория-скорость-сцена» и напрямую передает результаты логического вывода на миварной модели в планировщик.

Материалы и методы

Создание миварной базы знаний для МЭС. Данное исследование создает иерархическую архитектуру «восприятие – слияние – логический вывод – планирование – управление» для достижения безопасного и эффективного передвижения в переполненной, динамичной и семантически сложной внутренней среде. Миварная база знаний представляет собой миварную модель обработки информации, которая основана на получении мультисенсорных входных данных, которые через выравнивание и моделирование неопределенности поступают в МЭС для генерации интерпретируемых параметров эллиптической зоны безопасности, которые в конечном итоге поступают в блок планирования траектории и управления движением, формируя замкнутый контур «точка – точка». Функциональные задачи каждого уровня модели следующие:

1. Обнаружение объектов и предварительное восприятие. На основе RGB-камеры и лидара получается информация о категории и положении объектов, из которой выводятся скорость и курс, в сочетании с одометром и гироскопом (IMU) формируется временно согласованный вектор состояния объекта, и через временные метки и внешние параметры проекция измерений изображения в систему координат робота или в сетку занятости.

2. Слияние данных сенсоров. Проводится геометрическая согласованность между рамками обнаружения на изображении и облаком точек лазера, оцениваются координаты объекта в системе координат робота и геометрические размеры, вычисляется относительное расстояние и другие величины, обеспечивая основу для регулировки весов последующих правил и планирования.

3. Логический вывод и генерация зоны безопасности. Используя информацию об обнаружении объектов и тип сцены в качестве движущих сил, через функцию обработки миварных правил (F_{rule}) и функцию компенсации сцен (F_{scene}) выводятся параметры зоны безопасности для динамических и статических препятствий в поле зрения. МЭС описывает важность категории, влияние сглаживания скорости и адаптацию к сцене с помощью небольшого количества физически интерпретируемых наборов параметров, сохраняя логический вывод линейной сложности для поддержки работы в реальном времени.

4. Планирование. Зона безопасности включается в конфигурационное пространство в качестве препятствия жесткого ограничения или записывается в функцию стоимости в качестве мягкого ограничения, интегрируется с алгоритмами A*/D* (глобальными) или RRT*/TEB/MPC (локальными), генерируя выполнимую гладкую траекторию с компромиссом безопасность-эффективность.

5. Управление. На уровне управления выполняется замкнутое отслеживание сгенерированной траектории, реализуя точное выполнение команд скорости, кривизны и позы. Контроллер обеспечивает устойчивое движение робота вдоль запланированного пути с учетом динамических ограничений и возмущений среды.

Математическое определение модели. Основная функция МЭС F_{rule} – это отображение входной информации о препятствиях и информации о классификации сцены на параметры эллиптической зоны безопасности:

$$[a_{final}, b_{final}, \gamma_{type}, \alpha, \beta] = F_{rule}(I_i, \lambda_{scene}), \quad (1)$$

где a_{final} – окончательная большая полуось эллиптической зоны безопасности, b_{final} – окончательная малая полуось эллиптической зоны безопасности, γ_{type} – коэффициент масштабирования зоны безопасности, зависящий от категории объекта, α – коэффициент влияния скорости на большую полуось, β – коэффициент влияния скорости на малую полуось.

Для каждого объекта i , обнаруженного роботом с помощью технологии обнаружения объектов, его состояние определяется входным вектором:

$$I_i = [type_i, s, x_i, y_i, v_i, \theta_i], \quad (2)$$

где I_i – состояние объекта i , $type_i \in \mathbb{Z}^+$ – идентификатор категории объекта, s – базовый размер объекта, вычисленный при обнаружении, x_i, y_i – текущее положение в системе координат робота, v_i – скалярная величина скорости движения, θ_i – направление движения (rad), для статичных объектов устанавливается 0.

Геометрическое определение эллипса:

$$\frac{(x'-m)^2}{a^2} + \frac{(y'-n)^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - m \\ y - n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где (m, n) – центр эллипса с учетом упреждающей позиции, a – большая полуось эллипса, b – малая полуось эллипса, (x, y) – исходная система координат эллипса, (x', y') – повернутая система координат.

Базовые параметры масштабирования зоны безопасности:

$$r_{base} = s \cdot (1 + \gamma_{type}), \quad (5)$$

где r_{base} – базовый радиус зоны безопасности с учетом категории объекта, γ_{type} – базовый коэффициент масштабирования зоны безопасности для каждой категории.

О сценарной адаптивной корректировке. Для различения влияния различных сцен на принятие решений в данной работе также установлен фактор влияния сцены, который характеризует степень стесненности пространства. Чем меньше этот параметр, тем более стесненная среда, чем больше, тем более открытое пространство:

$$\lambda_{scene} \in (1, 3], \quad (6)$$

где верхняя граница 3 является эмпирическим параметром, полученным экспериментальным путем. В зависимости от конкретных условий применения могут использоваться и большие значения. Например, для очень просторных сред, таких как выставочные залы или аэропортовые терминалы, можно установить $\lambda_{scene} = 2,5$ или выше, что позволит роботу расширить зону безопасности для более консервативного поведения в высокоскоростных режимах.

Сценарная адаптивная корректировка:

$$r_{scene} = \max(s, r_{base} \cdot \lambda_{scene}), \quad (7)$$

где r_{scene} – радиус зоны безопасности, скорректированный в зависимости от степени открытости сцены, λ_{scene} – коэффициент корректировки, устанавливаемый отдельно для каждой сцены, скорректированный фактор сцены определяется как:

– узкая/наполненная среда: $\lambda_{scene} > 1,0$ (умеренное уменьшение зоны безопасности);

- открытая/высокоскоростная среда: $\lambda_{scene} < 1,0$ (умеренное увеличение зоны безопасности);
- нейтральная среда: $\lambda_{scene} = 1,0$ (сохранение исходной зоны безопасности).

Большая полуось (вдоль направления скорости), она характеризует диапазон возможной активности динамического объекта вдоль направления скорости:

$$a_{speed} = r_{scene} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{v}{v_{max}}\right), \quad (8)$$

где a_{speed} – большая полуось, учитывая влияние скорости, v_{max} – максимальная эталонная скорость – 2,0 м/с.

Малая полуось (перпендикулярно направлению скорости), характеризует диапазон возможного изменения динамического объекта перпендикулярно направлению скорости:

$$b_{speed} = r_{scene} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{v}{v_{max}}\right), \quad (9)$$

где b_{speed} – малая полуось, учитывая влияние скорости.

Ограничения:

- $\alpha > \beta > 0$ (обеспечивает более быстрый рост большой полуоси);
- $a_{speed} \geq r_{base}$ (малая полуось не меньше базового радиуса).

Рекомендуемые значения параметров:

- α (коэффициент большой полуоси): 0,8–2, типичное значение 1,5;
- β (коэффициент малой полуоси): 0,1–0,3, типичное значение 0,2.

Вычисление упреждающей позиции:

$$m = x + \cos\theta \cdot a_{speed} \cdot \left(\frac{v}{v_{max}+v}\right), \quad (10)$$

$$n = y + \sin\theta \cdot a_{speed} \cdot \left(\frac{v}{v_{max}+v}\right). \quad (11)$$

С помощью функций (10) и (11) можно обеспечить перемещение эллиптической зоны безопасности вперед в направлении скорости. Чем больше скорость, тем больше величина перемещения вперед. Функция sigmoid ограничивает величину перемещения вперед эллиптической зоны безопасности значением $[0, a_{speed})$ для обеспечения того, чтобы зона безопасности не выходила за пределы фактического положения объекта.

Таким образом, можем перейти к математической модели, с учетом всех факторов влияния, когда необходимо обеспечить, чтобы зона безопасности не была меньше базовых размеров, поэтому окончательные параметры эллиптической зоны безопасности получаются по следующим формулам:

Большая полуось:

$$a_{final} = \max \left[s, s(1 + \gamma_{type}) \left(1 + \alpha \cdot \frac{v}{v_{max}}\right) \lambda_{scene} \right]. \quad (12)$$

Малая полуось:

$$b_{final} = \max \left[s, s(1 + \gamma_{type}) \left(1 + \beta \cdot \frac{v}{v_{max}}\right) \lambda_{scene} \right]. \quad (13)$$

Центр эллипса:

$$m = x + \cos\theta \cdot a_{final} \cdot \frac{v}{v_{max}+v}, \quad (14)$$

$$n = y + \sin\theta \cdot a_{final} \cdot \frac{v}{v_{max}+v}. \quad (15)$$

Предложенный миварный алгоритм обработки информации отличается от аналогов тем, что реализован расчет динамических размеров препятствий с изменяющейся зоной безопасности. На основе миварной модели (миварной базы знаний) разрабатывается безопасный миварный алгоритм планирования траектории, основная часть которого описана выше. Отметим, что кроме алгоритма «до миварной модели» существует технология обнаружения объектов на основе изображений и лазерного дальномера, технология управления роботом, алгоритмы по обработке данных сенсоров и т. д., а «после миварной модели» необходимо еще отобразить результаты работы алгоритма на карту планирования траектории робота, вычислить траекторию движения и выдать команды управления роботом.

В данной работе это реализуется в комплексе имитационного моделирования: на Рисунке 1 показан конкретный пример, а на Рисунке 2 представлена схема предложенного миварного алгоритма обработки информации для избегания динамических препятствий с изменяющейся зоной безопасности, основанного на семантической информации.

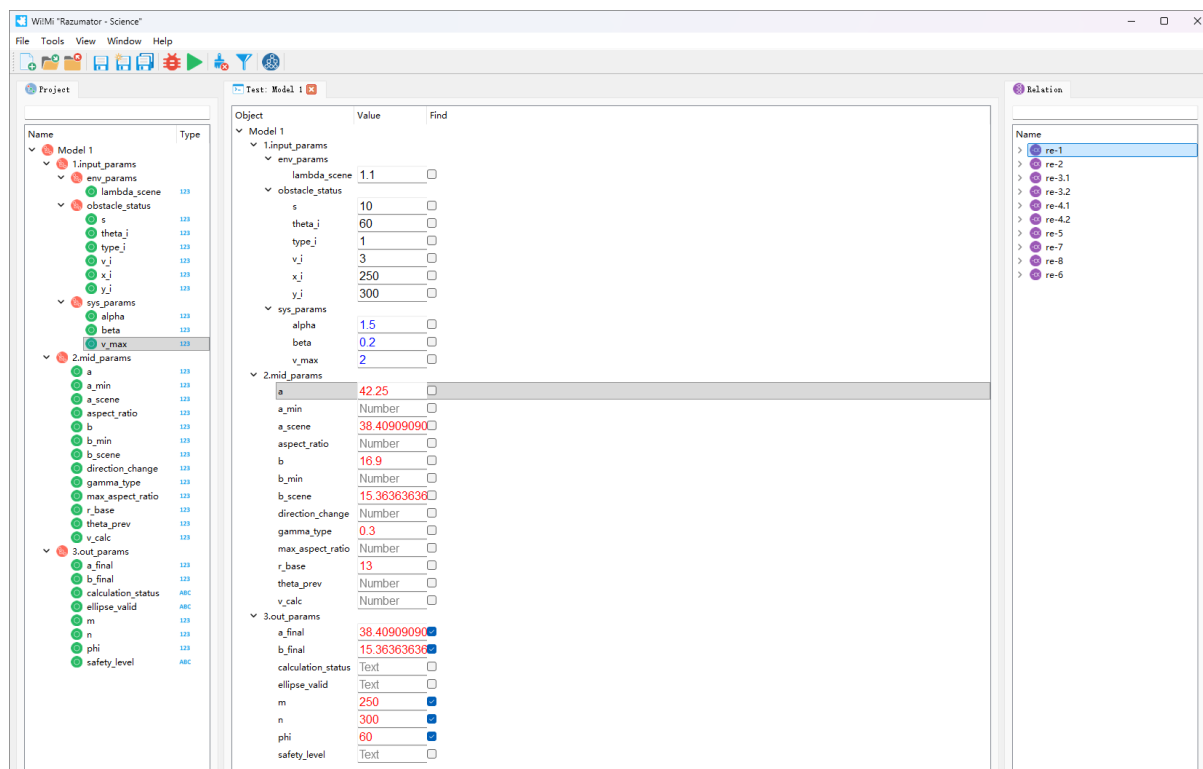


Рисунок 1 – Описание модели и заданные параметры в КЭСМИ

Figure 1 – Description of the model and set parameters in MSS

Эксперимент и результат. Для проверки эффективности предложенных модели и алгоритма вычисления зоны безопасности для избегания динамических препятствий с изменяющейся зоной безопасности нами разработана система моделирования для проведения эксперимента: от построения программной среды и реализации алгоритма до оценки производительности. Эксперимент проверяет производительность модели в аспектах безопасности, эффективности передвижения, адаптации к сцене и т. д.

Система моделирования создана на основе Python 3.8 и Pygame 2.5, и реализована на аппаратной платформе Intel i7-14700H CPU, 16GB RAM. Система моделирования использует модульный дизайн, включающий следующие основные модули:

1. Модуль восприятия: моделирует слияние множественных сенсоров, предоставляет информацию о категории объектов, положении, скорости и т. д.
2. КЭСМИ Wi!Mi: реализует функцию отображения семантика-геометрия F_{rule} и сценарную адаптивную корректировку.
3. Модуль планирования траектории: интегрирует алгоритм RRT*, поддерживает глобальное и локальное перепланирование.
4. Модуль визуализации: отображает в реальном времени траекторию робота, зоны безопасности препятствий и диапазон обзора.

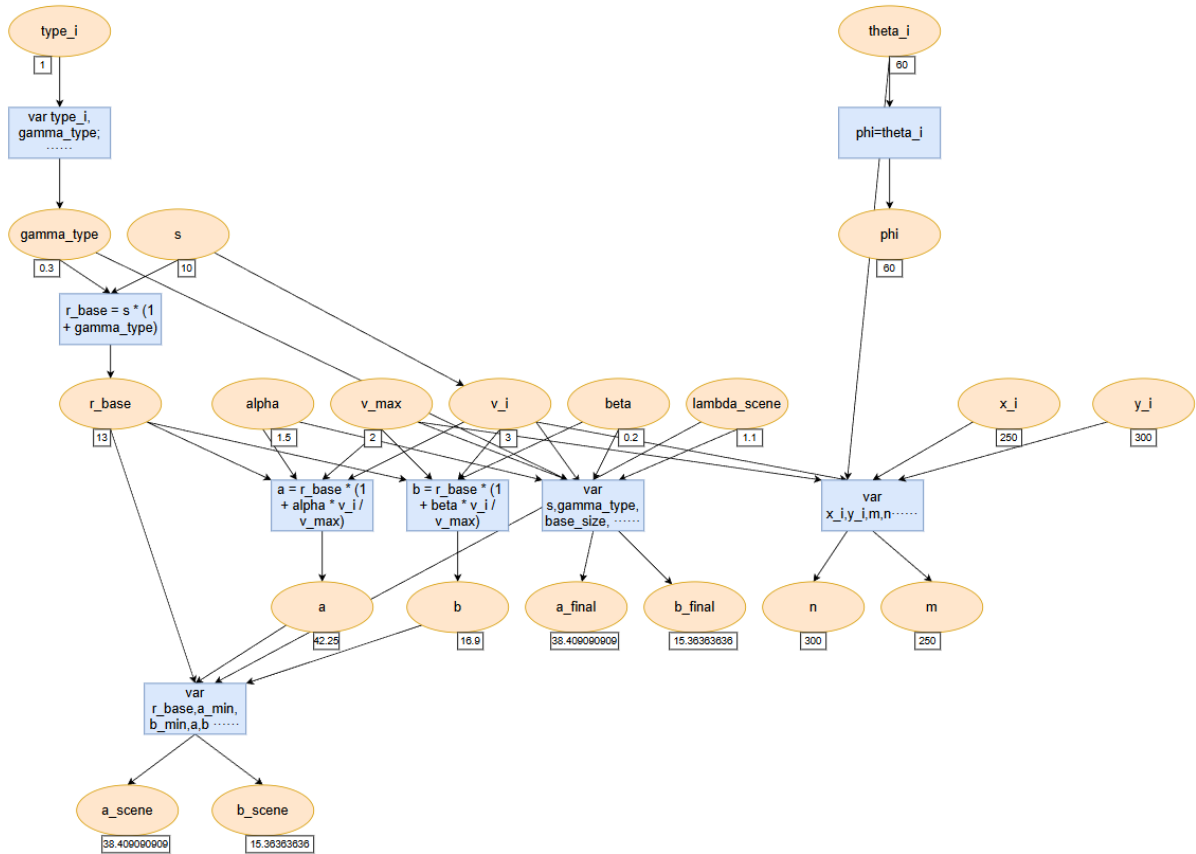


Рисунок 2 – Схема алгоритма принятия решений в КЭСМИ
Figure 2 – Scheme of the decision-making algorithm in MSS

Для всесторонней оценки производительности алгоритма разработаны четыре типичные внутренние сцены (Таблица 1), охватывающие различные пространственные формы и плотность людских потоков.

Для каждой сцены предустановлены начальная точка, конечная точка, расположение статичных препятствий и фактор сцены λ_{scene} , динамические препятствия генерируются случайным образом по типу и движению.

Препятствия разделены на пять категорий: дети, взрослые, статичные объекты, пожилые люди, группы людей. Каждая категория имеет различные параметры зоны безопасности (Таблица 2), настраиваемые через файл параметров.

Таблица 1 – Конфигурация экспериментальных сцен
Table 1 – Configuration of experimental scenes

ID	Название сцены	λ_{scene}	Характеристики пространства	Конфигурация препятствий
1	Узкий коридор	1.1	Длинный проход, стены с обеих сторон	Динамические препятствия + статичные стены
2	Открытое пространство	3	Просторное, без препятствий	Только динамические препятствия
3	Сложный лабиринт	1.5	Множество поворотов, тупики	Динамические препятствия + сложная статичная структура

Таблица 2 – Примеры параметров типов препятствий
Table 2 – Examples of obstacle type parameters

Тип	Дети	Взрослые	Статические	Старики	Группы людей
γ_{type}	2,5	1,3	1	1,8	1,3

Для количественной оценки производительности алгоритма используются следующие критерии:

Частота нарушений безопасности:

$$f = \frac{N_{violations}}{L_{path}}, \quad (16)$$

где L_{path} – длина траектории, $N_{violations}$ – количество нарушений безопасности.

Для проведения эксперимента реализованы два алгоритма:

Базовый алгоритм (сцена 1): традиционное геометрическое избегание препятствий (без семантической информации, единый радиус безопасности).

Миварный алгоритм (сцена 2): полная миварная модель слияния семантики-скорости – сцены.

В процессе поведения эксперимента, каждый алгоритм запускается 10 раз в одной и той же сцене, среднее значение берется в качестве окончательного результата.

Ожидается, что миварный алгоритм покажет хорошие результаты в следующих аспектах:

1. В стесненных сценах избежит чрезмерной консервативности, повысив эффективность передвижения.
2. Для высокодинамичных препятствий (таких как дети или группы людей) обеспечит больший запас безопасности.
3. В таких сценах, как сложные лабиринты, сохранит высокий уровень успешности и гладкость траектории.

Результаты

Для каждой сцены базовый алгоритм повторяется 10 раз, процесс моделирования показан на Рисунке 3, а результаты моделирования приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результат эксперимента в сцене 1
Table 3 – The result of the experiment in scene 1

Показатель	Узкая сцена	Открытая сцена	Сцена лабиринта
Средняя длина пути L_{path}	1244,8	1021,3	1653,0
Среднее количество столкновений $N_{violations}$	8,6	3,7	10,2
Средняя частота нарушений безопасности f	0,0069	0,0036	0,0062

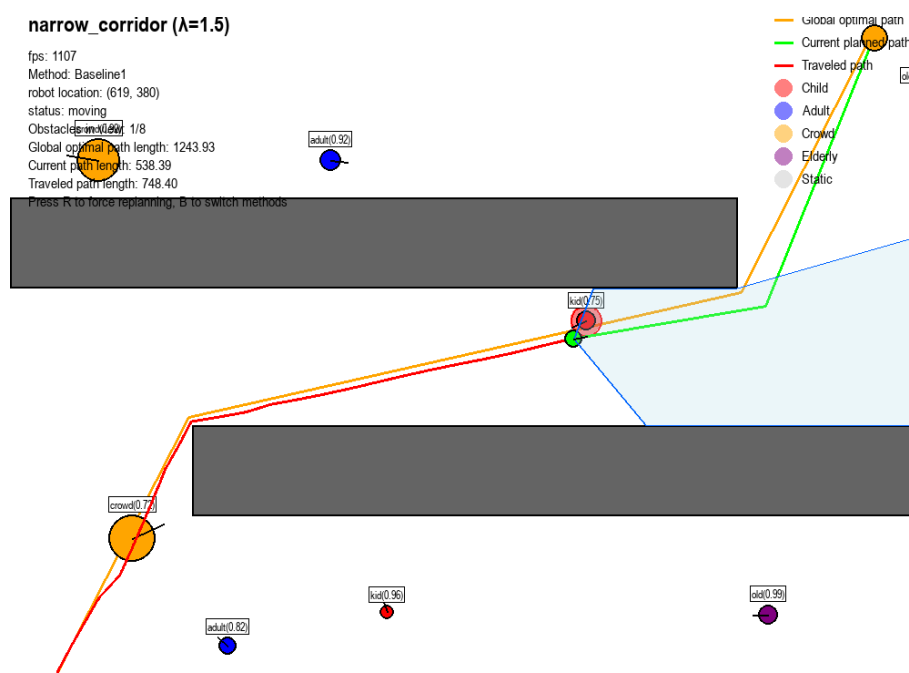


Рисунок 3 – Моделирование планирования траектории робота на основе базового алгоритма
Figure 3 – Simulation of the robot trajectory planning based on the basic algorithm

Для каждой сцены миварный алгоритм повторяется 10 раз, процесс моделирования показан на Рисунке 4, результаты моделирования приведены в Таблице 4.

Таблица 4 – Результат эксперимента в сцене 2
Table 4 – The result of the experiment in scene 2

Показатель	Узкая сцена	Открытая сцена	Сцена лабиринта
Средняя длина пути L_{path}	1256,9	1014,7	1691,6
Среднее количество столкновений $N_{violations}$	5,7	1,2	8,9
Средняя частота нарушений безопасности f	0,0045	0,0012	0,0053

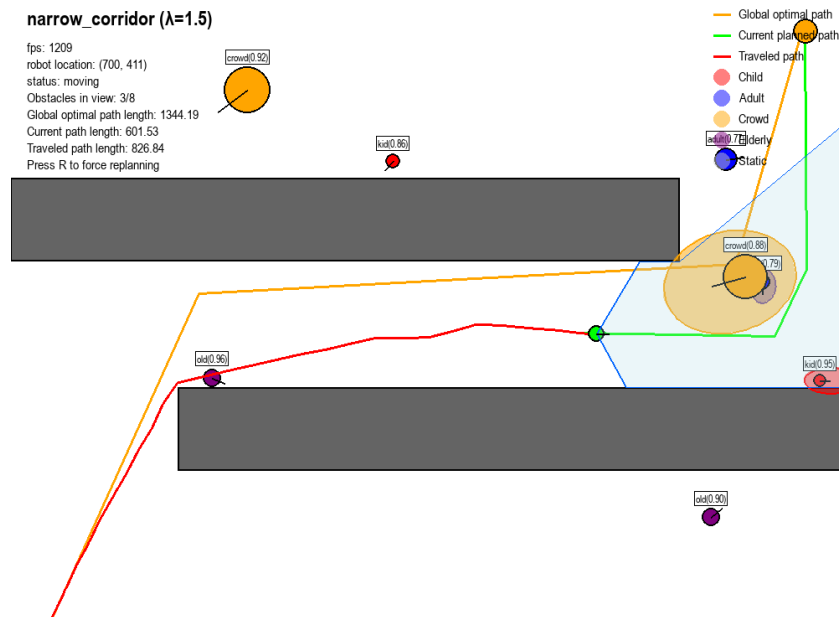


Рисунок 4 – Моделирование планирования траектории робота на основе миварного алгоритма
Figure 4 – Simulation of the robot trajectory planning based on the mivar algorithm

Из полученных экспериментальных результатов установлено, что предложенная миварная модель обработки информации, основанная на слиянии семантического восприятия и миварной экспертной системы превосходит традиционные «базовые» алгоритмы геометрического избегания препятствий по критериям безопасности, эффективности траектории и адаптации к различным типам сцен. В трех типичных сценариях средняя частота нарушений безопасности оказалась ниже, чем у базового алгоритма; в частности, в открытой сцене показатель снизился с 0,0036 до 0,0012, что соответствует уменьшению на 66,7 %. Это подтверждает, что разработанные миварные модель и алгоритм, на основе семантического восприятия и механизмов сценарной адаптации, значительно усиливает способности робота избегать динамических препятствий.

Обсуждение

Несмотря на то, что миварные модель и алгоритм показали хорошую производительность в эксперименте, при фактическом развертывании возможны различные сложные ситуации, поэтому наша работа может быть продолжена в следующих направлениях:

1. Механизм онлайн-обучения: объединение алгоритмов обучения с подкреплением или онлайн-оптимизации для реализации автоматической калибровки и динамической корректировки таких параметров, как $\alpha, \beta, \lambda_{scene}, \gamma_{type}$, что снижает «ручное управление».

2. Моделирование взаимодействия человека и машины: введение в зону безопасности предсказания намерений пешеходов и различных моделей социального поведения, что сделает поведение нашего робота более соответствующим ожиданиям человека и приведет к повышению «приемлемости» в общей среде сосуществования.

3. Межплатформенная проверка: проведение системной проверки на реальных роботизированных платформах (например, таких как колесно-шагающие сервисные роботы) и большем количестве реальных сценариев, что позволит перейти миварной модели и алгоритму от имитационного моделирования к практическому внедрению.

Заключение

Для автономных роботов предложены миварная модель и алгоритм избегания динамических препятствий с изменяющейся зоной безопасности в больших помещениях с высокой плотностью людей, которые объединяют семантическое восприятие и миварную экспертную систему. Все вместе это обеспечивает интерпретируемое отображение категории препятствия, состояния движения и характеристик сцены на параметры эллиптической зоны безопасности препятствий для мобильного робота. Созданная миварная система отличается высокой интерпретируемостью и контролируемостью благодаря использованию параметров с четким физическим смыслом $(\alpha, \beta, \lambda_{scene}, \gamma_{type})$, а также динамической адаптивностью, реализуемой через механизм упреждения, зависящий от скорости, и корректировкой фактора сцены.

Достигнута цель работы по улучшению планирования траекторий мобильных роботов на основе эллиптической изменяющейся зоны безопасности для динамических препятствий (различных людей) в больших помещениях. Успешно решены все поставленные задачи: создана миварная модель в формализме миварной базы знаний; разработан миварный алгоритм обработки информации и проведены экспериментальные исследования созданного программного обеспечения планирования траекторий мобильных роботов.

Экспериментальные исследования подтвердили способность созданной программной системы, включающей миварные модель и алгоритм, адаптироваться к различным условиям среды. В узких коридорах миварные модель и алгоритм, за счет умеренного сжатия зоны безопасности, позволяют роботу избегать чрезмерно консервативного обхода, повышая общую эффективность перемещения. В открытых пространствах, напротив, происходит расширение зоны безопасности, что снижает риск столкновений. Для динамичных категорий объектов, таких как дети и группы людей, модель автоматически назначает увеличенные зоны безопасности и более длинное упреждающее расстояние, что существенно сокращает вероятность столкновений.

Таким образом, разработанные миварные модель и алгоритм обеспечивают баланс между безопасностью, эффективностью и адаптацией к сцене, что делает такой подход перспективным решением для автономной навигации роботов в помещениях с динамическими условиями и высокой плотностью разнородных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Cottam R., Vounckx R. Intelligence: Natural, Artificial, or What? *BioSystems*. 2024;246. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2024.105343>
2. Akhtyamov T., Kashirin A., Postnikov A., Sosin I., Ferrer G. Social Robot Navigation Through Constrained Optimization: A Comprehensive Study of Uncertainty-Based Objectives and Constraints in the Simulated and Real World. *Robotics and Autonomous Systems*. 2025;183. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104830>
3. Кузнецова И.В., Шереметьев Г.Г., Абаза И.Г. Роботы на службе здравоохранения: робот-медик «Da Vinci». *Тенденции развития науки и образования*. 2024;(111-8):162–165.
4. Трефилов С.А., Ходырев Г.В. Разработка математической модели высокоманевренного робота для имитации роботов различных типов конструкций. *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2024;27(3):38–48. <https://doi.org/10.22113/2413-1172-2024-3-38-48>
Trefilov S.A., Khodyrev G.V. Development of a Mathematical Model of a Highly Maneuverable Robot for Simulation of Robots with Different Types of Designs. *Vestnik*

- IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*. 2024;27(3):38–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-3-38-48>
5. Мырадов П., Ширмырадов М., Байрамов Н., Ровшенов Д. Роботы для автоматизации сборки электроники: внедрение роботов в производственные линии для повышения эффективности. *Академическая публицистика*. 2024;(11-2):63–65.
 6. Chen B., Kwiatkowski R., Vondrick C., Lipson H. Fully Body Visual Self-Modeling of Robot Morphologies. *Science Robotics*. 2022;7(68). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abn1944>
 7. Мокеев М.В. Перспективы использования роботов-бариста и роботов-барменов в ресторанном бизнесе России. В сборнике: *Развитие сферы услуг в условиях глобализации экономики: современные тренды, актуальные проблемы и пути их решения: Сборник статей по материалам IV Международной научно-практической конференции, 27 декабря 2024 года, Нижний Новгород, Россия*. Нижний Новгород: Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 2024. С. 202–205.
Mokeyev M.V. Prospects for the Use of Robot Baristas and Robot Bartenders in the Restaurant Business in Russia. In: *Razvitie sfery uslug v usloviyakh globalizatsii ekonomiki: sovremennye trendy, aktual'nye problemy i puti ikh resheniya: Sbornik statei po materialam IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 27 December 2024, Nizhny Novgorod, Russia*. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi inzhenerno-ekonomicheskii universitet; 2024. P. 202–205. (In Russ.).
 8. Бижанова О., Салыкова О., Молдамурат Х., Иванова И. Методы планирования траектории движения мобильного робота в условиях неопределенности. *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2023;(6):339–346. (На англ.).
Bizhanova O., Salykova O., Moldamurat H., Ivanova I. Methods of Planning the Trajectory of a Mobile Robot in Conditions of Uncertainty. *Vestnik Kazakhskoi akademii transporta i kommunikatsii im. M. Tynyshpaeva*. 2023;(6):339–346.
 9. Wang X., Tang K., Dai X., et al. Safety-Balanced Driving-Style Aware Trajectory Planning in Intersection Scenarios with Uncertain Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2023;8(4):2888–2898. <https://doi.org/10.1109/tiv.2023.3239903>
 10. Long Z., Killick G., McCreadie R., Aragon-Camarasa G. RoboLLM: Robotic Vision Tasks Grounded on Multimodal Large Language Models. In: *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 13–17 May 2024, Yokohama, Japan*. IEEE; 2024. P. 12428–12435. <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10610797>
 11. Шэнь Ц., Гун Ш., Варламов О.О., Адамова Л.Е., Баленко Е.Г. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы. *Проблемы искусственного интеллекта*. 2024;(4):164–176. <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-164-176>
Shen Q., Gong Sh., Varlamov O.O., Adamova L.E., Balenko E.G. Dynamic Robot Path Planning Based on Semantic Object Detection Using Mivar Expert System. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024;(4):164–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2024-4-164-176>
 12. Степанов Т.И. Роль технологии обнаружения и идентификации объектов в современном мире (на примерах технологии OpenCV). В сборнике: *All-Russian Contest for the Student's Scientific Project in a Foreign Language: Материалы всероссийского конкурса студенческих научных проектов на иностранном языке, 19 мая 2022 года, Улан-Удэ, Россия*. Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета; 2022. С. 75–79. (На англ.).

- Stepanov T.I. The Object Detection and Identification Significance in the Modern World (On the Examples of OpenCV Technology). In: *All-Russian Contest for the Student's Scientific Project in a Foreign Language: Materials of the All-Russian Student's Scientific Projects Contest, 19 May 2022, Ulan-Ude, Russia*. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department; 2022. P. 75–79.
13. Логунов С.В., Куприянов Н.А. Методика ранжирования каталогизированных космических объектов, используемых для повышения точности определения координат объектов радиолокационной станцией дальнего обнаружения. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2019;(1):75–84.
Logunov S.V., Kupriyanov N.A. Ranking Method of Catalogued Space Objects Used to Improve the Accuracy of Determining the Objects Coordinates by Long-Range Detection Radar. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2019;(1):75–84. (In Russ.).
14. Доу Л. О создании МЭС для эвакуации людей при пожаре. В сборнике: *Четвертая международная научная конференция молодежной школы «Мивар '25»: Сборник научных статей, 17–19 апреля 2025 года, Москва, Россия*. Москва: ИНФРА-М; 2025. С. 380–382.
Dou L. On the Creation of a Mivar Expert System for Evacuation of People in Case of Fire. In: *Chetvertaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodezhnoi shkoly "Mivar '25": Sbornik nauchnykh statei, 17–19 April 2025, Moscow, Russia*. Moscow: INFRA-M; 2025. P. 380–382. (In Russ.).
15. Davarzani Sh., Ejaz M.T. A 2D Path-Planning Performance Comparison of RRT and RRT* for Unmanned Ground Vehicle. *IAES International Journal of Robotics and Automation*. 2024;13(1):105–112. <https://doi.org/10.11591/ijra.v13i1.pp105-112>
16. Sudharsan Bh., Breslin J.G., Ali M.I. ML-MCU: A Framework to Train ML Classifiers on MCU-Based IoT Edge Devices. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(16):15007–15017. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3098166>
17. Varlamov O. "Brains" for Robots: Application of the Mivar Expert Systems for Implementation of Autonomous Intelligent Robots. *Big Data Research*. 2021;25. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2021.100241>
18. Шэнь Ц., Гун Ш., Лю Ч., Лю А., Тимофеев В.Б., Варламов О.О. Алгоритм планирования траектории робота на основе технологии обнаружения объектов с использованием МЭС. В сборнике: *Международная научная конференция молодежной школы «МИВАР '24»: Сборник научных статей, 18–20 апреля 2024 года, Москва, Россия*. Москва: ИНФРА-М; 2024. С. 367–373.
Shen Q., Gong Sh., Liu Zh., Liu An., Timofeev V.B., Varlamov O.O. Robot Path Planning Algorithm Based on Object Detection Technology Using MES. In: *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodezhnoi shkoly "MIVAR '24": Sbornik nauchnykh statei, 18–20 April 2024, Moscow, Russia*. Moscow: INFRA-M; 2024. P. 367–373.
19. Шэнь Ц. О создании МЭС для объединения мультисенсорных данных в робототехнике. В сборнике: *Четвертая международная научная конференция молодежной школы «Мивар '25»: Сборник научных статей, 17–19 апреля 2025 года, Москва, Россия*. Москва: ИНФРА-М; 2025. С. 343–345.
Shen Q. On the Creation of a MES for Multisensory Data Fusion in Robotics. In: *Chetvertaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodezhnoi shkoly "Mivar '25": Sbornik nauchnykh statei, 17–19 April 2025, Moscow, Russia*. Moscow: INFRA-M; 2025. P. 343–345. (In Russ.).

20. Гун Ш. Миварная система принятия решений для распределения и перевозки грузов командой складских роботов. *Системы управления и информационные технологии*. 2025;(2):23–29.
Gong S. Mivar Decision-Making System for Distribution and Transportation of Cargo by a Team of Warehouse Robots. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2025;(2):23–29. (In Russ.).
21. Аладин Д.В. О подходе к автоматической генерации миварных баз знаний для решения задач управления. В сборнике: *Четвертая международная научная конференция молодежной школы «Мивар '25»: Сборник научных статей, 17–19 апреля 2025 года, Москва, Россия*. Москва: ИНФРА-М; 2025. С. 409–411.
Aladin D.V. About the Approach to Automatic Generation of Mivar Knowledge Bases for Solving Control Problems. In: *Chetvertaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodezhnoi shkoly "Mivar '25": Sbornik nauchnykh statei, 17–19 April 2025, Moscow, Russia*. Moscow: INFRA-M; 2025. P. 409–411. (In Russ.).
22. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков. *Естественные и технические науки*. 2023;(5):29–33. <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.01>
Chestnova E.A., Fedoseeva E.Yu., Vaganov D.D., et al. Development of the MES Knowledge Base for the Selection of Dosage Forms for Antibiotics and Antimycotics. *Natural and Technical Sciences*. 2023;(5):29–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.01>
23. Горячкин Б.С., Байбарин Р.Г., Тюлькина Н.В., Запруднов М.С. Эргономический анализ представлений миварной модели. *Естественные и технические науки*. 2022;(4):162–174.
Goryachkin B.S., Baibarin R.G., Tyulkina N.V., Zaprudnov M.S. Ergonomic Analysis of the Representations of the Mivarnaya Model. *Natural and Technical Sciences*. 2022;(4):162–174. (In Russ.).
24. Никитин П.В., Горохова Р.И. Разработка модели компьютерного зрения для детекции областей в визуально насыщенных документах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.010>
Nikitin P.V., Gorokhova R.I. Developing a Computer Vision Model for Region Detection in Visually Rich Documents. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.010>
25. Терехин М.А., Ивашенко А.В., Кулаков Г.А. Концептуальный подход к интеграции искусственного интеллекта в инженерную деятельность. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.031>
Terekhin M.A., Ivaschenko A.V., Kulakov G.A. A Conceptual Approach to the Integration of Artificial Intelligence into Engineering Activities. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.031>
26. Juang L.-H. Humanoid Robot Action Using Multi-Mode Fusion Based on Frame Expert System. *Multimedia Tools and Applications*. 2024;84:1513–1536. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19058-2>
27. De A. Abilio A., Wolodko J.D., Eckert R.B., Skovhus T.L. Development of an Expert System for Assessing Failures in Oil and Gas Pipelines Due to Microbiologically Influenced Corrosion (MIC). *Engineering Failure Analysis*. 2024;163. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108426>

28. Гулютин Н.Н., Ермиенко Н.А., Антамошкин О.А. Система комплексирования сенсорных данных в бортовых системах управления беспилотными авиационными системами. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.019>
Gulyutin N.N., Ermiyenko N.A., Antamoshkin O.A. Sensor Data Integration System in Onboard Control Systems of Unmanned Aerial Systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.019>
29. Bhatia P., Thirunarayanan J., Dave N. An Expert System-Based Design of SCARA Robot. *Expert Systems with Applications*. 1998;15(1):99–109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шэнь Цюцзе, аспирант, Московский **Shen Qiujie**, Postgraduate, Bauman Moscow государственный технический университет State Technical University, Moscow, the Russian имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Федерация.

e-mail: shencr0929@gmail.com

ORCID: [0009-0001-6786-823X](https://orcid.org/0009-0001-6786-823X)

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 19.12.2025; принята к публикации 30.12.2025.

The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 19.12.2025; accepted for publication 30.12.2025.