

УДК 621.865.8

Ольшевский Антон Владимирович, магистрант, 2 курс. Факультет машиностроения и аэрокосмической техники, Кафедра мехатроники и робототехники, Воронежский государственный университет, г. Воронеж

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕРФЕЙСОВ СВЯЗИ RS-232, CAN BUS И ETHERNET ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ

В статье проведён сравнительный анализ трёх распространённых интерфейсов связи, используемых в системах управления роботами-манипуляторами: RS-232, CAN bus и Ethernet. Рассмотрены основные технические характеристики (скорость передачи данных, дальность, топология, помехоустойчивость, детерминизм). Выделены достоинства и недостатки каждого интерфейса применительно к задачам управления манипуляторами — от простых учебных стендов до промышленных и коллаборативных роботов. На основе сравнения даны рекомендации по выбору интерфейса в зависимости от требований к реальному времени, сложности реализации и масштабируемости. Результаты работы могут быть полезны при разработке программно-аппаратного обеспечения физических моделей манипуляторов.

The paper provides a comparative analysis of three common communication interfaces used in robot manipulator control systems: RS-232, CAN bus, and Ethernet. Key technical characteristics (data rate, transmission distance, topology, noise immunity, determinism) are examined. The advantages and disadvantages of each interface are identified with respect to manipulator control tasks — from simple educational stands to industrial and collaborative robots. Based on the comparison, recommendations are given for selecting an interface according to real-time requirements, implementation complexity, and scalability. The results can be useful when developing hardware and software for physical manipulator models.

Ключевые слова: робот-манипулятор, интерфейсы связи, RS-232, CAN bus, Ethernet, система управления, промышленная сеть, реальное время, помехоустойчивость.

Keywords: trobot manipulator, communication interfaces, RS-232, CAN bus, Ethernet, control system, industrial network, real-time, noise immunity.

Введение

Современные роботы-манипуляторы представляют собой сложные электромеханические системы, содержащие контроллер верхнего уровня, приводы, датчики обратной связи и, нередко, системы технического зрения. Эффективность работы манипулятора напрямую зависит от надёжности и скорости обмена данными между этими компонентами. Исторически сложилось, что для связи в робототехнике использовались различные интерфейсы — от простого асинхронного последовательного порта RS-232 до высокоскоростных промышленных сетей на базе Ethernet. Выбор интерфейса определяет не только производительность, но и стоимость, сложность разработки и возможность модернизации системы. Цель данной работы — провести сравнительный анализ трёх интерфейсов: RS-232, CAN bus и Ethernet (включая его промышленные расширения), выявить их сильные и слабые стороны применительно к системам управления манипуляторами. Задачи включают описание каждого интерфейса, построение сравнительной таблицы по ключевым параметрам и формулирование рекомендаций для разных классов манипуляторов.

Основная часть

Краткая характеристика интерфейсов

RS-232 — один из старейших последовательных интерфейсов, стандартизированный ещё в 1960-х годах и позднее обновлённый в версии TIA/EIA-232-F [1]. Он реализует асинхронную дуплексную связь по схеме «точка-точка» на расстояниях до 15 метров. Стандартный ряд скоростей обычно заканчивается на 115,2 кбит/с, однако в отдельных реализациях на коротких линиях достижимы скорости до 230 кбит/с. Простота реализации и низкая стоимость сделали RS-232 популярным в

учебных и лабораторных манипуляторах на базе Arduino, а также в старых промышленных роботах (например, PUMA). Однако отсутствие поддержки многоточечной топологии, низкая помехоустойчивость (недифференциальный сигнал) и невозможность гарантировать жёсткое реальное время ограничивают его применение в современных системах.

CAN bus (Controller Area Network) был разработан компанией Bosch для автомобильной электроники, но затем широко внедрён в промышленной автоматизации и робототехнике (протокол CANopen) [2]. CAN — это многоточечная дифференциальная шина с арбитражем сообщений на основе приоритетов (CSMA/CA). Скорость достигает 1 Мбит/с при длине линии до 40 м; при максимальной длине 1000 м скорость снижается примерно до 50 кбит/с. Благодаря детерминированному доступу и высокой помехоустойчивости CAN bus активно используется в промышленных манипуляторах KUKA, ABB и многих других. Недостатком можно считать ограниченную пропускную способность для передачи больших объёмов данных (например, видеопотока).

Ethernet (IEEE 802.3) [3] доминирует в локальных вычислительных сетях. В промышленной робототехнике применяют как стандартный Ethernet (TCP/IP) для некритичных задач, так и специализированные промышленные протоколы реального времени — EtherCAT, PROFINET IRT, Ethernet/IP. Скорости от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с позволяют передавать данные с камер, лидаров и обеспечивать удалённое управление. Топология «звезда» упрощает подключение многих узлов. Однако для достижения детерминизма требуются специальные аппаратные и программные решения, а сложность стека протоколов выше, чем у RS-232 или CAN.

Таблица № 1: Сравнение характеристик

Параметр	RS-232	CAN bus	Ethernet (промышленный)
Максимальная скорость, бит/с	115 200 (до 230 000)	1 Мбит/с (CAN 2.0); до 5–8 Мбит/с (CAN FD, фаза данных)	100 Мбит/с / 1 Гбит/с и выше
Максимальная длина, м	15	1000 (с пониженной скоростью)	100 (медь), до 40 км (оптика)
Топология	точка-точка	шина с терминированием	звезда / дерево
Количество узлов	2	до 110	практически не ограничено
Метод доступа	ведущий-ведомый	CSMA/CA с арбитражем	CSMA/CD (или детерминированный с коммутаторами)
Детерминизм (реальное время)	отсутствует	средний (гарантированный арбитраж)	высокий (с EtherCAT, TSN)
Помехоустойчивость	низкая	высокая (дифференциальная пара)	средняя (экранированная витая пара, оптика)
Сложность реализации	очень низкая	средняя	высокая
Примеры в манипуляторах	Учебные роботы (Arduino), старые PUMA	KUKA, ABB (CANopen), учебные модели на STM32	Universal Robots (EtherCAT), Franka Emika (TCP/IP), KUKA LBR iiwa (EtherCAT), ROS-совместимые системы [4, 5]

Анализ применимости для различных типов манипуляторов

Для простых учебных моделей (например, манипулятор на 3–4 степени свободы с микроконтроллером Arduino) интерфейс RS-232 или его современная версия USB-UART остаётся оправданным выбором: минимальные затраты, простота отладки, достаточная скорость для передачи команд положения. Однако уже при добавлении нескольких датчиков и необходимости синхронизации нескольких приводов пропускной способности может не хватить.

Промышленные манипуляторы среднего класса чаще используют CAN bus с протоколом CANopen [2, 5]. Это обеспечивает детерминированный обмен командами управления (обычно 1–2 мс), высокую помехоустойчивость в условиях цеха, возможность подключения до сотни интеллектуальных приводов и датчиков по одной шине. При этом разработка не требует дорогих сетевых стеков.

Современные коллаборативные и исследовательские роботы (Universal Robots на EtherCAT, Franka Emika на проприетарном протоколе поверх TCP/IP, KUKA LBR iiwa на EtherCAT, а также системы на базе ROS) применяют промышленный Ethernet — как правило, EtherCAT либо специализированные протоколы реального времени [4, 5]. Высокая скорость необходима для обработки данных с камер, тактильных

сенсоров, а также для реализации распределённых вычислений (например, расчёт обратной кинематики на внешнем компьютере). Ethernet позволяет легко интегрировать манипулятор в Industry 4.0 и облачные сервисы.

Соображения для разработки физической модели манипулятора

При создании физической модели робота-манипулятора в рамках магистерской диссертации наиболее рациональной представляется гибридная архитектура. Для связи с приводами (сервомоторами, оснащёнными CAN-интерфейсом) оптимально использовать шину CAN — она обеспечивает надёжное и своевременное управление движением. Для взаимодействия с компьютером верхнего уровня, на котором выполняются ресурсоёмкие расчёты (планирование траекторий, обратная кинематика, визуализация) и обработка данных от камеры, целесообразно применить Ethernet [5]. Такое разделение сочетает детерминизм управления и высокую пропускную способность для сенсорных данных.

Заключение

1. RS-232 является устаревшим интерфейсом с точки зрения производительности и масштабируемости, однако сохраняет ценность для отладки и простейших учебных систем благодаря сверхнизкой сложности.
2. CAN bus представляет собой «золотую середину»: достаточная скорость, детерминизм, отличная помехоустойчивость и умеренная сложность реализации. Он остаётся предпочтительным для большинства промышленных манипуляторов и серьёзных любительских проектов.
3. Ethernet, особенно с расширениями реального времени, такими как EtherCAT и развивающимися стандартами Time-Sensitive Networking (TSN), — это интерфейс будущего. Он обеспечивает высочайшую пропускную способность, лёгкую интеграцию с верхнеуровневыми системами и поддержку современных парадигм (распределённое управление, облачная робототехника). Основные барьеры — более высокая стоимость и сложность настройки.
4. Для разрабатываемой физической модели манипулятора рекомендована гибридная архитектура: CAN для приводов, Ethernet для сенсоров и внешнего

управления. Перспективным направлением также является изучение беспроводных интерфейсов (Wi-Fi 6, 5G) для мобильных манипуляторов.

Список литературы

1. Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange : TIA/EIA-232-F. — Telecommunications Industry Association, 1997.
2. Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling : ISO 11898-1:2015. — International Organization for Standardization, 2015.
3. IEEE Standard for Ethernet : IEEE Std 802.3-2018. — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
4. Robotics and Automation Handbook / Ed. by T. Kurfess. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2018.
5. Титаев А.А. Промышленные сети : учебное пособие / А.А. Титаев. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020.

Introduction

Modern robot manipulators are complex electromechanical systems comprising a high-level controller, actuators, feedback sensors, and often machine vision systems. The performance of a manipulator directly depends on the reliability and speed of data exchange between these components. Historically, various interfaces have been used for communication in robotics — from the simple asynchronous serial port RS-232 to high-speed industrial networks based on Ethernet. The choice of interface determines not only performance but also cost, development complexity, and system upgradeability. The aim of this work is to conduct a comparative analysis of three interfaces — RS-232, CAN bus, and Ethernet (including its industrial extensions) — and to identify their strengths and weaknesses when applied to manipulator control systems. The objectives include describing each interface, constructing a comparative table of key parameters, and formulating recommendations for different classes of manipulators.

Main Body

Brief Characteristics of the Interfaces

RS-232 is one of the oldest serial interfaces, standardised as early as the 1960s and later updated in the TIA/EIA-232-F version [1]. It implements asynchronous full-duplex point-to-point communication over distances of up to 15 meters. The standard baud rate range usually ends at 115.2 kbit/s; however, in certain implementations over short lines, speeds of up to 230 kbit/s are achievable. Simplicity of implementation and low cost have made RS-232 popular in educational and laboratory manipulators based on Arduino, as well as in older industrial robots (e.g., PUMA). However, the lack of multi-drop support, low noise immunity (single-ended signalling), and the inability to guarantee hard real-time performance limit its application in modern systems.

CAN bus (Controller Area Network) was developed by Bosch for automotive electronics but was subsequently widely adopted in industrial automation and robotics (CANopen protocol) [2]. CAN is a multi-drop differential bus with priority-based message arbitration (CSMA/CA). The data rate reaches 1 Mbit/s for line lengths up to 40 m; at the maximum length of 1000 m, the rate drops to approximately 50 kbit/s. Thanks to deterministic access and high noise immunity, CAN bus is actively used in industrial manipulators by KUKA, ABB, and many others. A drawback can be considered the limited bandwidth for transmitting large volumes of data (e.g., video streams).

Ethernet (IEEE 802.3) [3] dominates local area networks. In industrial robotics, both standard Ethernet (TCP/IP) is used for non-critical tasks, and specialised real-time industrial protocols — EtherCAT, PROFINET IRT, Ethernet/IP. Speeds from 100 Mbit/s to 1 Gbit/s and beyond allow transferring data from cameras, lidars, and enabling remote control. The star topology simplifies connecting many nodes. However, achieving determinism requires special hardware and software solutions, and the protocol stack complexity is higher than that of RS-232 or CAN.

Table No. 1: Comparison of characteristics

Parameter	RS-232	CAN bus	Ethernet (industrial)
Maximum data rate, bit/s	115,200 (up to 230,000)	1 Mbit/s (CAN 2.0); up to 5–8 Mbit/s (CAN FD, data phase)	100 Mbit/s / 1 Gbit/s and above
Maximum length, m	15	1000 (at reduced speed)	100 (copper), up to 40 km (fibre)
Topology	point-to-point	bus with termination	star / tree
Number of nodes	2	up to 110	virtually unlimited
Access method	master-slave	CSMA/CA with arbitration	CSMA/CD (or deterministic with switches)
Determinism (real-time)	absent	medium (guaranteed arbitration)	high (with EtherCAT, TSN)
Noise immunity	low	high (differential pair)	medium (shielded twisted pair, fibre)
Implementation complexity	very low	medium	high
Examples in manipulators	Educational robots (Arduino), older PUMA	KUKA, ABB (CANopen), educational STM32 models	Universal Robots (EtherCAT), Franka Emika (TCP/IP), KUKA LBR iiwa (EtherCAT), ROS-compatible systems [4, 5]

Applicability Analysis for Different Types of Manipulators

For simple educational models (e.g., a 3–4 degree-of-freedom manipulator with an Arduino microcontroller), the RS-232 interface or its modern USB-UART version remains a justified choice: minimal costs, ease of debugging, and sufficient speed for transmitting position commands. However, even with the addition of several sensors and the need to synchronise multiple drives, the bandwidth may become insufficient.

Mid-range industrial manipulators more often employ CAN bus with the CANopen protocol [2, 5]. This provides deterministic exchange of control commands (typically 1–2 ms), high noise immunity on the factory floor, and the ability to connect up to a hundred intelligent drives and sensors on a single bus. At the same time, development does not require expensive network stacks.

Modern collaborative and research robots (Universal Robots over EtherCAT, Franka Emika with a proprietary protocol over TCP/IP, KUKA LBR iiwa over EtherCAT, as well as ROS-based systems) use industrial Ethernet — typically EtherCAT or specialised real-time protocols [4, 5]. High speed is necessary for processing data from cameras, tactile sensors, and for implementing distributed computations (e.g., inverse kinematics calculation on an external computer). Ethernet allows easy integration of the manipulator into Industry 4.0 and cloud services.

Considerations for Developing a Physical Manipulator Model

When creating a physical model of a robot manipulator as part of a master's thesis, a hybrid architecture appears most rational. For communication with actuators (servomotors equipped with a CAN interface), it is optimal to use a CAN bus — it provides reliable and timely motion control. For interaction with the upper-level computer, where resource-intensive calculations (trajectory planning, inverse kinematics, visualisation) and camera data processing are performed, it is advisable to use Ethernet [5]. Such a division combines deterministic control and high bandwidth for sensor data.

Conclusion

1. RS-232 is an obsolete interface in terms of performance and scalability; however, it retains value for debugging and the simplest educational systems due to its extremely low complexity.

2. CAN bus represents the “golden mean”: adequate speed, determinism, excellent noise immunity, and moderate implementation complexity. It remains preferable for the majority of industrial manipulators and serious hobbyist projects.

3. Ethernet, especially with real-time extensions such as EtherCAT and the evolving Time-Sensitive Networking (TSN) standards, is the interface of the future. It offers the highest bandwidth, easy integration with upper-level systems, and support for modern paradigms (distributed control, cloud robotics). The main barriers are higher cost and configuration complexity.

4. A hybrid architecture is recommended for the physical manipulator model under development: CAN for actuators, Ethernet for sensors and external control. A promising direction is also the study of wireless interfaces (Wi-Fi 6, 5G) for mobile manipulators.

References

1. Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange : TIA/EIA-232-F. — Telecommunications Industry Association, 1997.

2. Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling : ISO 11898-1:2015. — International Organization for Standardization, 2015.

3. IEEE Standard for Ethernet : IEEE Std 802.3-2018. — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.

4. Robotics and Automation Handbook / Ed. by T. Kurfess. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2018.

5. Titaev A.A. Industrial Networks : textbook / A.A. Titaev. — Yekaterinburg : Ural University Press, 2020.