

Санников Михаил Александрович, бакалавр
Уфимский университет науки и технологий
Sannikov Mikhail Aleksandrovich
Ufa University of Science and Technology

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПОДХОДЫ К ПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ ВИДЕОДАНЫХ В МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ARCHITECTURAL APPROACHES TO VIDEO STREAMING IN MOBILE ROBOTIC SYSTEMS

Аннотация. Рассмотрены архитектурные подходы к передаче видеоданных в мобильных робототехнических системах. Проанализированы требования к задержке, пропускной способности и устойчивости связи, особенности RTP и WebRTC, механизмы ICE, STUN и TURN, а также принципы разделения потоков для навигации, машинного зрения, записи и операторского контроля.

Abstract. Architectural approaches to video transmission in mobile robotic systems are reviewed. Requirements for latency, bandwidth, and communication robustness are analyzed together with RTP and WebRTC, ICE, STUN and TURN mechanisms, and stream separation for navigation, machine vision, recording, and operator monitoring.

Ключевые слова: Потокное видео, мобильная робототехника, WebRTC, RTP, задержка, компьютерное зрение.

Keywords: Video streaming, mobile robotics, WebRTC, RTP, latency, computer vision.

Введение

Современный мобильный робот использует видеокамеру одновременно как источник данных для алгоритмов восприятия и как средство удалённого контроля. Видеопоток может поступать в модуль локализации, детектор объектов, систему записи и интерфейс оператора. Эти потребители предъявляют разные требования: для управления важна минимальная задержка, для алгоритмов компьютерного зрения – стабильная частота кадров и исходное качество изображения, а для архива – полнота и предсказуемость записи. Поэтому передача видео должна рассматриваться не как отдельный сетевой канал, а как часть общей вычислительной архитектуры робота.

Передача мультимедиа в реальном времени обычно строится поверх протоколов, ориентированных на ограничение задержки. RTP задаёт структуру транспортировки потоковых данных и механизм временных меток, а WebRTC объединяет передачу медиаданных, согласование параметров соединения, защиту и работу через сетевые преобразователи адресов [1, 2]. Для мобильной робототехники особенно важна способность системы сохранять работоспособность при смене сети, нестабильном беспроводном канале и наличии NAT. Цель статьи – систематизировать архитектурные решения для потоковой передачи видео и определить принципы их практического применения.

Требования к видеотранспортному контуру

Основным ограничением для дистанционного управления является сквозная задержка от момента получения кадра сенсором до его отображения или обработки. Её можно представить как сумму задержек захвата, предварительной обработки, кодирования, очереди передачи, сетевого транспорта, декодирования и буферизации. Уменьшение только одного компонента не гарантирует низкой итоговой задержки, если в другой части конвейера накапливается очередь кадров. Поэтому в системах реального времени целесообразно ограничивать глубину очередей и при перегрузке предпочитать более свежий кадр устаревшему.

Вторым параметром является пропускная способность. Несжатый видеопоток даже при умеренном разрешении создаёт нагрузку, существенно превышающую возможности типичного беспроводного канала мобильной платформы. Кодирование снижает объём передаваемых данных, но требует вычислительных ресурсов и может увеличить задержку. На



практике требуется компромисс между разрешением, частотой кадров, битрейтом и сложностью кодека. Для потоков, используемых машинным зрением внутри робота, иногда рационально передавать кадры локально без повторного кодирования, тогда как операторский канал кодируется аппаратно и отправляется по сети.

Третье требование связано с потерями и джиттером. В мультимедийном канале повторная передача каждого потерянного пакета не всегда полезна: запоздавший фрагмент может прийти после момента, когда кадр уже потерял актуальность. RTP изначально предназначен для приложений реального времени и использует номера последовательности и временные метки, позволяющие выявлять потери и восстанавливать порядок данных [2]. Поведение системы при потерях должно зависеть от назначения потока: для операторского просмотра допустимо кратковременное снижение качества, а для архива важнее полнота записи.

WebRTC и прохождение сетевых границ

WebRTC представляет практический интерес для робототехники, поскольку сочетает передачу аудио- и видеоданных в реальном времени с механизмами установления защищённого соединения [1]. При этом сигнальный обмен не фиксируется одним обязательным протоколом и может быть реализован приложением через HTTP, WebSocket или другой канал. После обмена параметрами стороны формируют набор сетевых кандидатов и пытаются установить наиболее прямой доступный путь.

Для прохождения NAT используется ICE. Протокол формирует пары локальных и удалённых кандидатов, упорядочивает их по приоритету и выполняет проверки связности [3]. STUN позволяет узлу определить внешний адрес и параметры отображения через NAT [4]. Если прямой путь недоступен, TURN предоставляет ретрансляцию трафика через промежуточный сервер [5]. Такая схема важна для мобильного робота, который может находиться за операторской сетью, LTE-маршрутизатором или корпоративным шлюзом и не иметь постоянного входящего адреса.

Выбор маршрута влияет на задержку и стоимость трафика. Прямое соединение предпочтительно, но не должно быть единственным вариантом. Наличие TURN-сервера повышает вероятность установления связи в сложных сетях, хотя добавляет промежуточный узел. С точки зрения безопасности WebRTC предусматривает обязательное шифрование медиатрафика и использование защищённых механизмов установления ключей [1]. Для робототехнической платформы это снижает риск перехвата изображения и несанкционированного подключения к каналу наблюдения.

Разделение потоков и управление нагрузкой

Практичная архитектура должна разделять захват видеосигнала и его потребителей. Если каждый модуль независимо открывает физическую камеру и выполняет собственное преобразование изображения, возрастает вероятность конфликтов доступа и дублирования вычислений. Рациональнее организовать единый процесс захвата, который формирует несколько логических ветвей: поток исходного или слабо обработанного изображения для алгоритмов восприятия, поток записи и поток предварительного просмотра. Такое разветвление позволяет независимо выбирать разрешение, частоту кадров и способ кодирования для каждой задачи.

Для операторского просмотра полезно применять адаптацию параметров передачи. При ухудшении канала снижение битрейта или разрешения часто предпочтительнее накопления большой очереди и роста задержки. В контуре управления важнее увидеть актуальную сцену с умеренным качеством, чем получить старое изображение высокого разрешения. Напротив, локальная запись может выполняться с более высоким качеством, поскольку не ограничена внешним каналом. Разделение приоритетов предотвращает ситуацию, когда архивный поток вытесняет телеметрию или управляющие сообщения.

Стабильность системы повышается при явном контроле состояния каждого участка конвейера. Следует отслеживать фактическую частоту кадров, время кодирования, размер



очереди, потери пакетов и задержку доставки. При перегрузке полезно заранее определить политику деградации: уменьшение частоты кадров, снижение битрейта, переход на резервный маршрут или временное отключение второстепенного потока. Такой подход делает поведение платформы предсказуемым и упрощает диагностику.

Особенности применения в мобильной робототехнике

В робототехнической системе видеопередача тесно связана с навигацией и безопасностью. Поток для машинного зрения желательно обрабатывать максимально близко к источнику, чтобы сетевые задержки не влияли на локальные реакции робота. На удалённую сторону целесообразно передавать уже сжатое видео и метаданные: положение, состояние приводов, диагностические параметры и результаты детекции. При потере внешнего канала базовые функции безопасной остановки и локального обхода препятствий должны сохраняться.

Таким образом, универсального видеопотока для всех подсистем обычно недостаточно. Наиболее устойчивое решение строится как набор связанных, но независимо управляемых трактов, использующих общий источник кадров. Внешний канал ориентируется на низкую задержку и адаптацию к сети, локальный аналитический тракт – на предсказуемость поступления данных, а запись – на полноту и качество.

Заключение

Потоковая передача видеоданных в мобильной робототехнике требует совместного учёта сетевых и вычислительных факторов. RTP предоставляет базовые механизмы транспортировки данных реального времени, а WebRTC дополняет их установлением соединения, защитой и адаптацией к реальным сетевым условиям. ICE, STUN и TURN позволяют повысить доступность соединения при работе через NAT и неоднородные сети [3-5].

Для практического применения целесообразно отделять захват камеры от потребителей, формировать разные ветви для машинного зрения, записи и операторского просмотра, а также ограничивать очереди в критичных по задержке трактах. Такая архитектура снижает взаимное влияние подсистем, позволяет управлять деградацией качества при перегрузке и обеспечивает более предсказуемое поведение мобильной робототехнической платформы

Список литературы:

1. Alvestrand H. Overview: Real-Time Protocols for Browser-Based Applications. RFC 8825. IETF. 2021.
2. Schulzrinne H., Casner S., Frederick R., Jacobson V. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 3550. IETF. 2003.
3. Keränen A., Holmberg C., Rosenberg J. Interactive Connectivity Establishment (ICE): A Protocol for Network Address Translator (NAT) Traversal. RFC 8445. IETF. 2018.
4. Petit-Huguenin M., Salgueiro G., Rosenberg J., Wing D., Mahy R., Matthews P. Session Traversal Utilities for NAT (STUN). RFC 8489. IETF. 2020.
5. Reddy T., Johnston A., Matthews P., Rosenberg J. Traversal Using Relays around NAT (TURN): Relay Extensions to STUN. RFC 8656. IETF. 2020

