

Кейс на разработку системы «Контроль дорожного полотна» для транспортных средств

1. Введение и актуальность кейса

Состояние дорожной инфраструктуры напрямую влияет на безопасность, комфорт и стоимость эксплуатации транспортных средств. Однако традиционные методы инспекции: визуальные обследования; стационарные датчики или специализированные дорожные лаборатории для оценки качества дорожного полотна, трудоёмки и обладают низкой частотой обновления данных. В результате дефекты (ямы, трещины, колейность, выбоины) часто обнаруживаются уже после инцидентов.

Современные пассажирские и коммерческие транспортные средства, особенно в городском и междугороднем сообщении, ежедневно проезжают тысячи километров по разным участкам дорог. Они представляют собой идеальную распределённую сенсорную сеть, способную собирать данные о состоянии дорожного полотна в реальном времени – при условии наличия соответствующей аналитической системы.

Разработка модуля «Контроль дорожного полотна» превращает обычный автобус, троллейбус или служебный автомобиль в мобильную систему гражданской инфраструктурной диагностики. Система объединяет данные с бортовых камер и инерциальных датчиков (IMU, датчики подвески), использует аппаратное ускорение RK3588 для анализа видео и вибраций, и автоматически выявляет, классифицирует и геопривязывает дефекты дорожного покрытия.

Особое значение имеет автономная работа на edge-устройстве: система функционирует даже без интернета, сохраняя данные локально и передавая их при первой возможности. Это критично для удалённых регионов, тоннелей и загруженных городских зон с нестабильной связью.

Кейс актуален для дорожных служб, управляющих компаниях умных городов, транспортных депо и государственных органов, стремящихся к переходу от реактивного ремонта к предиктивному обслуживанию дорожной сети на основе объективных, высокочастотных данных.

2. Цель и задачи

Цель – разработать MVP распределённой системы контроля состояния дорожного полотна, интегрированную в бортовую платформу транспортного средства на базе Rockchip RK3588, обеспечивающую автоматическое обнаружение, классификацию и геолокацию дефектов с точностью $\geq 90\%$ и пространственным разрешением ≤ 0.5 м.

Стратегические цели:

1. Снизить количество ДТП, вызванных неисправностями дорожного полотна, на 20%.
2. Оптимизировать бюджеты на ремонт за счёт целевого выявления проблемных участков.

3. Повысить комфорт пассажиров и ресурс транспортных средств за счёт объезда дефектных зон.
4. Создать единый цифровой реестр состояния дорог в масштабе города/региона.

Технические задачи:

1. Создание мультисенсорного конвейера сбора данных:
 - Интеграция с передней/нижней IP-камерой (1080p@30fps, направленной на дорожное полотно).
 - Синхронизация с 6-осевым IMU (500 Гц), датчиками подвески и GPS/ГЛОНАСС (10 Гц, точность 3 м).
2. Разработка компьютерно-зрительного модуля детекции дефектов:
 - Обнаружение ям, трещин, выбоин, колеи, неровностей и загрязнений.
 - Использование аппаратного ускорения VPU и NPU RK3588 для инференса нейросетей.
3. Реализация виброаналитического модуля:
 - Анализ аномальных колебаний кузова через IMU как признак неровностей.
 - Корреляция визуальных и инерционных аномалий для снижения ложных срабатываний.
4. Геопривязка и ранжирование дефектов:
 - Точная привязка к координатам с учётом скорости и направления движения.
 - Оценка тяжести дефекта по глубине, площади и динамическому воздействию.

Функциональные требования

1. Типы обнаруживаемых дефектов:
 - Ямы и выбоины (глубина ≥ 2 см, площадь ≥ 0.02 м²)
 - Продольные/поперечные трещины (длина ≥ 10 см)
 - Колейность (глубина ≥ 1.5 см на полосе 30 см)
 - Неровности и волны (через анализ IMU-вибраций)
 - Загрязнения (масло, лёд, гравий — как потенциальные риски)
2. Анализ и классификация:
 - Присвоение категории: низкий / средний / высокий / критический риск.
 - Оценка размеров дефекта в метрах (через калибровку по известной ширине полосы).
 - Фильтрация ложных срабатываний (тени, мусор, дорожная разметка).
3. Геолокация и отчётность:
 - Привязка к WGS84 с точностью ≤ 3 м (усиленная через фильтр Калмана).
 - Формирование события: тип, координаты, время, тяжесть, фото/видео-фрагмент (5 сек).
4. Интеграция и передача:

- Отправка критических дефектов в реальном времени (<10 сек).
 - Ежедневная выгрузка полного лога в 04:00.
 - Поддержка стандартов: GeoJSON, Protocol Buffers, MQTT, REST API.
-

Нефункциональные требования

1. Производительность:

- Обработка видеопотока 1080p@30fps + IMU 500 Гц на одном RK3588.
- Задержка от детекции до логирования: ≤ 300 мс.
- Потребление NPU: ≤ 4 TOPS (оставляя ресурсы для других модулей).

2. Точность:

- Recall (обнаружение реальных дефектов): $\geq 90\%$
- Precision (доля реальных среди найденных): $\geq 85\%$
- Пространственное разрешение: ≤ 0.5 м при скорости до 80 км/ч.

3. Надёжность:

- Работа при $-40^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$ и вибрации до 5g.
- Защита данных при аварийном отключении (UPS-конденсатор + journaling ФС).
- MTBF $\geq 50\,000$ часов.

4. Энергоэффективность:

- Пиковое энергопотребление: ≤ 15 Вт.
 - Режимы энергосбережения при низкой скорости (<10 км/ч).
-

Стек технологий

Платформа: Rockchip RK3588 (Yocto Linux с патчами реального времени)

Языки: C++ (ядро), Python (аналитика, калибровка)

Видеоанализ:

- OpenCV + RGA (аппаратное масштабирование)
- Модели: YOLOv8-seg (сегментация дефектов), U-Net (для трещин)
- Инференс: RKNN Runtime на NPU (6 TOPS \rightarrow 4 TOPS выделено)

Инерциальный анализ:

- FFT, вейвлет-преобразование, фильтр Калмана
- Библиотеки: FFTW, Eigen

Навигация: GPSD + RTK (опционально) + фильтр Калмана для уточнения

Хранение: SQLite (локальные события), MinIO (буфер видео)

Связь: MQTT 5.0, HTTP/2, WebSocket, Protocol Buffers

Обновления: RAUC + A/B partitioning для безопасного OTA

Датасеты и валидация

1. Собственный датасет:

- Съёмка дорог в разных регионах, погодных условиях, освещении.
- Разметка: bounding boxes + маски сегментации + тяжесть дефекта.
- Синхронизация с IMU-логами и данными подвески.

2. Открытые аналоги:

- RDD2022 (Road Damage Detection Dataset)
- CrackForest, CFD — для трещин
- Cityscapes — для калибровки сцены

3. Метрики:

- mAP@0.5 для детекции
- IoU ≥ 0.7 для сегментации
- Ошибка геопривязки ≤ 3 м

Примечание для студентов

Главная сложность — разделить реальные дефекты от артефактов: тень от фонаря, след от шины, мокрое пятно могут выглядеть как яма. Поэтому ключевая стратегия — фузионный анализ: только если и камера видит аномалию, и IMU фиксирует удар, событие считается достоверным.

Начните с одного типа дефекта (например, ямы) и одного сенсора (камера), затем добавьте IMU и корреляцию. Обязательно проведите калибровку по известным объектам (ширина полосы, решётки ливнёвок) для перевода пикселей в метры.

Не забывайте система работает в движении, при вибрации, перепадах освещения и дожде/снегопаде. Устойчивость к таким условиям важнее идеальной точности в лаборатории.

Результат кейса – не просто «детектор ям», а «цифровой глаз» дорожной службы, который видит всё, что видят тысячи колёс, и превращает каждый автобус в сенсор городской транспортной инфраструктуры.