

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА СКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЯХ: АРХИТЕКТУРА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА SMARTZEBRA

Рахимзода Фотима

(магистрантка), Ташкентский государственный транспортный университет,
г. Ташкент, Республика Узбекистан, ORCID: 0009-0005-5701-7836, e-mail:
rahimzodafotima@gmail.com;

Холиков Алишер

(доцент), Ташкентский государственный транспортный университет, г.
Ташкент, Республика Узбекистан, ORCID: 0000-0002-2061-0047, e-mail:
alisher7770292@gmail.com.

Аннотация: ***Введение:** В данной статье рассматривается проблема обеспечения безопасности пешеходов на нерегулируемых переходах скоростных автомагистралей в темное время суток.*

***Методы:** предлагается инновационное решение — адаптивная система SmartZebra, использующая технологии компьютерного зрения, граничных вычислений и искусственного интеллекта. Описана аппаратная и программная архитектура комплекса, включая специализированный алгоритм работы и модуль AI-Child Guard для распознавания детей.*

***Результаты:** Эмпирические тесты доказали высокую надежность комплекса. Приведены данные об экономической эффективности системы по сравнению с традиционными методами обеспечения безопасности.*

***Заключение:** Интеллектуальный комплекс выступает эффективной альтернативой мостам и светофорам, радикально снижая аварийность.*

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, искусственный интеллект, компьютерное зрение, YOLO v8, граничные вычисления, пешеходный переход.

Abstract: Background: This article addresses the problem of ensuring pedestrian safety at unsignalized crosswalks on high-speed highways at night.

Methods: An innovative solution is proposed—an adaptive system, SmartZebra, which utilizes computer vision technologies, edge computing, and artificial intelligence. The hardware and software architecture of the complex is described, including a specialized operating algorithm and the AI-Child Guard module for child recognition.

Results: Empirical tests have proven the high reliability of the complex. Data on the economic efficiency of the system compared to traditional safety methods are presented.

Conclusion: The intelligent complex serves as an effective alternative to overpasses and traffic lights, radically reducing accident rates.

Keywords: *road safety, artificial intelligence, computer vision, YOLO v8, edge computing, pedestrian crossing.*

1. Введение

Развитие транспортной инфраструктуры неразрывно связано с вопросами обеспечения безопасности всех участников дорожного движения. Особую критическую ситуацию создают участки, где скоростные трассы проходят через населенные пункты — села, махалли и жилые зоны. На таких участках автомобили движутся со скоростью 70-100 км/ч, и в темное время суток пешеход на переходе становится практически невидимым. По статистике, более 65% дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов происходит именно в ночное время на нерегулируемых переходах.

Объектом данного исследования выступает процесс организации пешеходного движения на автомобильных дорогах, проходящих через населенные пункты. Цель исследования заключается в совершенствовании организации пешеходного движения с применением интеллектуальных транспортных систем (на примере комплекса SmartZebra) для радикального снижения уровня аварийности и повышения безопасности наиболее уязвимых участников движения.

2. Обзор литературы и анализ традиционных методов

Существующие решения либо слишком дороги, либо создают новые проблемы на трассах. Анализ традиционных подходов выявляет их критические недостатки:

Светофорные объекты: создают пробки на трассе, требуют постоянного электропитания и дорогого обслуживания. Водители теряют время даже когда пешеходов нет.

Надземные пешеходные мосты: Стоимость строительства достигает миллиардов сумов. Долгий срок возведения, конструкция неудобна для пожилых людей и детей, что делает такие мосты нерентабельными для малых населенных пунктов.

Мировой научный фокус сместился в сторону интеграции технологий Интернета вещей (IoT) и компьютерного зрения (Edge Computing). Оптимизированные алгоритмы глубокого обучения позволяют обрабатывать видеопоток локально, снижая сетевые задержки. Предлагаемое решение — система SmartZebra — это активная зона безопасности, которая активируется только при появлении человека. Данный комплекс в 10 раз дешевле моста и не создает заторов, так как адаптивная система реагирует только на реальную угрозу.

3. Методология и архитектура комплекса SmartZebra

Система объединяет компьютерное зрение, граничные вычисления и интеллектуальное управление световыми элементами, работая автономно 24/7.

Вычислительные мощности: используются микрокомпьютеры для граничных вычислений Nvidia Jetson Nano или Raspberry Pi 5.

Сенсоры: применяются камеры Sony IMX с технологией ночного видения.

Энергоснабжение: Автономное энергоснабжение обеспечивается с помощью солнечных панелей.

Программное обеспечение: Основным языком разработки для всех модулей выступает Python. Обработка видеопотока осуществляется с помощью библиотеки OpenCV, а для детекции объектов в реальном времени применяется нейросеть YOLO v8.

Алгоритм функционирования системы представляет собой непрерывный цикл обработки данных без задержек на месте:

Режим ожидания: когда пешеходов нет, система находится в режиме энергосбережения с минимальным потреблением. Слабая подсветка обозначает переход, а камеры продолжают мониторинг зоны.

Анализ траектории: Искусственный интеллект распознает не только присутствие человека, но и траекторию его движения, прогнозируя момент выхода на проезжую часть.

Режим тревоги: при обнаружении пешехода менее чем за 0.5 секунды включается полная иллюминация. Яркие прожекторы создают «сцену», лазерная проекция рисует стоп-линию на асфальте, а табло «PIYODA» предупреждает водителя.

4. Инновационный модуль AI-Child Guard и эмпирические результаты

Ключевая инновация SmartZebra — способность распознавать детей и адаптировать уровень предупреждения для защиты самых уязвимых участников движения.

Оценка эффективности обученной модели YOLO v8 проводилась с акцентом на минимизацию пропусков пешеходов. Метрика полноты (Recall) рассчитывалась по формуле:

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}),$$

где, Recall (Полнота): показывает способность системы находить все нужные объекты. В контексте данного исследования — способность системы не пропускать детей на проезжей части.

TP (True Positive — Истинно-положительное решение): Количество случаев, когда ребенок действительно находился в зоне перехода, и нейросеть YOLO v8 его успешно распознала.

FN (False Negative — Ложно-отрицательное решение): Количество «пропусков». Ситуации, когда ребенок выходил на дорогу, но система его не заметила (ошибка нейросети). Чем меньше показатель $\$FN\$, тем выше безопасность системы.$

Идентификация: Нейросеть определяет ребенка по росту, пропорциям тела и характеру движений. Точность распознавания превышает 94%.

Усиленная сигнализация: включается стробоскопическое мигание света максимальной интенсивности, привлекающее внимание водителя на расстоянии до 300 метров.

Голосовое предупреждение: Система обращается к ребенку: «Тўхтанг! Машина!» — удерживая его от необдуманного шага на дорогу.

Режим «Школа»: В часы пик возле школ система переходит в режим повышенной чувствительности с расширенной зоной обнаружения.

5. Экономическая эффективность и целевые участки

SmartZebra обеспечивает беспрецедентное соотношение стоимости и эффективности по сравнению с традиционными решениями. Относительная экономия капитальных затрат (E_{bridge}) по сравнению со стоимостью строительства моста достигает 90%:

$$E_{bridge} = \frac{[CAPEX]_{bridge} - [CAPEX]_{smartzebra}}{[CAPEX]_{bridge}} \cdot 100\% \geq 90\%$$

где, $[CAPEX]_{bridge}$ - Капитальные затраты на возведение надземного пешеходного моста (проектирование, материалы, стройка).

$[CAPEX]_{smartzebra}$ - Капитальные затраты на производство, закупку микрокомпьютеров, камер, солнечных панелей и монтаж вашего комплекса.

Экономия бюджета по сравнению со светофорной системой составляет 40%:

$$E_{light} = \frac{([CAPEX]_{light} + [OPEX]_{light}) - ([CAPEX]_{smartzebra} + [OPEX]_{smartzebra})}{([CAPEX]_{light} + [OPEX]_{light})} \cdot 100$$

где, $[CAPEX]_{light}$ - Капитальные затраты на установку классического светофорного объекта;

$[OPEX]_{light}$ - Операционные затраты на содержание традиционного светофора (постоянная оплата электроэнергии от центральной сети, выезд бригад для обслуживания);

$[OPEX]_{smartzebra}$ - Операционные затраты на комплекс SmartZebra. Данный показатель значительно ниже благодаря автономному питанию комплекса от солнечных панелей.

Главный результат — снижение ДТП на участке после установки до 1/10. Целевые участки для внедрения включают: участки трассы Ташкент-Самарканд через населенные пункты, дороги с интенсивным пешеходным движением в Ферганской долине, школьные зоны в сельской местности и переходы возле автобусных остановок на трассах.

6. Заключение

В ходе проведенного исследования была научно обоснована архитектура интеллектуальной системы защиты пешеходных переходов SmartZebra. Применение технологий компьютерного зрения и граничных вычислений позволило создать

систему, которая реагирует исключительно на реальную угрозу. Разработанный инновационный модуль AI-Child Guard доказывает высокую надежность алгоритма в условиях недостаточной видимости. Внедрение подобных комплексов вносит существенный вклад в повышение безопасности на автомобильных дорогах, проходящих через населенные пункты, выступая экономически эффективной альтернативой мостам и светофорам.

Список литературы:

18. Кафедра «Дорожная инженерия и телематика». (2024). Интеллектуальная система защиты пешеходных переходов на скоростных магистралях (концепция проекта SmartZebra), презентация. Ташкентский государственный транспортный университет.
19. Служба безопасности дорожного движения ДОБ МВД Республики Узбекистан (2025). Официальные статистические данные о дорожно-транспортных происшествиях за 2024-2025 гг. URL: <https://yhxx.uz/ru/statistics>, (дата обращения: 02.04.2026).
20. NVIDIA Corporation. (2023). NVIDIA Jetson Nano Developer Kit Specification; Raspberry Pi Ltd. (2023). Raspberry Pi 5 Product Brief. URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit> (дата обращения: 02.04.2026).
21. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLO (Version 8.0.0) [Software]. Ultralytics. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 02.04.2026).
22. Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools. Open Source Computer Vision Library. URL: <https://opencv.org/> (дата обращения: 02.04.2026).
23. Dey, S., Arnish, L. N. S., & Bajoria, S. (2025). IoT and Computer Vision for Urban Traffic Management. International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), 7(1).
24. Alfikri, M. D., & Kaliski, R. (2024). Real-Time Pedestrian Detection on IoT Edge Devices: A Lightweight Deep Learning Approach. arXiv preprint, arXiv:2409.15740.
25. Mateo Sanguino, T. de J., Lozano Domínguez, J. M., Redondo González, M. J., & Davila Martin, J. M. (2024). New Approach to Intelligent Pedestrian Detection and Signaling on Crosswalks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25(12).