



## QoS Provisioning: Key Drivers and Enablers Toward the Tactile Internet in Beyond 5G Era

MUHAMMAD ZUBAIR ISLAM<sup>1</sup>, (Student Member, IEEE), RASHID ALI<sup>2</sup>, (Member, IEEE), AMIR HAIDER<sup>1</sup>, AND HYUNG SEOK KIM<sup>1</sup>, (Member, IEEE)

<sup>1</sup>Department of Intelligent Mechatronics Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Information and Communication Technologies, Universitat Pompeu Fabra, 08018 Barcelona, Spain

Corresponding authors: Amir Haider (amirhaider@sejong.ac.kr) and Hyung Seok Kim (hyungkim@sejong.ac.kr)

This work was supported in part by the Institute of Information and Communications Technology Planning and Evaluation (IITP) Grant by the Korean Government through the Ministry of Science and ICT (MSIT) under Grant 2022-0-00331, in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant by the Korean Government through MSIT under Grant 2022R1F1A1063662, and in part by the Strengthening Research and Development Capability Program of Sejong University.

M. Z. Islam, R. Ali, A. Haider and H. S. Kim, "QoS Provisioning: Key Drivers and Enablers Toward the Tactile Internet in Beyond 5G Era," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 85720-85754, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3197900.

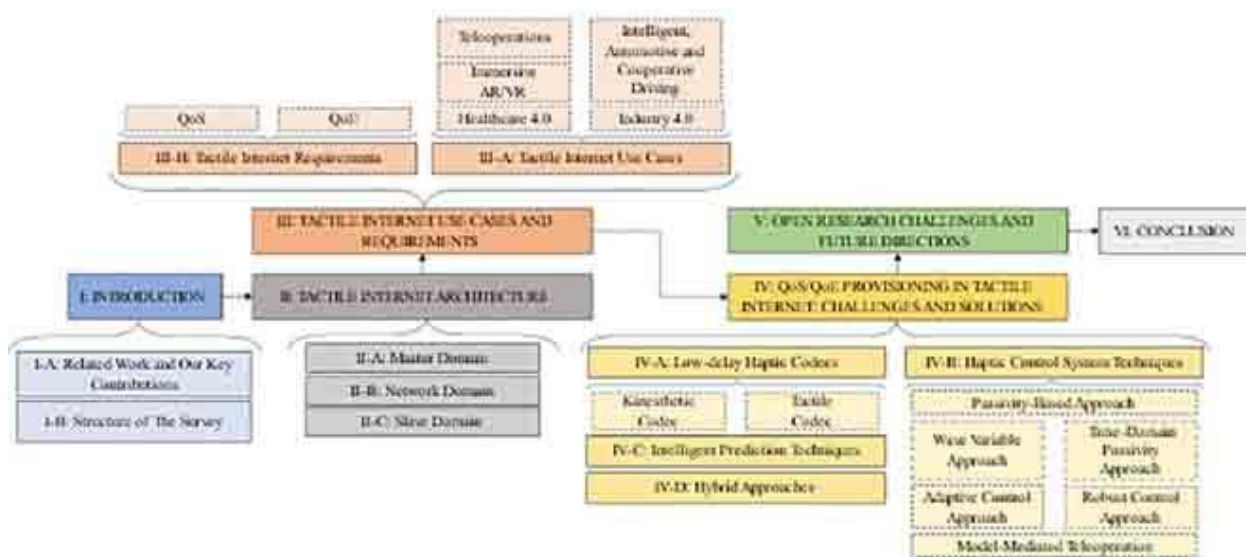
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9853511/references#references>

Сигнальный перевод 2023 г. Куприяновский В.П. [v.kupriyanovsky@rut.digital](mailto:v.kupriyanovsky@rut.digital)

### Абстракт:

Тактильный Интернет стал революцией в интернет-технологиях, значительно улучшив передачу наборов навыков (аудио, видео, текст и тактильные ощущения) по каналам связи по сравнению с традиционными данными Triple Play (аудио, видео, текст). Это сильный кандидат для поддержки интеллектуальных приложений следующего поколения, чувствительных к задержкам и не допускающих потерь. Однако строгие требования к тактильному Интернету, включая сверхнизкую задержку, сверхвысокую надежность, высокую доступность и сверхбезопасность, создают критические проблемы для обеспечения качества обслуживания (QoS). Следовательно, было предложено несколько подходов для удовлетворения этих требований QoS. В этой статье рассматриваются подходы к предоставлению QoS для тактильного Интернета. Во-первых, мы представляем ключевые концепции технологий пятого поколения и выше, тактильного Интернета и тактильной коммуникации. Во-вторых, мы обсуждаем варианты использования тактильного Интернета вместе со строгими требованиями к качеству обслуживания. В-третьих, мы классифицируем существующие решения, включая тактильные кодеки, конструкции систем управления, гибридные схемы и модели интеллектуального прогнозирования; подробно обсудить эти подходы к улучшению QoS для тактильных интернет-приложений; и исследовать сильные и слабые стороны для каждого предлагаемого решения.

Наконец, мы представляем открытые исследовательские задачи и обсуждаем потенциальные будущие направления исследований для реализации тактильных интернет-сервисов.



## РАЗДЕЛ I. Введение

Интернет добился огромных успехов благодаря непрерывной революции в области информационных и коммуникационных технологий от фиксированного Интернета первого поколения (1G) к мобильному Интернету пятого поколения (5G) и за его пределами 5G (B5G) [1], [2], [3]. Технологии мобильной связи жизненно необходимы во многих сферах жизни, включая образование, здравоохранение, развлечения, транспорт и т. д.; и обеспечить связь «человек-человек» (H2H) для обмена данными с использованием мобильных устройств через Интернет. Инновации в этих технологиях прокладывают путь к обеспечению связи «машина-машина» (M2M) или «устройство-устройство» (D2D), то есть к Интернету вещей (IoT) [4]. IoT означает, что все в мире может быть подключено в любом месте и в любое время, но он не распространяется на связь между человеком и машиной (H2M). Чтобы справиться с этими ограничениями, развитие Интернета вещей обеспечивает основу для передачи осязания и срабатывания в режиме реального времени для обеспечения успешного взаимодействия между людьми и машинами [5]. На рис. 1 показана эволюция коммуникационных технологий от H2H-контента к H2M-управлению и управлению. Интернет-технологии с 1980-х по 1990-е годы обеспечивали простую связь H2H. Развитие мультимедийных услуг в 2000-х годах позволило использовать беспроводные мультимедийные приложения, и различные исследователи разрабатывали передовые технологии, такие как IoT и носимые устройства, для обеспечения связи M2M. Недавняя технологическая тенденция предусматривает подключение человеческих ощущений к Интернету для обеспечения H2M, открывая дверь для Интернета био-нановещей (IoBNT), то есть Тактильного Интернета.

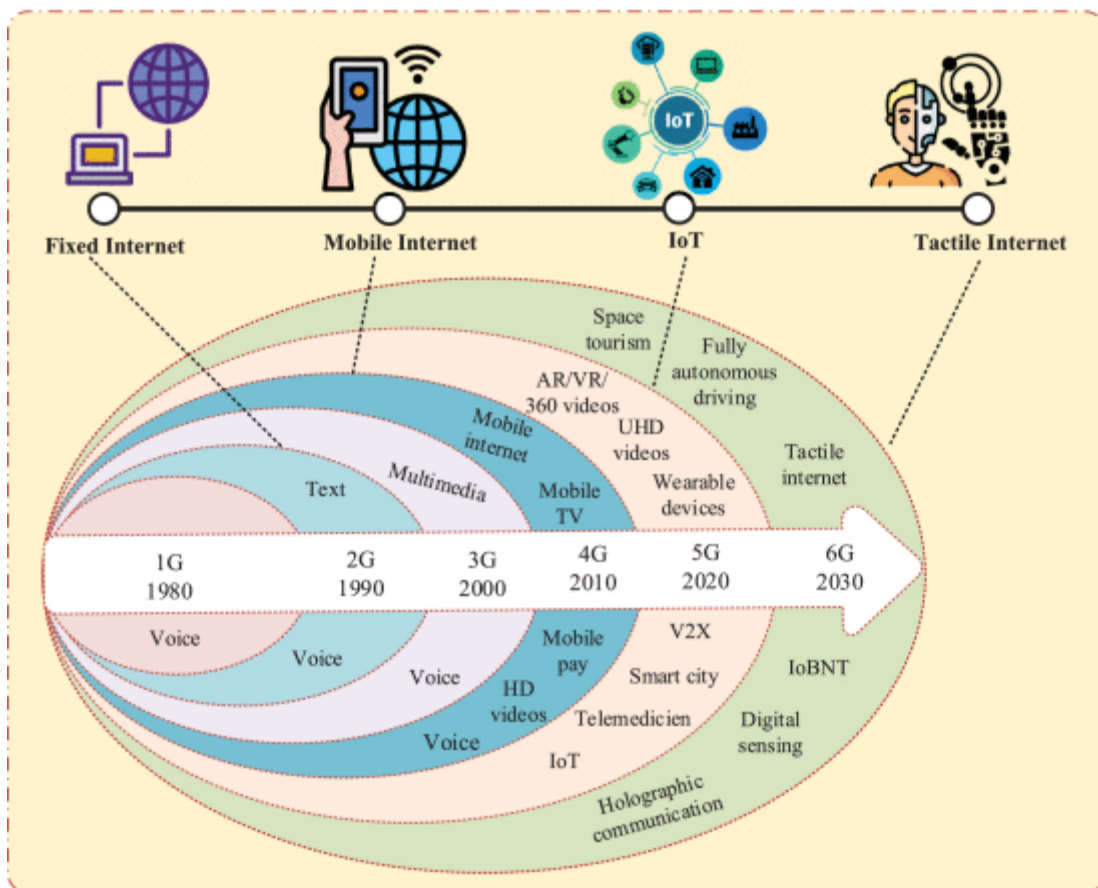


РИСУНОК 1. - Технологическая оценка Тактильного Интернета (сокращения определены в Таблице 2).

Эти технологические достижения меняют парадигму, превращая весь мир из обычного Интернета доставки контента в Интернет доставки с набором навыков, вводя концепцию Тактильного Интернета [5]. Тактильный Интернет обеспечивает связь H2M, когда человек может взаимодействовать с машинами и удаленно управлять и испытывать физические прикосновения, включая традиционные данные Triple Play (аудио, видео и текст) в режиме реального времени по беспроводным каналам. Эта концепция была представлена в 2014 году Феттвейсом [5], где он заявил, что «тактильный Интернет заключается в том, что коммуникации созданы для обеспечения управления и контроля, что является большим переходом от перемещения только контента». Таким образом, Tactile Internet рассматривается как Интернет вещей следующего поколения с различными новыми функциями, включая сверхнизкую задержку, сверхвысокую надежность, высокую доступность и сверхвысокую безопасность для обеспечения тактильной связи в реальном времени по сетям 5G/B5G. Современные коммуникационные и сетевые технологии (5G, IoT и тактильный интернет) преследуют разные цели, но их требования и функции частично совпадают. На рис. 2 показаны определения Международного союза электросвязи (МСЭ) для сетей мобильной связи (от 2G до B5G), IoT и тактильного Интернета [6], чтобы помочь понять тактильную связь. ternet и определить общие черты между технологиями.

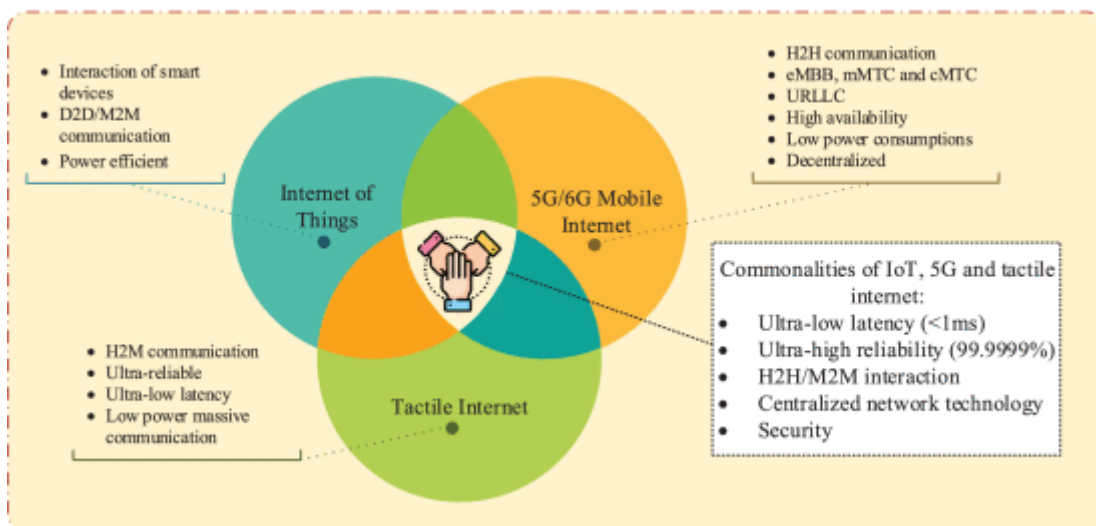


РИСУНОК 2. — Перекрывающиеся функции и различия между концепциями и технологиями, связанными с 5G/B5G, IoT и тактильным Интернетом (сокращения определены в таблице 2).

Тактильный Интернет считается будущим Интернетом из-за его уникальных характеристик, включая управление и контроль над физическими и виртуальными объектами в режиме реального времени посредством двусторонней связи. Поэтому несколько международных организаций по стандартизации работали над уточнением существующих и разработкой подходящих новых определений сетей связи для передачи тактильной информации с обычными типами трафика. Ключевые организации по стандартизации, в том числе Партнерский проект 3-го поколения (3GPP), Общество инженеров кино и телевидения (SMPTE), Европейский институт стандартов электросвязи (ETSI), Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и МСЭ, работают над тем, чтобы Тактильный Интернет реальность [7], [8], [9], [10], [11]. 3GPP [7] и ITU [11] уже классифицировали варианты использования на три категории: массовая связь машинного типа (m-MTC), критическая связь машинного типа (c-MTC) и расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB), наряду с их требованиями. 3GPP определяет c-MTC как сверхнадежную связь с малой задержкой (URLLC), предоставляющую услуги тактильного Интернета [7]. SMPTE [8] работает над объединением тактильной информации с аудиовизуальным трафиком, а ETSI рассматривает требования End-to-End (E2E) и производительность тактильных интернет-приложений [9].

В отличие от этих стандартизаций, рабочая группа (PГ) [10] по стандартам тактильного интернета IEEE исследует недостающие аспекты 5G и других сетей связи для реализации тактильного интернета. Ключевые разработки и прогресс рабочей группы в направлении стандартизации обозначены как IEEE P1918.X. Базовый стандарт Tactile Internet определяется как IEEE P1918.1, предоставляя структуру Tactile Internet, включая определения, эталонную архитектуру, технические функции и различные сценарии приложений. Другие стандарты в рамках IEEE P1918.1 (IEEE P1918.1.1, IEEE P1918.1.2 и IEEE P1918.1.3) сосредоточены на тактильных кодеках, искусственном интеллекте (AI) и управлении доступом к среде (MAC) соответственно. Стандартная архитектура охватывает не только 5G, но и любую другую коммуникационную сеть, которая удовлетворяет требованиям сценария использования E2E Tactile Internet, включая надежность, задержку, доступность и безопасность.

По сравнению с обычными интернет-услугами, варианты использования Тактильного Интернета требуют более высокого качества обслуживания (QoS) и качества взаимодействия (QoE). Даже услуги Tactile Internet предъявляют более высокие требования, включая высокую скорость передачи пакетов, меньшую потерю пакетов и низкую задержку при переменной временной задержке для выполнения требований QoS и QoE. Низкая обработка данных, контроль стабильности и интеллектуальные алгоритмы прогнозирования — это возможные решения для решения этих проблем при реализации тактильного Интернета. В нескольких обзорных документах рассматривается Тактильный Интернет, но в большинстве из них рассматриваются только решения для сетей связи, обеспечивающие работу Тактильного Интернета, и лишь немногие рассматривают решения для обработки данных, контроля стабильности и интеллектуального прогнозирования для обеспечения QoS и QoE для услуг Тактильного Интернета. В этой статье представлен всесторонний обзор, который включает в себя текущую возможную обработку данных, решения для контроля стабильности и интеллектуальные методы прогнозирования для тактильных интернет-приложений.

#### А. Сопутствующая работа и наш основной вклад

Коммуникационные технологии постоянно проходят быструю оценку для решения новых возможностей и проблем. Как обсуждалось в предыдущем разделе, тактильный Интернет является подходящей перспективной технологией, и многие поддерживающие технологии предлагают многообещающие кандидаты для практической реализации, такие как 5G/B5G, беспроводные локальные сети, беспроводные телесные сети и различные комбинации. Недавние достижения 5G в отношении поддержки требований тактильного Интернета в режиме URLLC способствовали продвижению этой технологии в качестве критического ключевого средства для беспроводного тактильного Интернета. В частности, работа в [25], [26] исследовала 5G с услугами URLLC как подходящее решение для тактильного Интернета. Программно-определяемые сети (SDN), виртуализация сетевых функций (NFV) и мобильные граничные вычисления (MEC) были объединены с технологией 5G, чтобы обеспечить подходящие сети связи для достижения требований E2E с низкой задержкой и надежностью для тактильного Интернета. Точно так же краткое обсуждение SDN, NFV и MEC было представлено в [27], [28] и [29], где авторы анализируют функциональные возможности сети и алгоритмы управления ресурсами. Всесторонний обзор технологических решений и проблем 5G был дан в [30], [31]. В [32] был проведен сравнительный анализ моделирования для приложений Tactile Internet по сравнению с существующими технологиями, такими как Wireless Fidelity. (Wi-Fi), WiMAX и 3G. Сравнение родственной работы и предложенного нами исследования представлено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 Краткое изложение существующих обзорных статей



Survey	Year	Scope							Major Contribution
		QoS	QoE	Algorithmic Aspects	Challenges & Solutions	Comparative Analysis			
						Haptic Codes	Control Schema	Intelligent Prediction	
Maier <i>et al.</i> [12]	2016	×	×	×	✓	×	×	×	Discussed the recent advancement and enabling communication technologies for Tactile Internet.
Aijaz <i>et al.</i> [13]	2016	✓	✓	×	✓	×	×	×	Explore the Tactile Internet realization over role of 5G cellular networks along with technical requirements and key challenges.
Bojkovic <i>et al.</i> [14]	2017	✓	×	✓	✓	×	×	×	Highlights the critical latency requirements and presents the recent developed networking solutions to meet these requirements.
Van Den Berg <i>et al.</i> [15]	2017	✓	×	×	✓	✓	×	×	Summarize the requirements and challenges for haptic communication.
Antonakoglou <i>et al.</i> [16]	2018	✓	✓	×	×	✓	✓	×	Present haptic data communication aspects of the Tactile Internet.
Aijaz <i>et al.</i> [17]	2018	✓	×	×	✓	×	×	×	Explored the Tactile Internet for next-generation industrial communication.
Ateya <i>et al.</i> [18]	2019	✓	×	×	✓	×	×	×	Investigate the different services of the Tactile Internet along with system parameters and design challenges.
Aggarwal <i>et al.</i> [19]	2019	✓	✓	×	✓	×	×	×	Explore the fog computing based solutions for 5G-enabled Tactile Internet to meet the ultra-low latency required of the Tactile Internet use cases.
Gupta <i>et al.</i> [20]	2019	✓	×	×	✓	×	×	×	Presents the review on Tactile Internet requirements and solutions for smart application.
Yu <i>et al.</i> [21]	2020	✓	×	×	✓	×	×	×	Discuss and summarize various techniques can be employed at physical and application layer to achieve latency and reliability challenges for Tactile Internet.
Sharma <i>et al.</i> [22]	2020	✓	×	×	✓	×	×	×	Provide a comprehensive overview of the wireless Internet in term of Tactile Internet, including security and privacy challenges.
She <i>et al.</i> [23]	2021	✓	×	✓	✓	×	×	✓	Present potential to integrate the deep learning models into communication networks to improve URLLC services.
Promwongsa <i>et al.</i> [24]	2021	✓	×	✓	✓	×	×	×	Present an in-depth discussion on architecture and algorithmic aspects of Tactile Internet to overcome communication, intelligence and computation challenges.
<b>Our Survey</b>	2021-22	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Haptic codecs, intelligent predictions and control mechanisms contribution in QoE and QoS provisioning in Tactile Internet. Classify the Existing challenges and solution for QoE and QoE provisioning in Tactile Internet.

В исследовании [12] рассмотрены характеристики и сравнительный анализ IoT, 5G и тактильного Интернета; и недавний прогресс в области коммуникационных технологий, такой как долгосрочная эволюция (LTE-A) для реализации тактильного Интернета. Авторы в [13] определяют и рассматривают передовые проблемы и потенциальные требования к тактильной связи и сетевому дизайну для тактильного Интернета с поддержкой 5G. В работе [14] рассмотрены новые коммуникационные технологии, включая SDN, NFV и туманные/граничные вычисления, и разъяснено, как эти технологии поддерживают связь 5G для уменьшения задержки и надежности и, следовательно, обеспечения тактильного Интернета. Они предложили общую архитектуру сети, включающую SDN, NFV с туманными вычислениями для тактильного Интернета. Аналогичным образом, в исследовании [33] предлагалось интегрировать SDN с технологиями сетевого кодирования, чтобы снизить количество повторных передач пакетов и, следовательно, минимизировать задержку в сети.

Ключевые проблемы тактильной коммуникации в тактильном Интернете рассматривались по-разному [15], [16], [34]. Статья [34] включала психофизические и технические точки зрения для введения концепции тактильной коммуникации, а также обсуждала интеграцию видео и тактильных данных для улучшения характеристик восприятия во время тактильной коммуникации. Продолжая аналогичную линию, упомянутую выше, авторы в [15] и [16]

рассмотрели тактильную связь по технологии 5G, в то время как [15] сосредоточили внимание на строгих требованиях к тактильной связи и рассмотрели различные проблемы и текущие решения. В исследовании [16] изучались различные решения для решения проблем надежности тактильной связи в сетевой инфраструктуре 5G, где авторы разделили решения на три группы: решения для связи, обработки данных и контроля стабильности. Новые варианты использования тактильного Интернета для промышленной связи были рассмотрены [17]; а недавний прогресс, включая системные требования тактильного Интернета, функциональные параметры, проблемы проектирования и будущие направления, были приведены в [18].

В [19] обсуждение туманных вычислений для удовлетворения требований QoS для тактильного интернета с поддержкой 5G было представлено вместе с проблемами и решениями для потенциальных систем тактильного интернета на основе тумана, чтобы обеспечить низкую задержку, высокую надежность, высокую доступность, безопасность и конфиденциальность. Они разделили исследовательский документ на три группы: конечный пользователь, приложение и средний уровень, чтобы изучить ограничения туманных вычислений для тактильных приложений. В исследовании [20] были рассмотрены различные интеллектуальные приложения, поддерживаемые Tactile Internet, включая Healthcare 4.0, Industry 4.0, дополненную и виртуальную реальность (AR/VR), интеллектуальное образование, интеллектуальный транспорт, интеллектуальное сельское хозяйство и т. д. Авторы в [21] рассмотрели методы уменьшения задержки, уделяя особое внимание распределению ресурсов, машинному обучению (ML), MEC и технологиям когнитивного радио в беспроводных сетях 5G для реализации услуг тактильного Интернета. Аналогичным образом, [22] проанализировал текущую работу и предложил структуру беспроводного тактильного Интернета по технологии связи 5G/B5G, охватывающую физический, MAC и сетевой уровни для детальной реализации тактильного Интернета.

В другой недавно опубликованной обзорной статье [24] был рассмотрен ряд алгоритмов распределения радиоресурсов, посвященных тактильному интернет-коммуникациям, интеллекту и вычислительным задачам. Они классифицируют существующие решения по четырем кластерам; (1) стандартная архитектура и протоколы связи, (2) алгоритмы выделения радиоресурсов, (3) алгоритмы нерадиоресурсов (нижние уровни), (4) алгоритмы нерадиоресурсов (верхние уровни). Кроме того, они также обсуждают алгоритмы интеллектуального прогнозирования для решения задач тактильного интеллекта в Интернете. Однако углубленные сравнительные исследования алгоритмов интеллектуального прогнозирования для обеспечения требований QoS и QoE не представлены. В [23] авторы исследуют проблемы и возможности объединения знаний предметной области (т. е. алгоритмов оптимизации и теоретических инструментов) со структурами глубокого обучения для оптимизации URLLC. Кроме того, они представляют многочисленные потенциальные решения о том, как интегрировать контролируемые/неконтролируемые подходы на основе глубокого обучения в предметную область коммуникационных сетей в межуровневой перспективе. Однако алгоритмы низкой сложности, которые можно использовать в системах реального времени для услуг URLLC, все еще отсутствуют [35].

Хотя обзорные документы, рассмотренные выше, рассматривают архитектуру, методологии и коммуникационные решения для реализации тактильного Интернета; они игнорировали тактильные кодеки, дизайн управления и схемы интеллектуального прогнозирования. Более полный и сравнительный анализ тактильных кодеков, управления и схем прогнозирования на

основе ИИ с точки зрения QoS и QoE все еще отсутствует в литературе. Эти ограничения побуждают нас представить всесторонний обзор тактильных кодеков, схемы управления и прогнозирования на основе ИИ для решения тактильных, интеллектуальных, вычислительных и коммуникационных проблем для тактильных интернет-сервисов. В частности, мы выделяем подходы к предоставлению QoS и QoE, которые напрямую влияют на коммуникационную сеть от интеллектуального тактильного кодирования, контроля стабильности (гарантия QoE) до прогнозирования (информация управления/обратной связи). Основная цель состояла в том, чтобы всесторонне проанализировать существующие алгоритмы обработки данных, схемы управления и схемы прогнозирования для достижения прозрачности и стабильности приложений тактильного Интернета в сети связи 5G/B5G. Также рассматривается подробное обсуждение новых вариантов использования тактильного Интернета в здравоохранении 4.0, промышленности 4.0, интеллектуальном автомобилестроении, сравнительном вождении и телеоперациях. Также представлены сравнительные таблицы, чтобы обобщить различные аспекты рассмотренных решений и дать представление о подходах к предоставлению ресурсов. Наконец, мы предоставляем эмпирический обзор открытых исследовательских проблем и последних исследований, включающих слабые и сильные стороны для улучшения QoS и QoE для тактильных приложений. Таким образом, упомянутый выше технический вклад отличает этот обзор от существующих обзорных статей в литературе. Основные выводы из этой обзорной статьи можно резюмировать следующим образом.

Мы представляем целостное обсуждение новых вариантов использования тактильного Интернета и классифицируем их по пяти кластерам, а именно: Здравоохранение 4.0, Промышленность 4.0, Интеллектуальное автомобилестроение и Сравнительное вождение и телеоперации, чтобы понять соответствующие критические технические требования QoS и QoE.

Мы подробно обсуждаем основные проблемы тактильного Интернета, включая тактильные, интеллектуальные, коммуникационные и вычислительные, которые необходимо решить для предоставления услуг тактильного Интернета 5G/B5G. Кроме того, мы классифицируем существующую оценку качества тактильных интернет-сервисов, называемую показателями тактильной оценки качества (HQA).

Представлен обширный обзор и подробное обсуждение существующего решения, которое классифицируется по трем основным областям: тактильные кодеки, схемы управления и схемы интеллектуального прогнозирования для улучшения QoS и QoE для тактильных услуг. Выделяются и обобщаются проблемы и возможные решения, а также их значительный технический вклад.

Тактильные базы данных и испытательные стенды для тестирования и исследования перспектив QoS и QoE со строгими требованиями тактильного Интернета были обобщены и проанализированы, а также указаны их плюсы и минусы.

Мы определяем открытые исследовательские задачи для разработки и оптимизации обработки данных, контроля стабильности и интеллектуальных алгоритмов прогнозирования и представляем возможные будущие направления.



## В. Структура обследования

В таблицах 2 и 3 перечислены аббревиатуры и обозначения, используемые в этой статье, а на рис. 3 показана структура этой обзорной статьи. В разделе II представлены предварительные сведения о тактильном Интернете со стандартной архитектурой. В разделе III обсуждались различные варианты использования, а также основные технические требования. В разделе IV подробно обсуждаются существующие тактильные кодеки, схемы управления и интеллектуальные решения на основе предсказания. В частности, мы обсуждаем вклад решений на основе машинного обучения в улучшение QoS и QoE для тактильных приложений. В разделе V обсуждаются проблемы открытых исследований и возможные будущие направления. Наконец, Раздел VI обобщает результаты и завершает этот обзор.

ТАБЛИЦА 2. Сводка важных сокращений

Acronym	Definition
H2H	Human-to-Human
M2M	Machine-to-Machine
IoT	Internet of Things
H2M	Human-to-Machine
m-MTC	massive Machine-Type Communication
c-MTC	critical Machine-Type Communication
eMBB	enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
UHD	Ultra High Definition
V2X	Vehicle-to-Everything
IoD	Internet of Drones
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
HIC	Human Interpersonal Communication
HQA	Haptic Quality Assessment
PDb	Perceptual Deadband
PLR	Packet Loss Ratio
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
P-MSE	Perceptual-Mean Square Error
SSIM	Structural Similarity
ST-SIM	Spectral Temporal Similarity
HSSIM	Haptic Structural Similarity
CR	Compression Ratio
WKNN	Weighted K-Nearest Neighbors
GMM	Gaussian Mixture Model
GMR	Gaussian Mixture Regression

ТАБЛИЦА 3 Список важных обозначений

Notation	Meaning
$d_{PHY}$	Delay at Physical Layer
$d_{LLC}$	Delay at Logic Link Control
$d_{MAC}$	Delay at MAC Layer
$d_c$	Processing Delay
$d_p$	Propagation Delay
$D_T$	End-to-End Delay
$f_m$	Master Side Force
$f_s$	Force Feedback from Slave Side
$x_m$	Master Side Position Parameters
$x_s$	Slave Side Position Parameters
$v_m$	Master Side Velocity Parameters
$v_s$	Slave Side Velocity Parameters
$b$	Tuning Factor
$D_1$	Communication Delay in Forward Channel
$D_2$	Communication Delay in Feedback Channel
$u_{m/s}$	Forward Wave Transmission for Master and Slave
$w_{m/s}$	Feedback Wave Transmission for Master and Slave
$E_m^{in}$	Forward Channel Input Energy at Master Side
$E_s^{Recv}$	Forward Channel Received Energy at Slave Side
$E_s^{out}$	Forward Channel Energy Output at Slave Side
$E_s^{in}$	Feedback Channel Input Energy at Slave Side
$E_m^{Recv}$	Feedback Channel Received Energy at Master Side
$E_m^{out}$	Feedback Channel Energy Output at Master Side
$\alpha/\beta$	Damping Elements

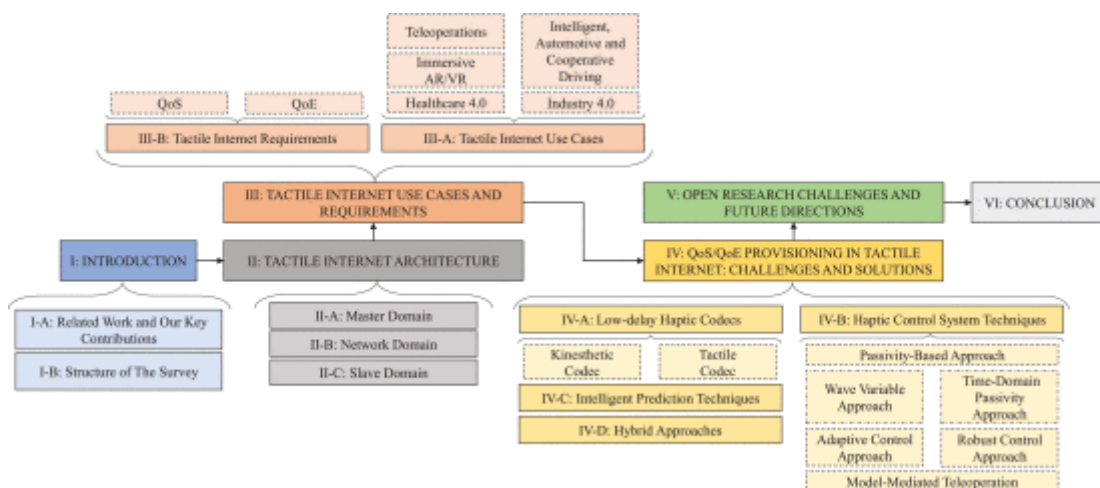


РИСУНОК 3. - Организационная структура обследования.

## РАЗДЕЛ II. Тактильная архитектура Интернета

Тактильный Интернет обеспечивает двустороннюю связь для управления касанием и срабатыванием в режиме реального времени между локальными (ведущими) и удаленными

(ведомыми) устройствами с тактильной и нетактильной обратной связью по сети связи. Тактильная связь позволяет системе Tactile Internet обеспечивать управление и управление объектами в реальном времени в удаленных средах. В большинстве случаев тактильная интернет-система состоит из трех основных частей согласно рис. 4 следующим образом.

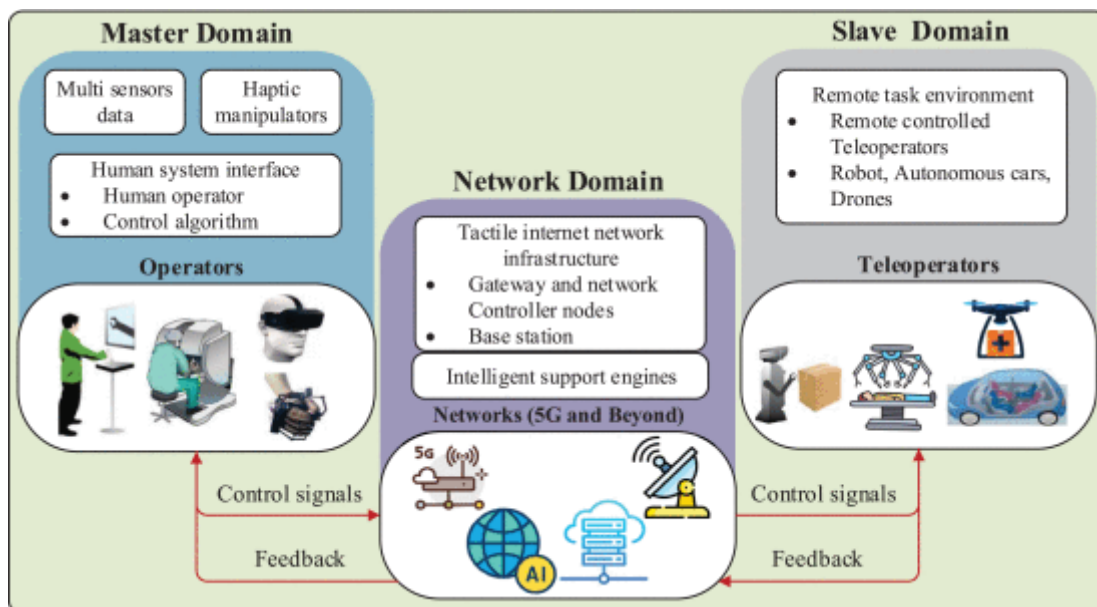


РИСУНОК 4. - Базовая архитектура тактильного Интернета высокого уровня.

#### А. Главный домен

Главный домен включает в себя контроллеры, то есть людей или алгоритмы управления, которые используют тактильные устройства. Если контроллером является человек, он взаимодействует с устройством с помощью интерфейса «человек-система» (HSI), который преобразует вводимые человеком данные в управляющие сигналы. Эти управляющие сигналы отправляются в подчиненный домен через сетевую инфраструктуру, а подчиненный домен отправляет тактильную обратную связь на главный контроллер домена, чтобы обеспечить обратную связь для человека-оператора. На рынке доступны различные тактильные устройства с несколькими степенями свободы (DoF), полные списки тактильных устройств вместе с информацией о производителях представлены в [36], [37] и [38].

#### В. Сетевой домен

Сетевой домен подключает мастер и подчиненные домены, использующие различные сетевые элементы для обеспечения двунаправленной связи, включая маршрутизаторы, базовые станции, механизм тактильной поддержки, пакеты и обслуживающие шлюзы. Сети требуют высокой доступности, высокой надежности и сверхнизкой задержки для обеспечения управления и контроля в реальном времени. Технология связи 5G является ключевым фактором для удовлетворения этих требований и реализации тактильных услуг с архитектурой тактильного Интернета с поддержкой 5G, соединяющей базовую инфраструктуру 5G, например базовые станции, с объектами плоскости управления и пользователя.

#### С. Подчиненный домен

Подчиненный домен включает в себя телеоператоров или роботов-контроллеров, непосредственно управляемых главным доменом с помощью управляющих сигналов, поэтому он также известен как контролируемый домен. Он обеспечивает обратную связь с главным доменом, включая тактильные и аудиовизуальные сигналы. Главный и подчиненный домены составляют глобальный контур управления через сеть.

### РАЗДЕЛ III. Варианты использования тактильного Интернета и требования

#### А. Примеры тактильного использования Интернета

Tactile Internet WG [10] определяет некоторые стандартные варианты использования и их показатели производительности, включая телеуправление, автомобили, иммерсивную AR/VR, Интернет дронов (IoD), межличностное общение, живое тактильное вещание и совместное автоматизированное вождение. В работах [30] и [39] рассматриваются критические и некритические тактильные интернет-приложения в соответствии с [16], определенными приложениями, основанными на ключевых требованиях к производительности 5G. На рис. 5 показана результирующая группа вариантов использования для тактильных интернет-приложений на основе вышеупомянутых исследований, где светло-зеленый кружок относится к оператору машины, светло-голубой кружок относится к человеку-оператору и машине, а светло-оранжевый кружок относится к человеку-оператору-человеку. Подробное обсуждение этих технологий классификации, наряду с перекрывающимися функциями и различиями, показано на рис. 2. Чтобы проиллюстрировать взаимосвязь между различными появляющимися услугами тактильного Интернета, варианты использования разделены на три группы: M2M (отображение темно-голубым), H2H (отображение темно-зеленым) и H2M (отображение темно-оранжевым), общение основано на подключении и взаимодействии. Часть M2M указывает на приложения, которые используются в среде M2M. Раздел H2M указывает тип приложений, в которых осуществляется взаимодействие между H2M в реальном времени. Раздел H2H обобщает новые приложения тактильного Интернета, где люди взаимодействуют с другими людьми на расстоянии через виртуальные среды. Тем не менее, мы разделяем варианты использования тактильного Интернета на пять основных групп: Здравоохранение 4.0; Индустрия 4.0; Иммерсивный AR / VR; интеллектуальное, автомобильное и совместное вождение; и Телеоперации, как показано в Таблице 4. Вариант использования телеопераций в основном перекрывает все другие варианты использования.

#### ТАБЛИЦА 4. Применение тактильного Интернета

		Application	Reference	
Healthcare 4.0	Tele-operations	Robotic tele-surgery	[20], [40], [47]–[49]	
		Tele-health	Tele-rehabilitation [50], [51] Tele-medicines [41], [52]	
		Wearable tactile devices	[53]–[55]	
Smart manufacturing		[56]–[58]		
Industry 4.0		Smart grid (monitoring or maintenance)	[42], [59]	
		Smart logistics (monitoring or maintenance)	[43], [45], [60]	
		Entertainment	Gaming	[46], [61]
HIC			[62]	
Immersive virtual reality		Smart education	Smart training system	[63]–[68]
			Smart learning	[69]–[71]
	Healthcare	VR therapy	[72]–[74]	
Cooperative/Automated Driving/IoD	Vehicle platooning	[75]		
	Intelligent transportation	[76]		
	Autonomous/Tele-driving	[77], [78]		
	UAVs/V2V/V2I	[79]		
	Tele-medicines	[80]		
	Smart city	[81]–[84]		
	Smart agriculture	[85], [86]		

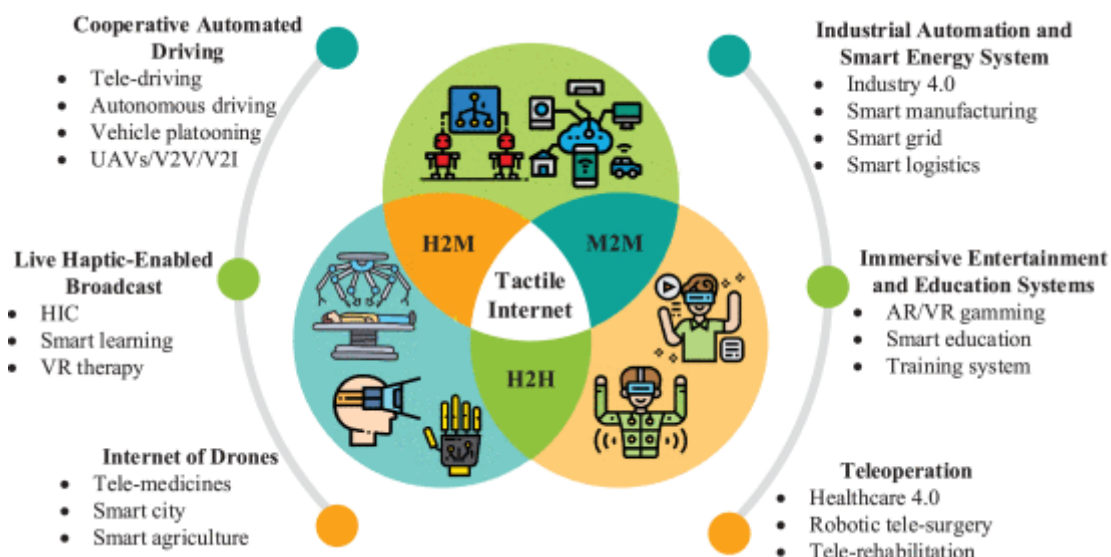


РИСУНОК 5. - Ключевые варианты использования Тактильного Интернета (сокращения определены в Таблице 2).

### 1) Здравоохранение 4.0

Медицинские приложения настоятельно требуют низкой задержки и сверхнадежного тактильного Интернета. Сектор здравоохранения быстро эволюционировал от Здравоохранения 1.0 к Здравоохранению 4.0, также известному как электронное здравоохранение, которое предоставляет услуги, включая телехирургию, телемедицину, теледиагностику и телемониторинг через тактильный Интернет, которые не поддерживались традиционными интернет-структурами. Электронное здравоохранение позволяет медицинским экспертам по всему миру быть доступными для медицинских осмотров, наблюдения за пациентами или даже для проведения сложных операций на расстоянии с использованием дистанционного управления и телероботов. В исследовании [40] были рассмотрены различные телероботизированные технологии в области медицины, в том числе телероботизированная хирургия и телероботизированная реабилитация; и [41] проанализировали исследования

телемедицины и электронного здравоохранения, анализируя QoS, QoE и их соответствующие клинические требования для обеспечения конфиденциальности, надежности и стабильности системы здравоохранения.

## 2) Индустрия 4.0

Текущие тенденции промышленной автоматизации, обычно называемые Индустрией 4.0, направлены на обеспечение управления в режиме реального времени большими подключенными системами с ограниченным взаимодействием человека путем обмена управляющей информацией по беспроводной сети. В отличие от традиционной промышленности, интеллектуальная промышленность направлена на повышение скорости производства продукции и оптимизацию производственных линий за счет применения киберфизических систем (CPS). Промышленная автоматизация, автоматизация процессов и удаленное промышленное управление требуют задержки от 0,25 до 10 мс с максимальной частотой отказов пакетов  $\leq 10^{-9}$ . Таким образом, задержка E2E и надежность для промышленной автоматизации могут быть достигнуты за счет реализации тактильного Интернета. В работах [42] и [43] представлены интересные приложения, включая интеллектуальную сеть и интеллектуальную логистику. Умная сеть направлена на распределение энергии и мониторинг линий производства и передачи электроэнергии; тогда как умная логистика позволяет поставлять нужное количество продукта в нужное место, в нужное время и по цене; принятие разумных решений путем непрерывного отслеживания и контроль цепочки поставок продукции. Интеллектуальные сети и логистика предъявляют строгие требования к задержке и надежности [44], поскольку задержка  $> 1$  мс может вызвать серьезные проблемы. Что касается приложений для дистанционного управления интеллектуальной сетью и логистикой, мы рассматриваем возможность мониторинга и обслуживания процессов. В интеллектуальной сети он занимается мониторингом линий электропередач, диагностикой, обнаружением неисправностей и отчетами посредством взаимодействия с дополненной реальностью для улучшения управляемости. Точно так же в умной логистике обработка распределения, такая как упаковка, измерение, сортировка и маркировка опасного предмета, может выполняться с использованием тактильного взаимодействия [45].

## 3) Иммерсивный AR / VR

Immersive AR/VR — это захватывающее тактильное интернет-приложение, в котором информация от физических объектов дополняется как виртуальная сущность в человеческом поле. Пользователи взаимодействуют с виртуальными объектами с помощью устройств AR/VR и воспринимают взаимодействие с физическим миром посредством тактильных коммуникаций. Это позволяет использовать множество приложений, включая телемедицину; VR-терапия; дистанционное обучение; и адаптивная помощь для водителей, полиции и студентов. Он также используется для межличностного общения между людьми (HIC) и развлечений, таких как обычные или серьезные игры. Серьезные игры обеспечивают мотивацию учащихся, например, ориентированные на достижение цели игры и игры на решение проблем. Задержка  $\leq 30\text{--}50$  мс требуется для большинства игр, а для некоторых серьезных игр требуется миллисекундная задержка, например, телефутбол ( $\leq 1\text{--}10$  мс). Повышенная задержка в сети ухудшает качество обслуживания пользователя для определенных игр с поддержкой тактильных ощущений. В работе [46] изучались приложения виртуальной реальности для сферы развлечений, медицины и розничной торговли. Для воспроизведения музыки и включения дистанционного обучения с тактильной обратной связью требуется значение задержки около 5–10 мс [30].



#### 4) Интеллектуальное, автомобильное и совместное вождение

Интеллектуальные системы транспортировки и мобильности прокладывают путь для автономного вождения, дистанционного вождения, взвода и т. д.; и предоставлять услуги для автоматического управления транспортным потоком, управления безопасностью дорожного движения с помощью совместного транспортного средства с транспортным средством, транспортного средства с инфраструктурой и транспортного средства с любой связью. Тактильное транспортное средство для любой связи обеспечивает быстрый, надежный и безопасный механизм обмена мультимодальной информацией между транспортными средствами. Для предотвращения несчастных случаев и принятия быстрых сложных решений требуется задержка  $\approx 1$  мс с надежностью  $\geq 99,999\%$  для автономного вождения [87]; тогда как управление потоком трафика в реальном времени на основе локального трафика и состояния светофора требует задержки 10–100 мс с диапазоном ошибок 10–3–10–5 пакетов.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), также известные как беспилотные летательные аппараты, имеют множество реальных применений с помощью систем беспроводной связи. БПЛА содержат датчики, подключенные через IoT для формирования IoD. Низкая стоимость IoD, высокая мобильность и гибкость позволяют использовать различные интеллектуальные приложения, включая телемедицину, промышленный контроль, телемониторинг, телеспасательные операции и доставку посылок, а беспилотные летательные аппараты с тактильными функциями вносят значительный вклад в развитие умного города. В [88] описана возможная интеллектуальная транспортная система с поддержкой БПЛА, а в исследовании [79] предложена система видеонаблюдения с помощью БПЛА, для которой требуется максимальная задержка E2E  $\leq 1$  мс с коэффициентом потери пакетов  $\leq 10^{-7}$ . Точно так же в исследованиях [83] и [86] обсуждалось использование БПЛА для умных городов и умного земледелия; и [86] проанализировали проблемы управления цепочками поставок в эпоху Индустрии 4.0 и предложили модель для сельского хозяйства 4.0 и сельского хозяйства 4.0.

#### 5) Телеоперации

Системы телеуправления включают человека-оператора, канал связи и телеоператора и позволяют человеку-оператору взаимодействовать с телеоператором на расстоянии в реальной или виртуальной среде для выполнения сложных операций. Двусторонняя система телеуправления с мультимодальной обратной связью, включая аудио, видео и тактильную связь, была показана на рис. 4, где ведущее устройство должно получать обратную связь от управляемого устройства по сети связи и формирует глобальный замкнутый контур. Системы телеуправления можно разделить на три категории в зависимости от их архитектуры и топологии: односторонние, двусторонние и многосторонние системы [89]. Другой режим классификации, основанный на задержке связи и уровне взаимодействия с пользователем, делит ее на две ключевые группы: системы на основе миссии и системы прямого управления [90], как показано на рис. 6. применение в медицине, промышленной автоматизации, образовании, транспорте и т. д. В таблице 4 сравниваются несколько примеров интеллектуальных приложений для тактильного Интернета с соответствующими категориями вариантов использования, перекрывающимися вариантами использования телеопераций.

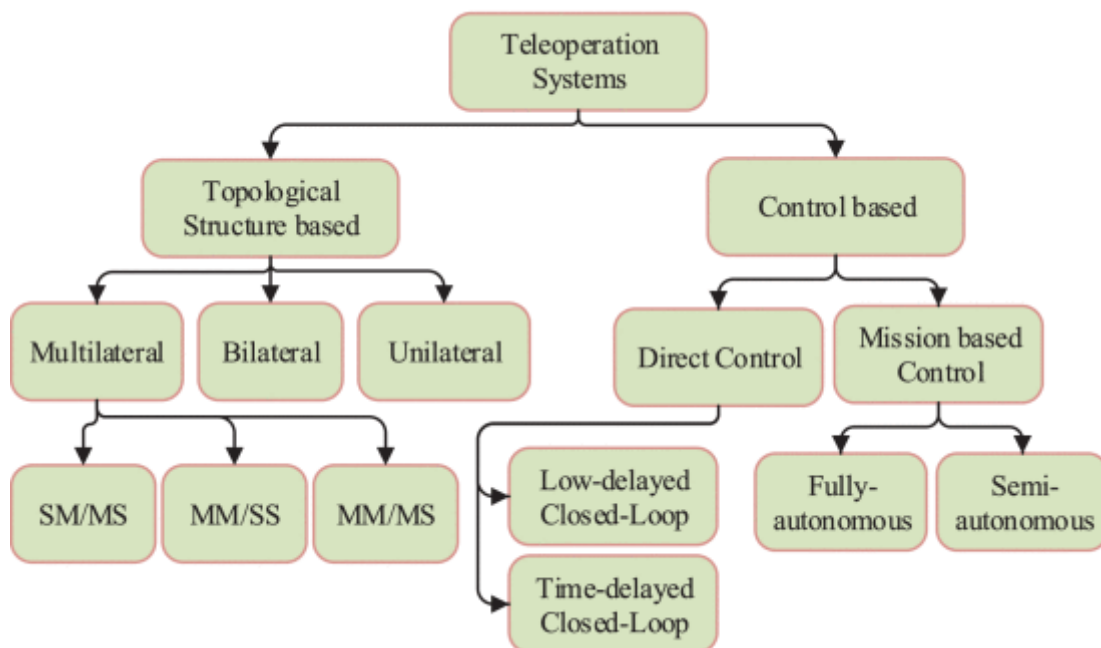


РИСУНОК 6. Таксономия систем телеуправления, основанная на топологической структуре и конструкции управления: SM/MS означает один главный и несколько ведомых, MM/SS – несколько ведущих, одиночных ведомых, а MM/MS – несколько ведущих, несколько ведомых.

Тактильный Интернет обеспечивает ключевую сетевую инфраструктуру с жесткими требованиями для реализации различных приложений с управлением в режиме реального времени. В отличие от традиционных приложений, интеллектуальные приложения с поддержкой тактильных ощущений требуют высокого качества обслуживания и качества обслуживания. Однако задержка связи является критической проблемой для реализации тактильных приложений и иногда называется проблемой 1 мс. Для этих приложений требуется тактильная частота дискретизации  $\geq 1$  кГц, чтобы обеспечить качество обслуживания и стабильность контура управления системой. QoS и QoE для приложения ухудшаются из-за увеличения задержки сетевого обмена и увеличения частоты дискретизации для высокодинамичных сред. Кроме того, каждый вариант использования требует уникальных ключевых показателей эффективности. В следующем подразделе мы обсудим требования и проблемы, соответствующие каждому варианту использования Tactile Internet.

## В. Тактильные требования к Интернету

Прежде чем представить ключевые технические требования, мы обсуждаем оценки качества, т. е. QoS и QoE, мы оцениваем приложения Tactile Internet. Строгие технические требования к сети для Тактильного Интернета перечислены ниже после [17], [25].

### 1) качество обслуживания

QoS определяется как качество обслуживания и тесно связано с сетевыми параметрами. С точки зрения тактильной связи параметры QoS, характеризующиеся задержкой, надежностью и доступностью сети связи, переводятся как задержка, джиттер, потеря пакетов и синхронизация соответственно [91]. В общем случае QoS относится к механизму, используемому сетью на каждом сетевом уровне для поддержки QoE. В литературе есть различные решения, такие как

SDN, методы маршрутизации, когнитивное радио и управление очередями от приложения до физического уровня для поддержки QoS. Требования QoS в вариантах использования Tactile Internet могут различаться в зависимости от задержки, надежности и доступности, как определено ниже.

Задержка: задержка сети E2E или время приема-передачи (RTT) определяется как «время, необходимое для передачи пакета от источника к месту назначения и получения информации подтверждения в источнике», что соответствует подробным пояснениям ниже.

$$\begin{aligned}
 D_T &\approx \sum_{i=1}^n d_i + d_p + d_c \\
 &= \{d_{PHY} + d_{MAC} + d_{LLC} + \sum_{i=3}^7 d_i\} \\
 &\quad + d_p + d_c,
 \end{aligned} \tag{1}$$

Где  $D_T$  — это общая задержка E2E;  $d_i$  — задержка на сетевом уровне  $i$ ;  $d_{PHY}$ ,  $d_{MAC}$  и  $d_{LLC}$  обозначают задержку на физическом, MAC- и логическом уровнях соответственно;  $d_p$  — задержка распространения;  $d_c$  — задержка обработки; и  $n$  указывает общее количество уровней в модели стека протоколов. Например,  $n=7$  для стека протоколов Open System Interconnection (OSI), поскольку модель OSI включает семь различных уровней абстракции: физический, канальный, сетевой, транспортный, сеансовый, представление и прикладной. Система Tactile Internet требует сверхнизкой задержки (1–10 мс) в зависимости от типа приложения и динамического характера среды. Служба 5G URLLC — многообещающий инструмент для обеспечения сверхнизкой задержки между главным и подчиненным доменами и получения тактильных ощущений в режиме реального времени. Различные подходы к достижению низкой задержки для тактильного Интернета с поддержкой 5G представлены на рис. 7.

Надежность: Надежность определяется как количество пакетов данных, успешно полученных в пункте назначения, по отношению к общему количеству отправленных пакетов данных, т. е. Коэффициент потери пакетов (PLR) или частота отказов. Как и в случае с задержкой, для тактильных интернет-приложений требуется максимальная частота отказов в диапазоне 10<sup>-3</sup> – 10<sup>-7</sup>. Частота сбоев пакетов напрямую влияет на QoE и качество задачи (QoT) для системы Tactile Internet. Достижение компромисса между сверхвысокой надежностью и сверхнизкой задержкой — непростая задача. Перспективные наборы решений по технологиям 5G и B5G приведены в [39], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109] и [110], как показано на рис. 7.

Пропускная способность. Под пропускной способностью понимается объем данных, передаваемых от источника к месту назначения за определенный интервал времени. Приложение следующего поколения, такое как автономное вождение, требует высокой пропускной способности данных, когда данные нескольких датчиков собираются одновременно. Работа с таким большим объемом данных в режиме реального времени сопряжена с различными проблемами тактильного Интернета. Точно так же приложение AR/VR с поддержкой тактильных ощущений с видео 4K 360° и простой голографической связью требует скорости передачи данных около 0,5–2 гигабит в секунду (Гбит/с). В тактильных интернет-сервисах скорость передачи данных зависит от типа приложений и их требований. В литературе

имеются различные многообещающие решения, включая увеличение частоты передачи, как показано на рис. 7.

Доступность: показатель производительности доступности объясняет количество времени, в течение которого сервис приложения остается доступным, а доступность коммуникационного сервиса можно рассчитать по следующим формулам [111]:

$$U = \frac{\sum_i \Delta t_i}{T} \quad (2)$$

$$A = 1 - U \quad (3)$$

Где  $U$  — недоступность сервис,  $T$  — это время, когда ожидается запуск сервиса, а  $\Delta t_i$  — это продолжительность  $i$ -го интервала времени простоя в течение  $T$ . Наконец, доступность услуги связи  $A$  вычисляется с использованием (3). Тактильный Интернет требует сверхвысокой доступности для тактильных услуг, значительно выше 99%, в зависимости от типа приложения. Сложно обеспечить доступность как для локальных, так и для удаленных тактильных систем, одновременно отвечая требованиям сверхнизкой задержки и сверхвысокой надежности. Были предложены различные решения для достижения требования доступности и улучшения тактильных характеристик обслуживания [39], [98], [99], [102], [106], [109].

В литературе было предложено три основных подхода к решению этих задач: связь, обработка данных и решения для контроля устойчивости [16]. На рис. 7 обобщаются ранее предложенные потенциальные решения, улучшающие сети связи для реализации тактильных приложений.

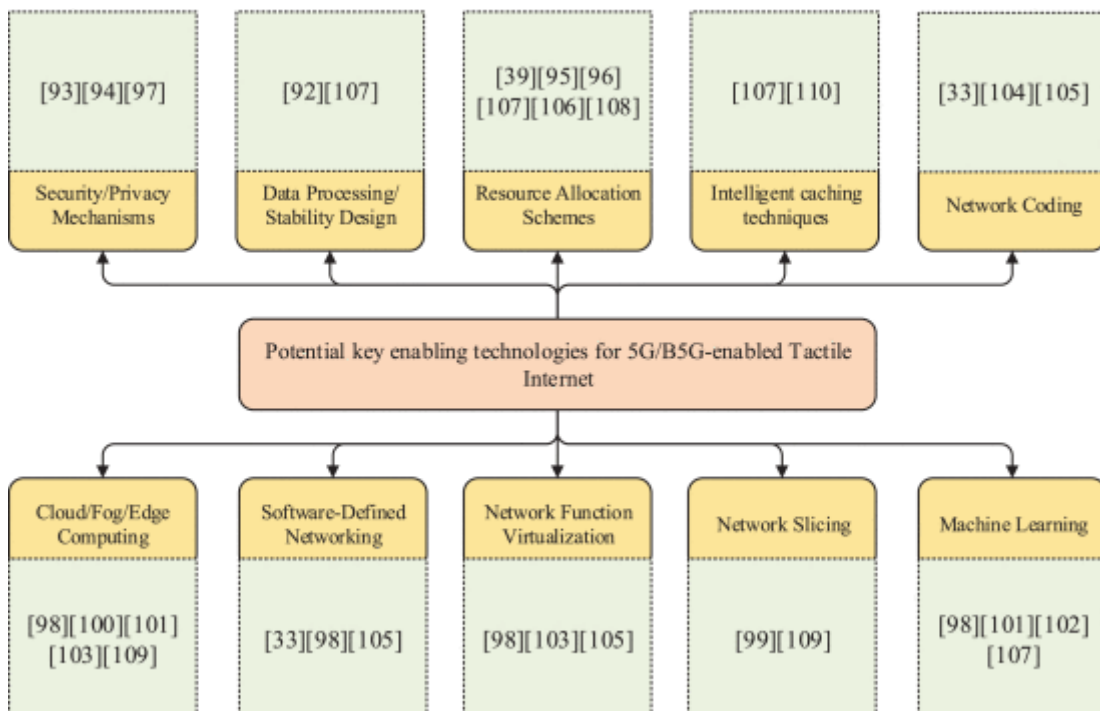


РИСУНОК 7. Ключевые технологии, обеспечивающие соответствие требованиям тактильного Интернета с поддержкой 5G/B5G.

2) качество обслуживания

QoE определяется как уровень возбуждения или раздражения пользователя [119], т. е. он выражает опыт пользователя с услугой и в большей степени ориентирован на пользователя. QoE включает технические и нетехнические параметры оценки, как описано в [120]. Он объединяет опыт пользователей, ожидания от приложений и базовую эффективность системы связи. Стоит отметить, что требуется конечная ассоциация между QoS и QoE для поддержания QoE от компонентов QoS [121]. QoE подразделяется на две категории: субъективные и объективные. В субъективном тесте предлагается несколько экспортов из одного и того же домена для оценки опытных результатов. Одной из известных метрик субъективной оценки QoE является средний балл мнений (MOS). MOS – это абсолютная рейтинговая шкала категорий, которая включает в себя пятибалльную шкалу качества. Масштабирование MOS вместе с соответствующим описанием класса качества представлено в таблице 6 на основе ITU-R M.1079-2 [122] и ITU-R VT.500-14 [123]. Стоит отметить, что представленные значения являются минимальными требованиями к QoS/QoE; однако недавно появившееся приложение требует минимальной задержки ( $\leq 1$  мс) с потерей пакетов  $\leq 10-7$ .

ТАБЛИЦА 5 Показатели оценки качества тактильных ощущений (сокращения определены в таблице 2)

Evaluation Metrics		
QoS	Latency	
	Jitter	
	PLR	
	Throughput	
QoE	Subjective	MUSHRT [112]
		MOS
		VTQA [113]
	Objective	PSNR
		HPW-PSNR [114]
		P-MSE [115]
		HSSIM [116]
		ST-SIM [117]
		HPM [118]
		Hybrid (SNR+SSIM) [112]

ТАБЛИЦА 6 Влияние метрики QoS на QoE

QoS			QoE			
Delay (s)	PLR (%)	Throughput (kbs)	MOS (Score)	PSNR (dB)	SSIM (%)	Quality (Class)
$\leq 2$	0.0 ~ 0.2	$\geq 500$	5	$> 37$	$> 0.90$	Excellent
$\leq 4$	0.2 ~ 0.5	$\geq 250$	4	31 – 37	0.77 – 0.89	Good
$\leq 8$	0.5 ~ 2.0	$\geq 120$	3	25 – 31	0.61 – 0.76	Acceptable
$\leq 15$	2.0 ~ 4.0	$\geq 60$	2	20 – 35	0.38 – 0.60	Poor
$\geq 15$	$> 4.0$	$\leq 60$	1	$< 20$	$< 0.38$	Bad

Однако в объективном тесте оценка QoE выполняется на основе различных параметров измерения, связанных с услугой (PLR, задержка, джиттер). Пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) — это метод объективной оценки качества, где максимально возможная мощность сигнала делится на мощность искаженных сигналов. В литературе имеется небольшое количество работ по этому типу метрики оценки, касающейся тактильной коммуникации. Взаимосвязь между QoS и QoE изображена на рис. 8, где ясно видно, как технические параметры QoS (задержка, джиттер, PLR) влияют на QoE. Кроме того, это показывает, что более высокий QoS не означает, что мы достигаем желаемого QoE, хотя он также требует интерактивности с обслуживанием и способности выполнять желаемую задачу для пользователей. В работе [124] исследуется взаимосвязь между QoE и задержкой E2E, где авторы предложили модель QoE для максимизации тактильного QoE пользователей за счет оптимизации задержки E2E. Мы обобщаем существующие метрики оценки QoS и QoE в таблице 5 и называем их метриками тактильной оценки качества (HQA). Точно так же влияние метрики QoS на QoE указано в таблице 6 и взято из [125].

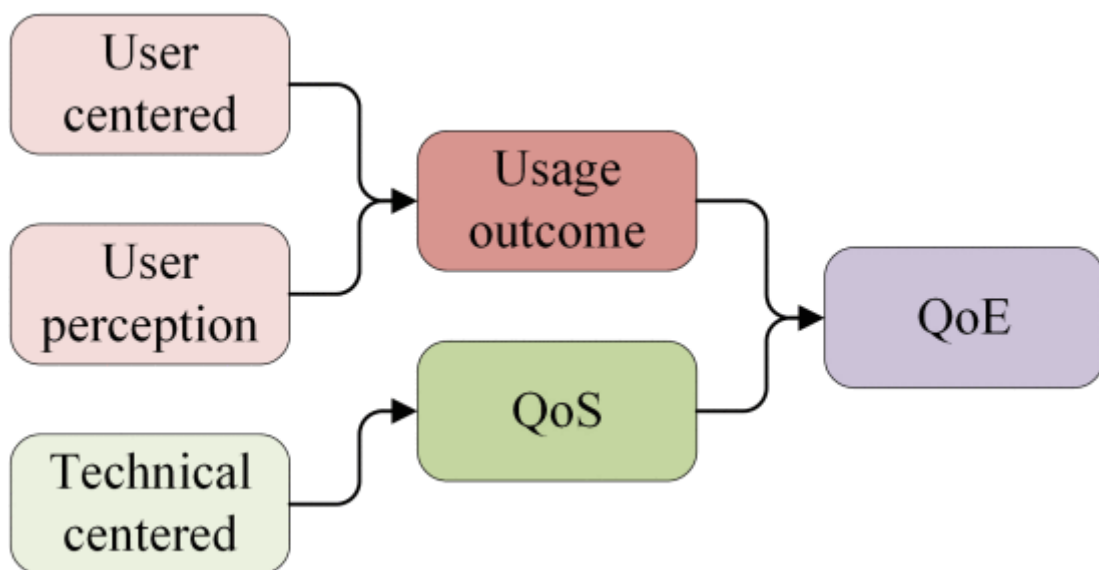


РИСУНОК 8. - Связь между QoS и QoE.



В таблице 4 показано использование телеуправления для большинства тактильных приложений. Основными целями систем телеуправления являются стабильность и прозрачность при взаимодействии между локальной и удаленной средами. Прозрачность телеопераций определяется с точки зрения «человеческих ощущений», где импеданс человека-оператора  $Z_h$  соответствует импедансу окружающей среды  $Z_e$ , то есть  $Z_h = Z_e$ , где импеданс представляет собой отношение силы к скорости. Прозрачность также может быть определена с точки зрения ощущений пользователя: насколько хорошо человек-оператор чувствует тактильные ощущения при непосредственном взаимодействии с удаленной средой. Стабильность замкнутого контура телеуправления гарантирует стабильный переходный контакт между ведущим и ведомым независимо от их поведения. Важнейшей задачей для систем телеуправления является одновременное обеспечение стабильности и прозрачности. Системы дистанционного управления теряют значительную стабильность и прозрачность даже при небольшой задержке и/или потере пакетов, что в конечном итоге приведет к ухудшению QoE, QoT и качества контроля (QoS).

Таким образом, этот документ включает обработку данных с малой задержкой, проектирование управления и интеллектуальные решения для прогнозирования, чтобы гарантировать стабильность и прозрачность системы двустороннего телеуправления при различных коммуникациях с задержкой по времени. в сетях. В следующем разделе подробно объясняются вышеупомянутые проблемы, включая возможные решения.

#### РАЗДЕЛ IV. Обеспечение QoS/QoE в тактильном Интернете: проблемы и решения

На рис. 7 представлены решения, предложенные в литературе, от физического до прикладного уровня с упором на проблемы связи, включая распределение радиоресурсов, протоколы, мультиплексирование и алгоритмы планирования. Для обеспечения QoS также были предложены различные облачные (туманные/пограничные) вычисления, прогнозирование задержки/флуктуации сети и схемы управления. В этом обзоре основное внимание уделялось тактильному кодеку, дизайну управления и решениям на основе предсказания с учетом всех критических проблем с тактильной информацией, включая размер тактильного пакета, потерю пакетов, стабильность, прозрачность и т. д. В этом разделе обсуждаются потенциальные решения и проблемы для обеспечения QoS и QoE в Tactile. Интернет. Во-первых, мы рассматриваем схемы тактильных кодеков и сравниваем различные предлагаемые решения. Во-вторых, мы рассматриваем методы разработки элементов управления, которые позволяют операторам управлять телеуправлением в удаленной среде с переменной задержкой связи. Наконец, мы рассматриваем интеллектуальные схемы прогнозирования для устранения остающихся пробелов, чтобы обеспечить требования Tactile Internet QoS и QoE.

##### А. Тактильный кодек с малой задержкой

Тактильное относится к исследованию объектов с помощью тактильных ощущений и силовой обратной связи, включает в себя кинестетическое и тактильное восприятие [126]. Кинестетическое восприятие — это сенсорная информация от мышц, суставов и сухожилий человека. Информация, полученная с кожи человека с помощью механорецепторов, такая как текстура поверхности или трение, называется тактильным восприятием. Подробное обсуждение тактильных и кинестетических тактильных компонентов было представлено в [126]. Кинестетическая и тактильная информация имеют совершенно разные свойства и требования к

задержке. Следовательно, для каждого из них предлагаются отдельные конструкции кодеков. IEEE P1918.1 Tactile Internet WG инициировала стандартизацию тактильных кодеков в рамках рабочей группы по тактильным кодам IEEE P1918.1.1, рассматривая эти тактильные классификации, предоставляя стандартизованную структуру тактильных кодеков с подробными сведениями о требованиях [120]. Группа стремится разработать оптимальные схемы сжатия данных для обмена тактильной и кинестетической информацией и предоставления услуг для тактильного Интернета с участием человека. Поэтому он предоставляет трассировки эталонных данных, программную и аппаратную основу для разработки и тестирования кинестетических и тактильных кодеков.

Частота дискретизации тактильного сигнала должна быть  $\geq 1$  кГц, чтобы поддерживать общую стабильность контура управления и испытывать тактильные ощущения в реальном времени [120]. Эта высокая скорость передачи пакетов вызывает перегрузку сети, дрожание и, наконец, вносит дополнительную задержку в сети связи. Учитывая это требование высокой скорости передачи пакетов, двусторонние системы телеуправления требуют оптимальных тактильных технологий сжатия и сокращения данных для стабилизации связи. В таблице 7 сравниваются и классифицируются потенциальные методы сокращения и сжатия данных для двусторонних телеопераций с тактильной поддержкой через тактильный Интернет для обеспечения QoS и QoE, где Sig, Not Sig и Mixed указывают уровни значимости. Sig указывает, что предлагаемая схема кодирования была смоделирована из стандартных баз данных, предоставленных IEEE P1918.1.1 (рабочая группа тактильных кодеков), и сравнена с одной или несколькими базовыми схемами; тогда как Not Sig относится к схемам, в которых не использовались стандартные базы данных, а при оценке производительности не учитывались какие-либо базовые схемы. Смешанный вариант указывает на то, что, хотя предлагаемая схема не использовала какую-либо стандартную базу данных, она существенно превосходила базовые схемы.

**ТАБЛИЦА 7.** Методы сокращения и сжатия тактильных данных для тактильного Интернета. В столбце «Эффект» SIG указывает на то, что эталон соответствует стандартной базе данных и сравнению с базовой линией, NOT SIG указывает на то, что эталон соответствует стандартной базе данных без сравнения с базовой линией, а Mixed указывает на то, что эталон соответствует сравнению с базовой линией без стандартной базы данных (сокращения определены в таблице 2).

Proposed Technique	Codecs		Improved QoS/QoE factor(s)	Effect	Major Contribution	
	Kinesthetic	Tactile				
Transform Coding	DCT [129]	✓	×	SNR	Not Sig	Present a quantization technique with focus to improve haptic data compression rate.
	sDCT [131]	✓	×	CR	Mixed	Analysis different signal and multiple parametric compression methods and present a novel haptic data compression algorithm considering selection and integration of best feature of wavelet and DCT.
	WPT [130]	✓	×	CR	Not Sig	Introduce a multiple parametric codec design to compress and improve haptic data and with a focus to overcome the network control challenges.
	PLC [132]	✓	×	SNR, HSSIM	Sig	Propose a E2E perceptual-lossless compression method to reduce coding delay, coding loss, bit rate and improve perceived quality for haptic-driven services.
	VC-PWQ [133]	×	✓	SNR, PSNR, ST-SIM	Sig	Present a highly scalable codec incorporating wavelet transformation with vibrotactile perceptual model considering both scenarios online and offline.
Analysis-by-Synthesis	SLP-based [134]	×	✓	ST-SIM	Sig	Propose a perceptual vibrotactile signal compression method incorporating DWT and sparse linear prediction coding to guarantee low bit rate with negligible distortion.
	BINBLISS [135]	✓	×	MSE	Sig	Propose a codec algorithm for real-time tactile data stream compression to satisfying haptic-driven services.
	Peak-Suppressing [136]	✓	×	MSE	Mixed	Extend the original PDb approach and propose a peak-suppressing adaptive haptic packet rate control scheme to reducing the network load.
	Adaptive Sampler [137]	✓	×	MOS	Not Sig	Propose a adaptive sampling scheme for kinesthetic samples transmission to ensure QoS for telehaptic communication.
	OAHS [138]	✓	×	SNR	Mixed	Present a adaptive scheme for telehaptic system to deal with network impairments by tuning PDb parameters in real-time.
Hybrid	PP Model [139]	✓	×	CR	Not Sig	Propose a predictive method based on autoregressive model that integrate statistical and perceptual coding concepts to improve haptic data reduction.
	PVC-SLP [140]	×	✓	SNR, PSNR, ST-SIM	Sig	Introduce the sparse linear prediction coding based vibrotactile scheme exploiting the cutaneous sensitivity function to minimize the imperceptible vibrotactile signals and improve quality.
	Data-driven Codec [141]	×	✓	SSIM	Sig	Introduce a ultra-low delayed vibrotactile codec utilizing data-driven approach to meet Tactile Internet requirements.
	EVA [142]	×	✓	PSNR/ST-SIM	Sig	Present a autoencoder design to develop compression method for haptic vibrotactile data utilizing deep NN approach with focus to minimize rate-distortion cost.

## 1) Кинестетический кодек

Методы обработки кинестетических данных можно отнести к категории статистических или перцептивных подходов [127]. Алгоритмы обработки статистических данных в основном основаны на методах сжатия данных с потерями с использованием дискретных косинусных преобразований (DCT), дискретных преобразований Фурье (DFT) или вейвлет-преобразований для тактильного сжатия данных [16]. Сокращение статистических данных направлено на сжатие размера пакета для тактильной связи по сети, тогда как методы, основанные на восприятии, уменьшают скорость передачи пакетов тактильных данных. Обработка перцептивных данных заимствована из психофизики и опирается на просто заметную разницу (JND) пороговый подход. JND также известен как дифференциальный порог, который обеспечивает минимальное пороговое значение, при котором человек-оператор может воспринимать изменения интенсивности стимула, определенные по закону Вебера [128],

$$\Delta I/I = k$$

Просмотр исходного кода Щелкните правой кнопкой мыши рисунок, чтобы просмотреть MathML и дополнительные функции. Где  $\Delta I$  — разница в интенсивности стимуляции, а  $I$  — интенсивность стимуляции. Доля Вебера,  $k$ , также называемая константой Вебера или JND, обеспечивает верхнюю границу для расчета частоты дискретизации тактильных данных по сети. Закон Вебера использует рассчитанный порог для снижения частоты дискретизации тактильных данных в сети. Кодек на основе закона Вебера, также известный как Perceptual Deadband (PDb) или кодирование на основе PDb, является стандартным кинестетическим кодеком [120]. На рис. 9 показан кодек PDb для одномерных выборок тактильных данных, где черными точками показаны выходные данные схемы кодекса PDb, а пороги восприятия по PDb отображаются в синих зонах. Тактильные сэмплы, лежащие в пределах PDb (синие зоны), отбрасываются во время кодирования, и транслируются только перцептивно значимые сэмплы. Это указывает на то, что изменение сигналов слишком мало, чтобы его мог воспринять человек. PDb может снизить скорость передачи пакетов на 80-90%. Другие перцептивные схемы, основанные на JND, используют

кодирование с предсказанием и используются для предсказания тактильной выборки из тактильных данных [128]. В таблице 7 показана классификация кинестетических кодеков и соответствующие характеристики сжатия. В разделе IV-A2 подробно описываются причины, лежащие в основе этих классификаций, а рис. 10 иллюстрирует текущую таксономию таксономических кодеков.

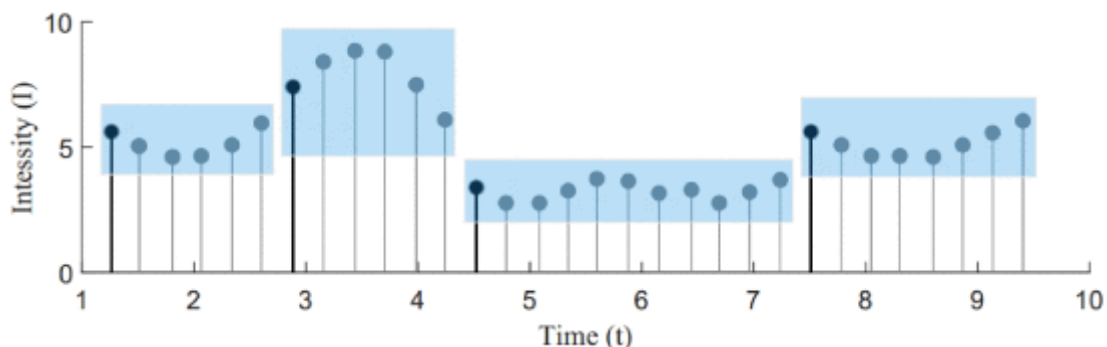


РИСУНОК 9. - Обзор принципа зоны нечувствительности восприятия.

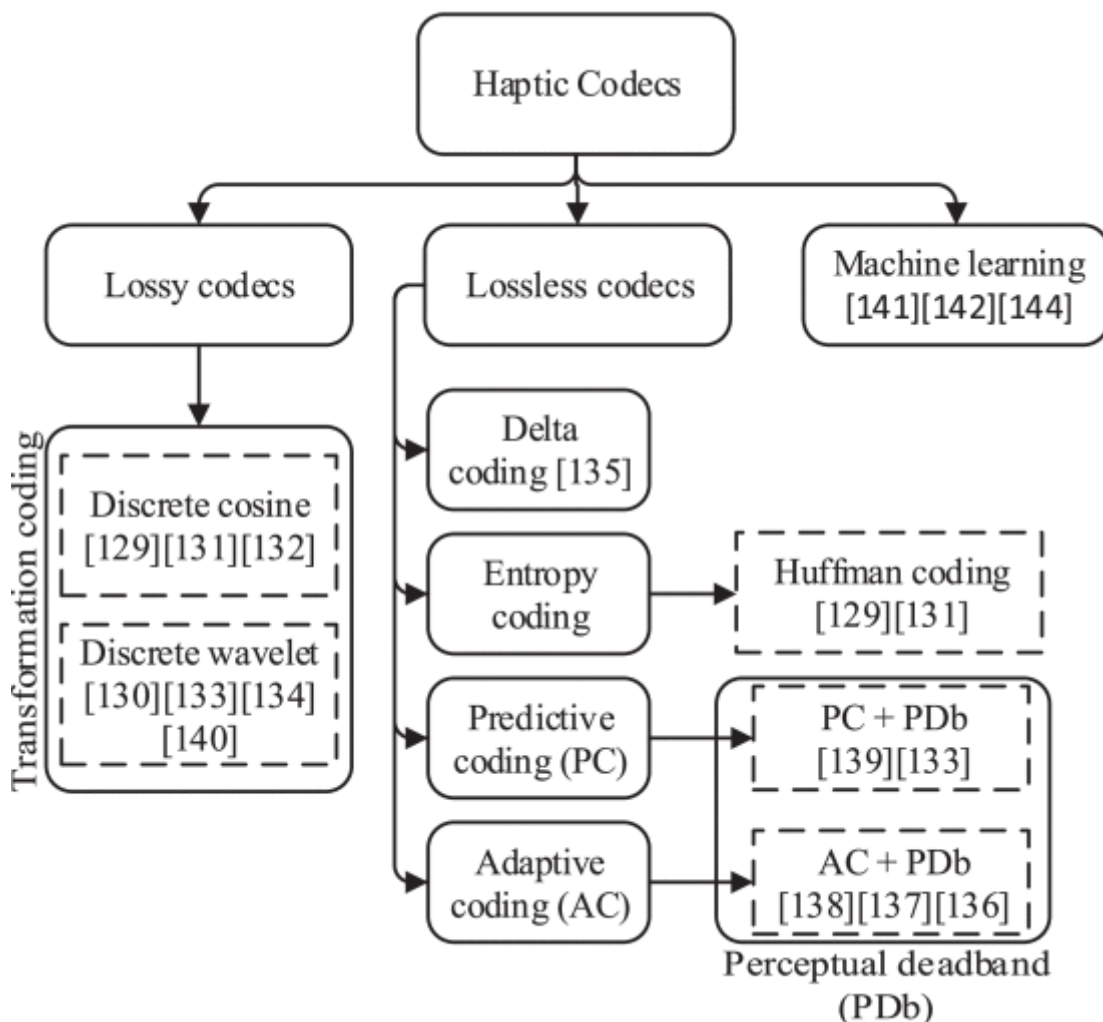


РИСУНОК 10. Таксономия существующих тактильных кодеков.

Многие подходы использовали кодирование с преобразованием для кинестетического кодека для устранения нарушений в сети связи. Предыдущие исследования, как правило, были сосредоточены на вариантах использования в реальном времени или не в реальном времени

для разработки тактильного кодека. В этой статье основное внимание уделяется схемам тактильного сжатия данных в реальном времени. Причина в том, что тактильное сжатие трафика в режиме реального времени помогает уменьшить эффект помех от джиттера в сети связи. Авторы в [129] предложили подход квантования для сокращения тактильных данных в сети связи. DCT преобразует тактильную информацию в частотную область, затем рассчитываются и квантуются коэффициенты DCT, и, наконец, для сокращения тактильных данных использовалось кодирование Хаффмана. Для проверки предложенного метода был организован эксперимент по копированию движения. В работе [130] предложено кодирование преобразования волновых пакетов (WPT) из сжатия изображений для тактильного сжатия данных для систем телеопераций. Они показали, что предложенная схема кодека работает лучше, чем DCT и DFT, с точки зрения размера буфера, глубины сжатия и вычислительной сложности. Несмотря на преимущества, анализ показывает, что размер буфера влияет на задержку сети, добавляя дополнительную задержку обработки. Авторы предлагают использовать максимальную глубину сжатия и оптимальный размер буфера с минимальной вычислительной сложностью для оптимального сжатия данных.

Однако применение БПЭ к входным сигналам приводит к искажению [131], поэтому для системы управления сетью для передачи тактильных данных был предложен алгоритм выбранного DCT (sDCT). Алгоритм пузырьковой сортировки использовался для выбора самых высоких коэффициентов DCT на основе измерений высокой пиковой энергии. Результаты моделирования в статье показали, что предлагаемый подход sDCT превосходит существующие подходы DCT, DFT и WPT. Вычислительная эффективность с использованием подхода sDCT для систем телеуправления с тактильной поддержкой также была выше, чем у других подходов к сжатию. Вышеупомянутые методы сжатия на основе блоков, объединенные с методами передачи, внесли дополнительную задержку из-за обработки блоков сигналов. Существует потребность в методах сжатия, которые решают проблему высокой скорости передачи пакетов и сетевой нагрузки с минимальной задержкой обработки. В связи с этим исследователи предложили кодирование с предсказанием восприятия и гибридный блочный и потоковый подходы.

Авторы в [132] предложили кодек E2E с малой задержкой восприятия без потерь (PLC) для удовлетворения требований тактильного обслуживания. Предлагаемый ПЛК использовал кодирование длины цикла (RLC) после количественной оценки частотных сигналов, где RLC направлен на удаление избыточных или идентичных значений. Они использовали справочную базу данных [120] для справедливого сравнения с другими надежными базовыми показателями, включая DCT и sDCT. Предложенная схема продемонстрировала лучшую эффективность с точки зрения тактильного структурного сходства, отношения сигнал-шум (SNR), скорости передачи и задержки. Анализ показывает, что предложенная схема обеспечивает задержку кодирования 7 мс при длине 8 отсчетов и вычислительной задержке около 0,1 мс. В исследовании [127] проанализированы различные подходы к PDb с учетом одномерных и многомерных сигналов кинестетических данных. В [138] предложен метод оппортунистической адаптивной тактильной выборки (OAHs) для достижения высокой скорости тактильных пакетов и динамически адаптировать тактильную передачу сигнала данных в общей сети. Параметры для настройки тактильной частоты дискретизации в предложенной схеме OAHs контролировались на основе доли Вебера, чтобы соответствовать требованиям QoS для тактильного Интернета. Авторы в [137] предложили подход адаптивной выборки, основанный на восприятии, для оценки JND по телегаптическим данным в реальном времени и, следовательно, для снижения скорости передачи пакетов по сети связи. Основная цель заключалась в обновлении порога Вебера в режиме реального времени в соответствии с индивидуальным восприятием без

предварительного знания и адаптивной выборке сигналов силы для обеспечения QoE. Экспериментальные результаты для предложенной платформы подтвердили улучшение QoS и QoE. Однако предложенная ими схема показала лучшие результаты только с учетом фиксированного набора метрик QoS и QoE, таких как система без задержек связи, обеспечивающая стабильность и отсутствие ухудшения прозрачности.

В исследовании [136] изучался подход PDb к сокращению количества тактильных пакетов и были выявлены проблемы со скачкообразным тактильным трафиком во время телеопераций, что максимизировало другие сетевые нарушения, такие как задержка передачи и потеря пакетов. Они предложили адаптивную схему PDb с подавлением пиков для решения этой проблемы, динамически контролируя скорость передачи пакетов тактильных данных на основе предыдущих записей о передаче пакетов и уменьшая пакетную передачу. Также был предложен алгоритм управления скоростью с использованием четырехпараметрической логистической модели для использования PDb для стабилизации скорости передачи пакетов. Алгоритм управления скоростью отвечает за настройку PDb и управление дополнительной задержкой передачи.

Результаты моделирования показали, что предложенная схема улучшила QoS по сравнению с базовыми подходами PDb для субъективных и объективных показателей качества. В работах [92] и [128] рассмотрена прогностическая выборка для тактильных сигналов и несколько прогностических алгоритмов с упором на реализацию вариантов использования тактильного Интернета. В [139] авторы предложили модель Predictive-Perceptive (PP) с параллельной стратегией для уменьшения задержки кодека, как показано на рис. 11. Модель PP использовала авторегрессионную модель для прогнозирования будущих результатов на основе предыдущих результатов. Авторы доказали, что предложенная параллельная стратегия требует меньше времени выполнения и оптимизированного сокращения тактильных данных по сравнению с последовательной версией. Авторы в [135] предложили алгоритм сжатия Binary Indicated Numbers with Bit-level Integrated Scalability Support (BINBLISS) для потоковой передачи тактильных данных в реальном времени с использованием дельта-кодирования. Основная цель состояла в том, чтобы сжать тактильные данные без задержки. Авторы утверждают, что предлагаемый ими метод регулирует обработку в пределах определенного стандартного значения для обработки датчика (0,1 мс). Преимущества алгоритма BINBLISS были доказаны на двух наборах данных с точки зрения среднеквадратичной ошибки (MSE).

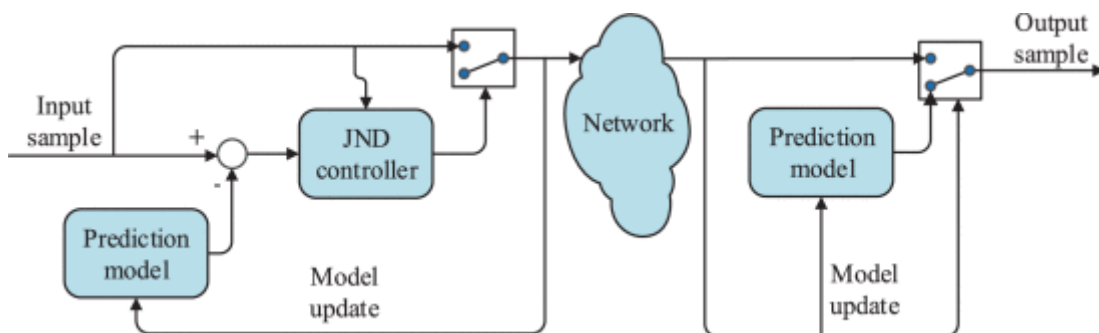


РИСУНОК 11. - Разработка прогностической перцептивной модели для тактильной связи в системе дистанционного управления с помощью прогностической выборки.

## 2) Тактильный кодек



Методы тактильного кодека также были разделены на две группы, аналогичные классификации кинестетических кодеков: кодирование с преобразованием и подходы анализа через синтез [140]. Эти подходы направлены на уменьшение сходства исходных тактильных сигналов. Кодирование преобразователя преобразует тактильные сигналы в представление предметной области с использованием DCT или DFT, как описано в разделе IV-A1; тогда как последний подход получает ключевые параметры во время анализа, а тактильные сигналы впоследствии синтезируются на основе этих захваченных параметров. Эти классификации тактильных кодеков аналогичны классификации методов кинестетических кодеков. Поэтому мы разделили методы кинестетического и тактильного кодирования на три класса: кодирование с преобразованием, анализ через синтез и гибридное, сочетающее оба подхода. В Таблице 7 сравниваются текущие подходы к сокращению и сжатию тактильных данных для улучшения предоставления QoS и QoE для систем телеуправления.

В нескольких предыдущих исследованиях рассматривались схемы кинестетического кодирования с упором на обеспечение стабильной тактильной связи в системе телеуправления при наличии сетевых нарушений. Однако в большинстве подходов игнорировались тактильные характеристики тактильной коммуникации, и в нескольких исследованиях рассматривались тактильные кодеки. Большинство телеопераций требуют как кинестетических, так и тактильных тактильных аспектов, поэтому необходимы оптимальные схемы тактильных кодеков. Поэтому мы эмпирически рассмотрели и обобщили существующие подходы к тактильным кодекам, чтобы сделать их информативными для сообщества разработчиков тактильных кодеков. Вибротактильные кодеки с квантованием перцептивных вейвлетов (VC-PWQ) также рассматривались в [133]. Во-первых, блок разделил входные сигналы на блок, поступающий в DWT, который преобразовывал каждый входной блок в другой частотный спектр. Во-вторых, психофизическая модель измеряет пороги восприятия, чтобы уменьшить корреляции сигналов. Предложенная схема показала эффективность с точки зрения SNR и PSNR при различной степени сжатия (CR) по сравнению со стандартным набором данных с 280 вибротактильными образцами. Результаты также указывают на низкую алгоритмическую задержку.

Тактильный кодек, основанный на разреженном линейном предсказании (SLP), предложенный в [134], с основной целью оптимизировать QoE, гарантируя низкую скорость передачи без снижения качества сигнала. Они рассмотрели ограничения разреженности алгоритма прогнозирования для моделирования информации об индивидуальной чувствительности и предложили метрику оценки качества восприятия как спектрально-временную схожесть (ST-SIM) для оценки схем тактильного кодирования. Результаты моделирования с точки зрения ST-SIM и MSE подтвердили, что предложенная схема тактильного кодека имеет потенциал для сжатия вибротактильных сигналов. Точно так же исследование в [140] расширило модель [134] и предложило перцептивное вибротактильное кодирование (PVC), основанное на SLP, включающее модель кожной чувствительности для поддержки тактильно управляемых услуг. Этот гибридный подход сначала анализирует вибротактильные сигналы для захвата параметров фильтра, а затем использует эти параметры для синтеза сигналов. Затем они разработали тактильно-чувствительную модель, основанную на четырех каналах перцептивного квантования, как показано на рис. 12. Предложенная схема PCV-SLP была проверена путем моделирования на двух общедоступных базах данных, одна из которых содержит 280 вибротактильных сигналов от 9 различных образцов [143], другой включал 1001 вибротактильный сигнал для 184 различных классов образцов [144]. Производительность оценивалась как по субъективным, так и по объективным показателям NQA.

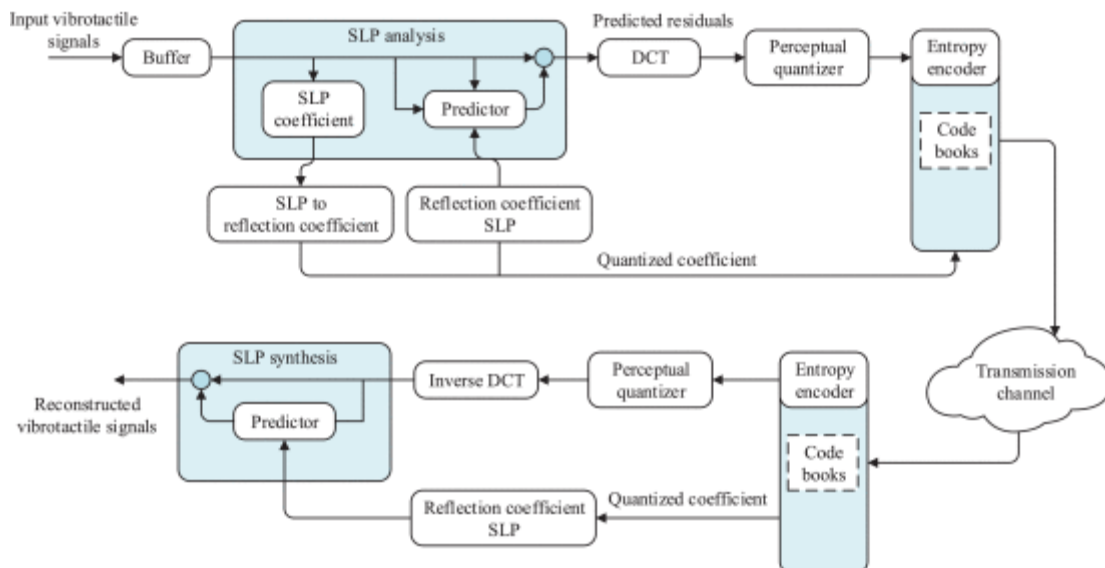


РИСУНОК 12. - Блок-схема конструкции схемы PVC-SLP вместе с деталями кодера и декодера (аббревиатуры определены в 2).

В [141] авторы предложили подход, основанный на данных, для снижения тактильной скорости передачи данных в пределах ограниченной полосы пропускания связи для обеспечения QoS и QoE. Предложенная схема кодирования была предложена как инструмент для минимизации вычислительной сложности, задержки и ухудшения качества. Таким образом, предложенная ими схема учитывает связь со сверхнизкой задержкой и вычислительную сложность для поддержки приложений, управляемых тактильными ощущениями, в сети связи 5G. Они экспериментально оценили производительность сжатия для предлагаемого подхода на основе данных с точки зрения энергопотребления. В исследовании [142] предложен сквозной вибротактильный автоэнкодер (EVA) на основе глубокой нейронной сети для тактильного кодека, чтобы улучшить производительность Rate-Distortion (RD) и максимизировать QoE. Предложенная схема нацелена на оптимизацию RD с минимальными затратами и низкой задержкой кодирования E2E. Модель EVA была обучена на стандартных трассах данных для вибротактильного сжатия данных с различными уровнями сжатия. Экспериментальные результаты подтвердили, что предложенная схема EVA превосходит PVC-SLP для всех трасс данных с точки зрения PSNR и STSIM и улучшенной производительности RD.

**Резюме и идеи:** В этом разделе представлены схемы тактильных кодеков для поддержки тактильных интернет-сервисов. Высокоэффективные кодеки с малой задержкой необходимы для обеспечения обеспечения QoS и QoE. Рассмотрены существующие методы кодирования как для кинестетической, так и для тактильной обратной связи, включая уменьшение размера пакета или скорости передачи пакетов и минимизацию потерь пакетов для улучшения качества обслуживания. Рассмотренные исследования были сосредоточены на поиске компромиссов для RD и улучшении PSNR и других показателей качества восприятия для максимизации QoE.

Сначала мы описали различные методы кодирования в реальном времени, включая кодирование с потерями и без потерь, а затем классифицировали существующие методы тактильного кодирования на кодирование с преобразованием, анализ через синтез и гибридные подходы. Мы представили подробное сравнение совсем недавно предложенных решений в

Таблице 7. Наиболее важное открытие заключалось в том, что предыдущие исследования были больше сосредоточены на кинестетических, чем на тактильных кодеках, и было мало исследовательских работ, посвященных тактильным кодекам по сравнению с кинестетическими кодеками. Следовательно, существует значительный спрос на методы улучшения QoS и QoE для тактильно управляемых услуг. Более того, не существует стандартной метрики объективной оценки для измерения качества восприятия; следовательно, работа в этом направлении также необходима.

## В. Методы тактильной системы управления

Постоянно растущий спрос на телеоперации с тактильной информацией по сетям связи побудил исследователей исследовать и сосредоточиться на различных схемах управления, обеспечивающих стабильность. Основная цель проектирования системы управления системой телеуправления состоит в том, чтобы обеспечить удовлетворенность оператора при наличии как задержки, так и тактильной потери пакетов. Таким образом, разработка оптимального контроллера с учетом сложности системной модели, помех, параметрических неопределенностей, задержки связи, высокой скорости передачи пакетов ( $\geq 1$  кГц) и потери пакетов ( $\leq 10^{-9}$ ) является сложной задачей. В ссылках [16], [40], [145], [146], [147] и [148] рассмотрены различные схемы управления, но ни в одной из них не приводится подробное обсуждение решений для управления системами телеуправления с тактильной поддержкой. В работе [16] представлен обзор различных систем управления системами телеуправления с тактильной поддержкой, но они не рассматривали схемы управления на основе машинного обучения или интеллектуальное прогнозирование для тактильных данных. Авторы [148] рассмотрели недавно предложенный с управления, но игнорировали тактильные аспекты коммуникационной сети. В [40] авторы рассмотрели методы проектирования управления для медицинских телеуправляемых систем. Однако они проигнорировали проблемы проектирования элементов управления, чтобы гарантировать стабильность и прозрачность. Поэтому в этой статье мы представляем обширный обзор и сравнительный анализ недавно предложенных утвержденных решений по проектированию управления с упором на обеспечение QoS и QoE для систем телеуправления с тактильной поддержкой.

Двусторонняя архитектура управления системами телеуправления: в разделе III-A5 обсуждались цели системы телеуправления для управления удаленными средами и выполнения задач в соответствии с управляющими сигналами оператора. В частности, тактильная связь между ведущим и подчиненным манипуляторами требует наличия замкнутого контура в сети связи. Следовательно, глобальный контур управления делает системы телеуправления более чувствительными к задержкам связи и потерям пакетов. Задержка связи является критическим фактором для производительности системы дистанционного управления из-за компромисса между стабильностью и прозрачностью. Эти проблемы, связанные со связью, снижают стабильность и прозрачность системы и, в конечном итоге, снижают QoE оператора. Следовательно, для повышения стабильности и прозрачности системы дистанционного управления необходима соответствующая конструкция контроллера. Система управления направлена на обеспечение адекватной обратной связи по удаленной задаче и поддержание общей стабильности системы. В системах телеуправления используются различные архитектуры управления, основанные на тактильном обмене сигналами между главным и подчиненным доменами. Эти архитектуры управления были классифицированы по их способности компенсировать задержки связи и повышать стабильность и прозрачность двусторонних телеопераций [149].

Наиболее общий дизайн архитектуры включает двухканальную (2-канальную) и четырехканальную (4-канальную) коммуникационную архитектуру. 2-канальную архитектуру можно разделить на четыре подкатегории [150]. Главный и подчиненный домены используют только один канал в 2-канальной архитектуре для обмена двусторонней связью.; тогда как пары разных каналов используются в 4-канальной архитектуре для обмена тактильной информацией. Измерения положения используют два других канала, а измерения силы используют два разных канала для обмена данными между ведущим и ведомым. Измерения положения и силы используются как ведущими, так и ведомыми локальными контроллерами для компенсации временной задержки и обеспечения стабильности и прозрачности системы.

Исследование в [40], [89] представило другие возможные архитектуры управления для многосторонних систем телеуправления в сетях связи с задержкой по времени. В настоящем документе обобщаются архитектуры двусторонних систем управления телеуправлением для обеспечения требований QoS и QoE с учетом важных и уже проверенных схем управления для двусторонних систем телеуправления с изменяющейся во времени и неизвестной задержкой для улучшения качества обслуживания и качества обслуживания, как показано в таблице 8.

**ТАБЛИЦА 8 Сравнение различных схем управления**

Scope	Reference	Improved QoS/QoE						Stability Analysis				Application	Major Contribution
		Latency		Errors									
		Unknown Variable	Position/Velocity	Force Feedback	Parameters	Uncertainty	Model Jump	Effect	Passivity Theorem	Lyapunov Theorem	Subjective Experiment		
WVA	Li et al. [78]	X	X	✓	✓	X	X	✓	X	X	Tele-driving	Improve control algorithm via real-time estimation of slippage-induced velocity error.	
	Gao et al. [158]	X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	Tele-driving	Two energy reservoirs based controller are constructed to bound the wave variables under the passivity framework.	
	Karwi et al. [162]	X	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	Tele-rehabilitation	Design the phase-lead filter to satisfy the patient side stability.	
	D'Amore et al. [159]	X	X	✓	X	X	X	✓	X	X	Haptic teleoperation	Present a linear model to optimize the wave transformation.	
	Yang et al. [163]	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	Haptic teleoperation	Focus on improving stability by combining NN models and WVA.	
TDPA	Xu et al. [170]	X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	Haptic teleoperation	Focus on eliminating force fluctuation and position tracking error to maintain system passivity.	
	Sun et al. [171]	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	Haptic teleoperation	Improve the position and force tracking performance under fast varying delay.	
	Atashzadeh et al. [172]	X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	Tele-rehabilitation	Deal with non-passivity by delivering the user's hand passivity characteristics.	
	Buongiorno et al. [173]	X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	Tele-rehabilitation	Integrate energy and time threshold to reset PD with a focus to guarantee stability and transparency.	
	Porcini et al. [174]	X	X	✓	✓	X	X	✓	X	X	Tele-rehabilitation	Investigate delay and low control loop frequency effect on the stability of the system.	
Adaptive	Hashemzadeh et al. [175]	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓	X	Haptic teleoperation	Focus on synchronizing the environment states to ensure stability of the system.	
	Forbigger et al. [176]	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	Surgical training	Deal to improve uncertain and delayed haptic output virtual environment.	
	Na et al. [177]	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	Haptic teleoperation	Improve the tracking performance along with operator's hands' disturbance and sensors data compensation.	
	Iha et al. [178]	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	Surgical training	Find the best tradeoff between stability and transparency by applying the proposed maximum force feedback controller.	
Robust	Hao et al. [179]	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	Tele-surgery	Integrate SMC with disturbance observer to tackle tracking error and stability issues.	
	Pediredlo et al. [180]	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	Haptic teleoperation	Present multimodal adaptive algorithm to deal tracking errors, nonlinearities, and environment uncertainties under variable time delay with a focus to ensure stability and transparency.	
MMT	Gao et al. [181]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	Tele-palpaton	Present a model-based design integration Kevin-Boltzmann model and self-perturbing recursive least squares algorithm to improve both force feedback and position/velocity tracking for tele-palpaton application.	
	Liu et al. [182]	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	Surgical applications	Propose a nonlinear MMT for surgical applications incorporating Hunt-Crossly, log linear and recursive least squares techniques to ensure stability and transparency.	
	Song et al. [183]	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	Haptic teleoperation	Present a force-based updating model to reduce the effects of model jumping such as force disturbance.	
	Yazdankhoo et al. [184]	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	Haptic teleoperation	Present a control design introducing fully decoupling between master and slave side during period of mismatch to ensure stability and high level of transparency.	
	Beik et al. [51]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	Haptic teleoperation	Present a framework integrating dynamic movement primitives and RL technique to ensure stability in long-distance teleoperation with long communication delay

### 1) Подход, основанный на пассивности

Двусторонние системы телеуправления обычно моделируются с использованием модели двухпортовой сети. На рис. 13 показан обмен энергией между входными и выходными клеммами для двухпортовой модели системы телеуправления. Предыдущие исследования двусторонних телеуправляемых систем с тактильной поддержкой показали, что задержка связи вносит дополнительную энергию, вызывая нестабильность и несоответствие в замкнутой системе [148]. Были предложены различные подходы к разработке систем тактильного управления в двухпортовых сетях для устранения нестабильности и повышения прозрачности.

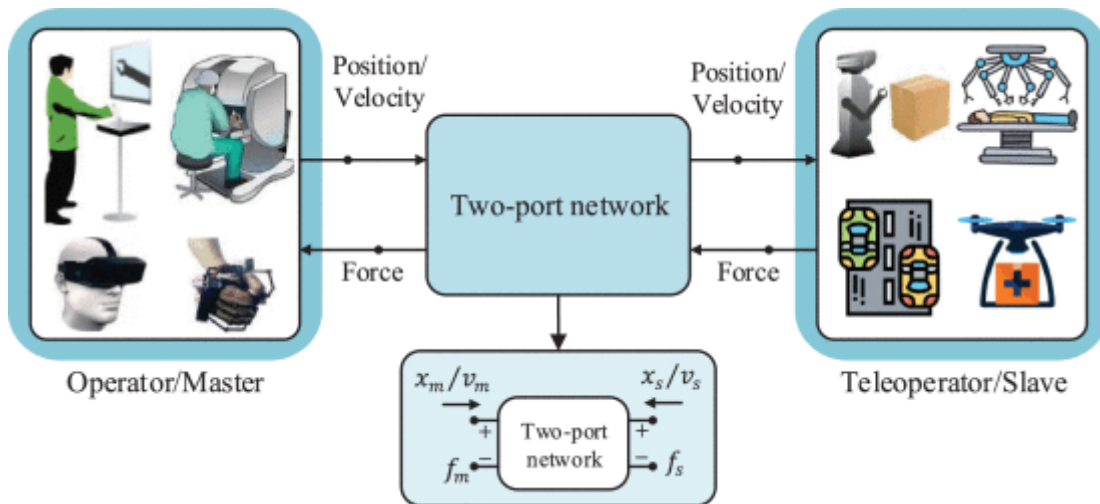


РИСУНОК 13. Обзор двухпортовой сети для двусторонней системы телеуправления (обозначения определены в таблице 3).

Большинство современных контроллеров основаны на теории пассивного управления (ПТ) [151], которая предлагает жизненно важное преимущество, состоящее в том, что динамические параметры как для ведущей, так и для подчиненной среды не требуется знать перед моделированием двусторонних систем телеуправления. В частности, пассивные контроллеры могут моделировать неизвестные нелинейные и сложные системы с более высокой степенью свободы и были предложены как для линейных, так и для нелинейных двусторонних систем дистанционного управления. Однако в этой статье рассматриваются схемы управления только для нелинейных систем дистанционного управления, поскольку они лучше связаны с реальными приложениями и сложностями, чем с линейными средами. Построение билатеральных систем телеуправления на основе ПКТ накладывает на все компоненты условия пассивности, которые наиболее легко выполняются системой билатерального телеуправления только с использованием пассивных элементов, не производящих дополнительной энергии. Пассивность системы можно выразить как

$$P(t) = \int_0^t X^T \cdot Y d_t \geq 0, \quad (4)$$

Где  $X$  и  $Y$  — входная и выходная энергия для пассивной системы управления, соответственно. Таким образом, общая входная энергия должна превышать выходную энергию для пассивной системы. Все двухпортовые элементы должны следовать этому свойству пассивности, чтобы обеспечить пассивность системы дистанционного управления. Работа в [152] показала, что двусторонние системы должны быть глобально пассивными, чтобы гарантировать стабильность.

Поэтому е, предполагается, что человек-оператор и удаленная среда ведут себя как пассивные для двусторонних систем дистанционного управления, тогда как сеть связи не является пассивной из-за задержки связи. Задержка связи не только разрушает передаваемые тактильные сигналы, но и производит дополнительную энергию. Поэтому двусторонний замкнутый контур

управления не сохраняет пассивности и становится неустойчивым. Задача состоит в том, чтобы справиться с непассивностью (задержкой связи), чтобы обеспечить общую пассивность и стабильность системы. В литературе для преодоления этих проблем было предложено несколько подходов к управлению пассивностью, включая подходы с волновой переменной (WVA), пассивность во временной области (TDPA) и подходы к сопоставлению моделей. В следующем разделе представлены решения управления на основе пассивности для улучшения QoS и QoE для двусторонних систем телеуправления с тактильной поддержкой, а в таблице 8 сравниваются различные выходные данные и параметры.

#### а: Метод волновой переменной

Некоторые более ранние концепции использовали теорию рассеяния в рамках пассивности [153], предлагая стратегию волновых переменных для кодирования информации о скорости и силе в волновые переменные. Стратегия волновой переменной расширяет пассивный контроллер для преодоления проблем с задержками и повышения стабильности системы дистанционного управления. На рис. 14 показана общая структура стратегии волновой переменной, которую можно выразить как

$$u_m = \frac{bx_m + f_m}{\sqrt{2b}}, w_s = \frac{bx_s - f_s}{\sqrt{2b}} \quad (5)$$

Где  $x_m$  и  $x_s$  — положение/скорость главного и подчиненного манипулятора соответственно;  $f_m$  и  $f_s$  — сила оператора и ведомого манипулятора соответственно;  $u_m$  и  $w_s$  — передача волны от главного к подчиненному и от подчиненного к главному доменам соответственно;  $b$  — коэффициент настройки для получения подходящего баланса между жесткостью волны и отраженной инерцией (называемой волновым импедансом). Были предложены различные варианты WVA, и подробная информация о них представлена в [154]. Хотя WVA проявляет пассивность при неизвестной постоянной задержке связи и поддерживает стабильность системы телеуправления [154], она не сохраняет пассивность при переменной временной задержке. Таким образом, тактильные сигналы, которые несут информацию о главном домене, такую как положение и сила в подчиненном домене, искажаются в течение переменной временной задержки и создают дополнительные проблемы, такие как отслеживание положения и скорости и отражение волн (отражение силы) [155]. В частности, переменная временная задержка десинхронизирует удаленные задачи, ухудшает информацию о местоположении и увеличивает производительность отслеживания, что в конечном итоге снижает общую прозрачность системы дистанционного управления.



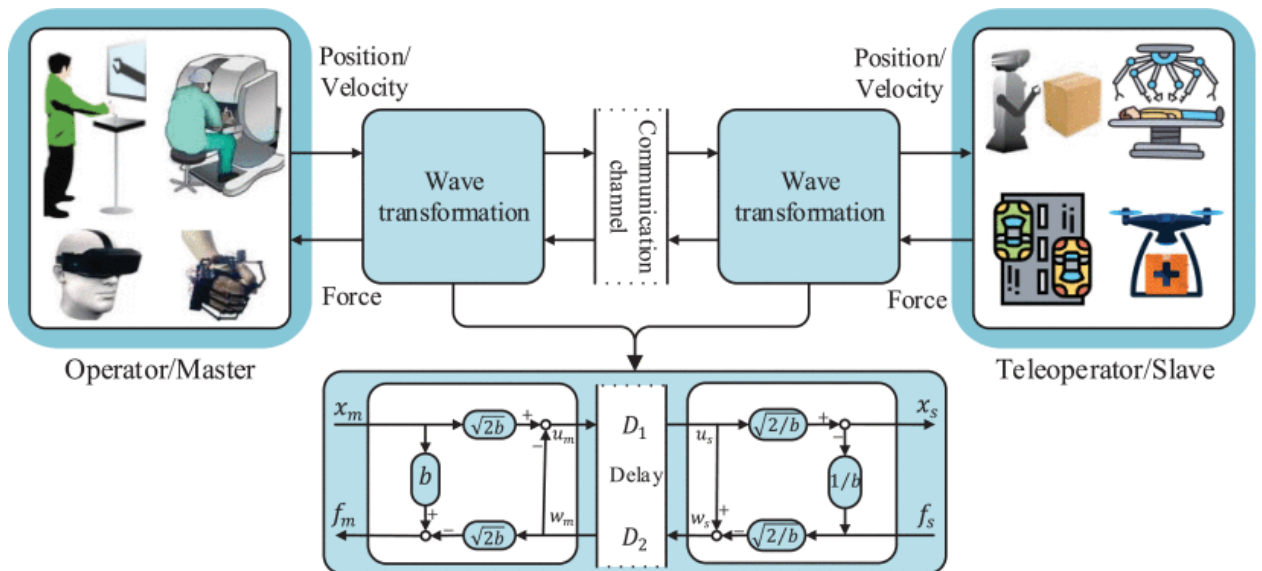


РИСУНОК 14. - Стратегия преобразования волновых переменных для систем телеуправления для компенсации задержки связи в условиях пассивности (обозначения определены в таблице 3).

Было предложено множество подходов для решения этих проблем, чтобы обеспечить стабильность и прозрачность системы телеуправления с тактильной поддержкой. В работах [156], [157] исследовались волновые переменные для включения ошибок положения ведущего и ведомого, предлагались сигналы положения, скорости и силы соединения, и они передавались в виде волновых интегралов для компенсации ошибок отслеживания положения. Однако они рассматривали только постоянную неизвестную временную задержку связи. Недавние исследования предложили расширения WVA для облегчения проблемы с различными временными задержками для тактильных телеуправлений. В таблице 8 приведены перспективные решения на основе WVA для тактильных телеуправляемых систем.

В [78] авторы предложили схему управления вариациями WVA для телеуправления в сетях связи с задержкой по времени, имеющую дело с поверхностным проскальзыванием при постоянной временной задержке при телеуправлении с тактильной поддержкой. Они оценили параметры местности в реальном времени и улучшили стабильность и прозрачность алгоритма управления автономными транспортными средствами на скользкой местности. Результаты показывают, что предложенная схема может компенсировать временную задержку и непассивность завершения среды подчиненной стороны, используя преобразование волны и гарантируя консервативные условия стабильности для улучшения QoE. Однако авторы проигнорировали переменную временную задержку, которая является одним из критических параметров QoS. Работоспособность модели управления и гарантированная стабильность были продемонстрированы с использованием критерия Ллевеллина и пассивности.

Авторы в [158] предложили менее консервативную схему управления, названную компенсацией волновой переменной. Значительным вкладом в предлагаемый подход стало улучшение характеристик отслеживания как положения/скорости, так и отражения силы для развития телероботизированной хирургии. Эффективность предложенной конструкции была проанализирована экспериментально и с помощью моделирования. Предложенная структура компенсации переменной волны гарантировала пассивность всей системы, сохраняя при этом

прозрачность системы. Прозрачность, также известная как телеприсутствие, напрямую влияет на требования к качеству обслуживания. Таким образом, анализ показывает, что WVA с временной задержкой может обеспечить стабильную производительность отслеживания, когда обеспечение системы QoE. Однако значение временной задержки в канале связи установлено в районе 200 мс, что очень много по сравнению с появляющимися телегаптическими приложениями. В исследовании [159] для оптимизации параметра настройки WVA применялась теория линейного управления. Однако линеаризованная модель не учитывает переменную временную задержку. Впоследствии [160] предложил предсказатель волны на основе WVA, включающий фильтр Калмана и регулятор энергии. Предложенный метод был применен на ведущей стороне для прогнозирования волновых переменных подчиненной стороны. Предсказатель волны компенсировал переменную временную задержку связи и улучшил стабильность системы. В недавнем сравнительном исследовании предикторы Смита и WVA рассматривались в рамках пассивности для двусторонних систем телеопераций с силовой обратной связью [161].

Работы [162], [163] расширили WVA, комбинируя их с другими стратегиями для оптимизации схемы управления. В работе [162] предложена конструкция управления для тактильных двусторонних телереабилитационных систем нижней конечности человека, разработаны фильтры волновых и фазовых отведений для предлагаемой конструкции управления, обеспечивающие боковую стабильность пациента. Целью предлагаемого фильтра фазового опережения является стабилизация телереабилитационной системы при наличии временной задержки, а также минимизация ошибки положения. Для эксперимента они рассмотрели постоянную временную задержку в 20 мс, чтобы компенсировать эффект стабильности. Авторы [163] объединили искусственные нейронные сети (ИНС) с WVA, чтобы обеспечить стабильность при изменяющейся во времени задержке связи. Экспериментальные результаты подтвердили, что предложенная гибридная схема управления улучшила характеристики отслеживания как для обратной связи по положению, так и для обратной связи по силе по сравнению с контроллером с пропорциональной производной. Несколько других вариантов WVA были предложены в рамках пассивности для двусторонних систем телеуправления [164], [165], [166], а также обсуждались схемы управления для многосторонних систем телеуправления [167], [168], [169].

#### **b: Пассивность во временной области**

Подход пассивности во временной области (TPDA) является еще одним эффективным вариантом в рамках концепции пассивности для стабилизации тактильных двусторонних систем телеопераций при наличии неизвестных и переменных временных задержек в каналах связи [185]. Как обсуждалось в Разделе IV-B1, структура пассивности обеспечивает механизм для понимания нелинейных систем, основанный на потоке мощности и поведении энергии. Преимущество TPDA состоит в том, что ему не нужно преобразовывать параметры потока мощности в волновые переменные, и он не модельный, т. Е. Не требует предварительных знаний о динамике окружающей среды и / или различных эффектах временной задержки. В [186] сравнивались характеристики WVA и TPDA для двусторонних систем телеуправления с силовой обратной связью, где TPDA использовала наблюдатель пассивности (PO) и контроллер пассивности (ПК), чтобы гарантировать стабильность ввода/вывода системы телеуправления. PO ежесекундно отслеживает поток энергии телеуправления, тогда как PC рассеивает лишнюю энергию для обеспечения пассивности системы и действует как демпферная переменная. На рис. 15 дублируется TPDA для тактильной двусторонней системы телеуправления по каналам связи с переменной задержкой из [170]. Настройка ПК зависит от конструкции контроллера и может

использоваться в последовательной или параллельной конфигурации. Регулируемые демпфирующие элементы ( $\alpha$  и  $\beta$ ) используются для рассеивания дополнительной энергии и поддержания пассивности системы.

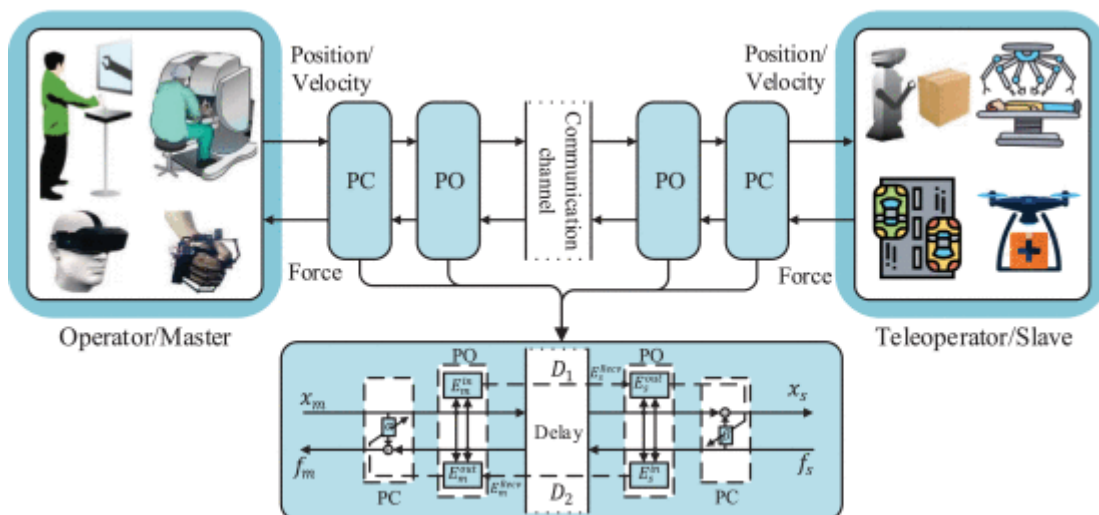


РИСУНОК 15. - Обзор пассивного подхода во временной области для систем телеуправления для компенсации разной задержки связи во времени в рамках пассивности (обозначения определены в таблице 3).

Традиционный предложенный TDPA [185], [187] был ограничен 1 DoF и столкнулся с проблемами ошибок отслеживания. Они были расширены для решения проблем с переменным временем задержки [188], [189], таких как отслеживание положения и ошибка синхронизации. Однако, несмотря на то, что эти решения решают различные проблемы при различных временных задержках с несколькими степенями свободы, прозрачность остается открытой проблемой. В исследовании [171] предложена схема управления на основе NN для изучения потока мощности и решения проблем положения и отслеживания силы. Предложенный TDPA улучшил передачу положения и силы при значительной и быстрой изменяющейся во времени задержке, и впоследствии его сравнили с традиционным PO с использованием теоремы Ляпунова для анализа стабильности системы. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый пассивный контроллер не нарушает положение и принудительное отслеживание из-за эффекта джиттера. Предлагаемый алгоритм управления способен работать с внешней (человек/окружающая среда) и внутренней параметрической неопределенностью и гарантирует устойчивость системы. Вопреки строгим требованиям QoS и QoE для телегаптических систем временная задержка устанавливается в диапазоне от 100 мс до 200 мс во время экспериментов. Модулированный контроллер пассивности во временной области (M-TDPC) был предложен [172] для использования биомеханики руки оператора для обеспечения пассивности и повышения эффективности. обеспечение прозрачности для двусторонних реабилитационных систем с тактильной поддержкой. Модифицированная четырехканальная схема управления Лоуренса использовалась в соответствии с теоремой пассивности для исследования устойчивости системы и прозрачности силовой обратной связи [190].

Ссылка [173] использовала TDPA для асимметричных тактильных телеуправляемых систем с несколькими степенями свободы, чтобы найти ограничения TDPA и предложить решения для их устранения. Предложенный дизайн управления объединил предыдущие исследования [191] и [192], где PO сбрасывался, если не было выхода активной энергии, а силовая обратная связь была

меньше определенного порога. Экспериментальные результаты подтвердили, что предложенная система обещала стабильность, если система дистанционного управления имела главный домен импедансного типа и подчиненный домен типа допуска. Современная технология TDPA была дополнена несколькими степенями свободы со случайно изменяемой временной задержкой для устранения колебаний силы и ошибок отслеживания положения [170], называемых межпространственными артефактами (CDA). Авторы утверждали, что предложенный ими дизайн управления на основе проекций может устранить системные артефакты и поддерживать справедливый компромисс между стабильностью и прозрачностью с точки зрения QoE. CDA стремится достичь хорошего QoE при значении параметра задержки QoS 100 мс.

В [174] авторы расширили TDPA для решения сложных бимануальных телеопераций, где поток энергии обменивается между двумя руками телеробота с тактильной поддержкой. Авторы оценивают архитектуру в двух реальных сценариях, чтобы экспериментально доказать эффективность предлагаемого расширения TDPA. Было исследовано влияние задержки и низкой частоты контура управления на QoE системы с точки зрения стабильности и прозрачности. Они моделируют систему с RTT 50 мс в сети, и результаты показывают, что она может достичь хорошей производительности при постоянной задержке. Система оставалась стабильной даже при использовании с многосторонними системами телеуправления. Недавно было предложено несколько расширений TDPA для многосторонних тактильных систем телеуправления [193], [194]. Традиционная блок-схема TDPA для многосторонних систем телеуправления была преобразована в сетевой портрет с потоком энергии для понимания параметров системы [194], и был проведен эксперимент с трехсторонней системой телеуправления для анализа стабильности.

## 2) Адаптивный подход к управлению

Как обсуждалось в разделах IV-A и IV-B1, потеря пакетов и задержка связи нарушают стабильность и прозрачность системы дистанционного управления, и было предложено множество методов для решения проблем в рамках концепции пассивности. Однако некоторые неопределенности параметров модели ухудшают стабильность и прозрачность системы дистанционного управления в дополнение к сетевым задержкам. Эти динамические неопределенности возникают из-за сложностей и нелинейностей главного и подчиненного доменов. Традиционные математические методы неэффективны при работе с этими параметрическими неопределенностями и задержками связи, поэтому для устранения этих неопределенностей было предложено несколько подходов, основанных на синхронизации. Методы, основанные на синхронизации, разрабатывают алгоритмы оценки параметров для устранения внешних параметрических возмущений и неопределенностей и синхронизации локальных и удаленных параметров окружающей среды. Адаптивные контроллеры для систем телеуправления классифицируются по четырем основным областям исследований: оценка основных и подчиненных сред, компенсация задержки связи, подавление помех и многофункциональное адаптивное управление. Подробные описания различных адаптивных контроллеров системы дистанционного управления доступны в [195].

Более ранние исследования адаптивных контроллеров предложили адаптивный контроллер, синхронизирующий состояние, для систем телеуправления с тактильной поддержкой [175], предназначенный для синхронизации локальных и удаленных параметров окружающей среды

при неизвестных и различных задержках связи. Аналогичный подход разработал контроллер, основанный на прогнозах усиления обратной связи [176], для устранения задержки вывода в неопределенной виртуальной среде. Предлагаемый адаптивный контроллер устранил ошибку отслеживания и сохранил стабильность во время взаимодействия с виртуальной средой. Авторы исследуют эффекты выборки и задержки, вызванные вычислениями во время взаимодействия с удаленной средой. Цель предлагаемого состоит в том, чтобы обеспечить желаемое качество обслуживания человека-оператора, гарантируя при этом стабильность замкнутого контура при наличии вычислительных эффектов и эффектов выборки. В [177] предложен контроллер силы импеданса для компенсации параметрических возмущений и шума датчика и, следовательно, улучшения характеристик отслеживания, а в [178] предложено прогнозировать максимальную выходную силу для системы, чтобы поддерживать пассивность системы. Предлагаемый контроллер ограничивал дополнительные усилия для повышения стабильности и обеспечения максимальной точности.

### 3) Надежный подход к управлению

Подход к управлению является надежным, если он учитывает возмущающие факторы, такие как неопределенности модели, силы трения и внешнего взаимодействия, а также параметрические возмущения, и обеспечивает стабильность. Фундаментальная цель надежных подходов к управлению состоит в том, чтобы справиться с этими помехами, включая немоделированную динамику, и гарантировать стабильность при сохранении удаленной задачи. производительность при дистанционной связи. Подход надежного управления наблюдает за наихудшими условиями сети связи, которые угрожают эффективности системы и снижают прозрачность и стабильность системы. Разница между адаптивными и робастными контроллерами заключается в том, что робастные контроллеры имеют предопределенные границы неопределенностей модели, а также внутренних и внешних возмущений, тогда как адаптивные контроллеры не зависят от предшествующих знаний о динамике системы. Многие передовые контроллеры сочетают в себе адаптивные и надежные контроллеры для обеспечения надежности системы, и многие передовые схемы надежного управления использовались для тактильных телеуправляемых систем, включая управление скользящим режимом (SMC),  $\mu$ -синтез и  $H^\infty$ . SMC перемещает состояния системы по четко определенной скользящей поверхности и состоит из двух частей: конструкции скользящей поверхности и закона управления, который сводит сигналы.

SMC, включающий Disturbance Observer (SMC-DOB), был предложен для хирургических систем дистанционного управления [179]. DOB работает как контроллер с прямой связью, а SMC как контроллер с обратной связью. DOB оценивает помехи и неопределенности, тогда как SMC обеспечивает устойчивость системы при наличии этих проблем. Предлагаемая производительность SMC-DOB была оценена с помощью моделирования и экспериментов, подтвердивших, что она решает проблему вибрации и значительно улучшает производительность отслеживания системы по сравнению с традиционной SMC. Авторы в [180] предложили алгоритм мультимодального адаптивного надежного управления (MARC) для тактильных телеуправляемых систем для повышения качества тактильной обратной связи. Предложенный SMC обеспечил стабильность системы и обеспечил высокую точность прозрачности при обработке различных временных задержек, ошибок положения/скорости, параметрической неопределенности, внешних сил и нелинейностей окружающей среды. Для оценки параметров окружающей среды использовался адаптивный алгоритм, который был

подтвержден моделированием и экспериментом. Предлагаемые характеристики MARC сравнивались с базовыми моделями для MSE.

#### 4) Модельно-опосредованная телеоперация

Сетевые нарушения, такие как задержка связи и потеря пакетов, ставят под угрозу стабильность и прозрачность системы дистанционного управления, как обсуждалось выше. Однако вышеупомянутые схемы управления сохраняют стабильность системы, но жертвуют прозрачностью [196]. Поэтому был введен подход Model-Mediated Teleoperation (MMT) для достижения компромисса между стабильностью и прозрачностью при наличии изменяющейся во времени задержки связи и потери тактильных пакетов в сети связи, как показано на рис. 16. Схема MMT использует модель для подчиненного домена для оценки параметров среды, а затем отправляет эти параметры в локальную виртуальную модель для главного домена, а не отправляет принудительную обратную связь непосредственно в главный домен. Локальная виртуальная модель в главном домене обновляется в режиме реального времени при изменении подчиненной среды. Силовая обратная связь генерируется из локальной виртуальной модели и без задержки передается телеоператору в главном домене. Однако одновременное моделирование и определение структуры среды подчиненного домена, оценка в реальном времени и обновление параметров для локальной виртуальной модели является сложной задачей. Одним из сложных аспектов является разработка точной модели взаимодействия и оценки для высокодинамичной среды с задержкой связи.

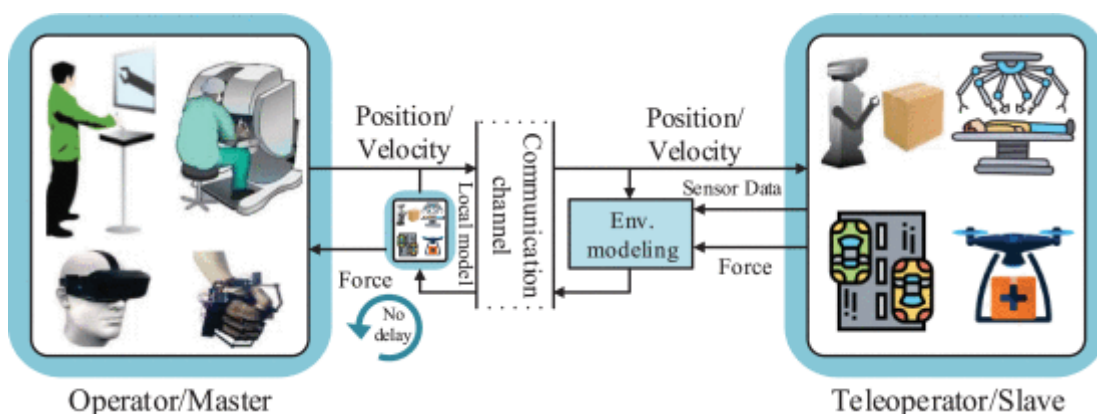


РИСУНОК 16. - Блок-схема построения схемы модель-посредник (обозначения определены в таблице 3).

Ранние исследования MMT [197], [198] были проанализированы ранее [199], включая рассмотрение потенциальных проблем и решений, а также изучение различных свойств подхода MMT. Тем не менее, они игнорировали критические тактильные аспекты для приложений в тактильном Интернете, а также не изучали обеспечение QoS и QoE для удовлетворения требований тактильного Интернета. Поэтому в данной статье обсуждается интеграция различных стратегий для улучшения QoS и QoE для тактильных интеллектуальных приложений для тактильного Интернета, в частности для систем телеуправления.

В [181] предложен проект телеоперации на основе модели для роботизированной телепальпации с учетом обратной связи по силе и ошибки отслеживания положения/скорости при произвольной задержке связи в высокодинамичной среде. Они использовали

самовозмущающийся рекурсивный алгоритм наименьших квадратов для оценки параметров окружающей среды в режиме онлайн и минимизации задержки связи с вязкоупругой моделью для характеристики взаимодействия мягких тканей. Результаты моделирования подтвердили, что предложенная схема улучшила восприятие для систем телеуправления с тактильной поддержкой и QoE с точки зрения стабильности и прозрачности по сравнению с базовым уровнем. Однако для постоянного значения задержки установлено значение 500 мс, а для переменного – в районе 400 – 600 мс.

В работе [182] предложена нелинейная ММТ для хирургических приложений, основанная на нелинейном методе логарифмической линеаризации предикторов Хант-Кроссли и рекурсивных методах наименьших квадратов. Авторы рассмотрели проблемы QoS, включая задержку связи и пропускную способность. двусторонние телеоперации с тактильной связью и т. д., уделяя особое внимание обеспечению гарантированной стабильности и прозрачности. Рекурсивный метод наименьших квадратов и линеаризация применялись для ведомой стороны для оценки параметров удаленной среды в режиме реального времени. Затем Хант-Кроссли был нанят на стороне мастера для предсказания силовой обратной связи. Показатели производительности подтвердили надежность предложенной схемы в высокодинамичной и сложной среде с изменяющимися во времени задержками.

В [183] авторы предложили схему управления для минимизации скачков модели на основе адаптивного регулятора импеданса и нового алгоритма обновления модели. На ведомой стороне развернут адаптивный контроллер импеданса для оценки параметров физической среды с возможностью корректировки его поведения без перехода состояния; а на главной стороне использовался локальный контроллер принудительного обновления для обновления жесткости. Авторы сосредоточились на обновлении на основе силы, а не на основе параметров, и предложенные схемы на основе силы были направлены на обеспечение обратной связи по силе от ведущего устройства без задержки. Предложенная схема была проверена экспериментально с помощью тактильного устройства Geomagis Touch с 1 степенью свободы и постоянной задержкой 5 с. Их результаты подтвердили, что предложенный метод может справляться с силовыми помехами и улучшать QoE системы.

Аналогичным образом, в исследовании [184] была предложена схема управления на основе модели, которая разделяла ведущий и подчиненный во время переходов между состояниями, чтобы обеспечить стабильность системы и высокую прозрачность. Авторы преодолели эффект скачка модели, вызывающий период рассогласования, т. е. интервал, когда локальная модель на стороне мастера не информируется о новых параметрах среды. Следовательно, локальная модель может генерировать неправильную силовую обратную связь и в конечном итоге дестабилизировать всю систему телеуправления. Они также полностью разделяли главный и подчиненный серверы при столкновении с новой средой. Моделирование жестких и мягких сред подтвердило, что предложенный подход повышает стабильность и прозрачность системы при наличии больших задержек. Они считали задержку одностороннего канала связи эквивалентной 1 с.

Авторы в [51] предложили конструкцию ММТ, включающую обучение с подкреплением (RL) без использования моделей и примитивы динамического движения для захвата и манипулирования



с помощью тактильной системы экзоскелета рука-рука. Прimitives динамического движения оценивают изменения модели ведомой площадки и информируют систему о необходимости корректировки неопределенностей модели. Наконец, они предложили алгоритм «актор-критик», основанный на RL, без моделей, чтобы исследовать возможное решение. Результаты моделирования подтвердили, что предлагаемая структура улучшилась и работает и может адаптироваться к новой среде при различных задержках связи с высокой степенью неопределенности среды и модели.

**Резюме и выводы.** Двухнаправленные системы телеуправления с поддержкой Haptic очень чувствительны к задержкам, вызывая дрожание и потерю пакетов в сети связи, в конечном итоге десинхронизируя поток тактильных данных между главным и подчиненным доменами и, следовательно, создавая проблемы с ошибками отслеживания, нестабильностью и низкой прозрачностью. В этом разделе были рассмотрены возможные решения, предложенные в недавних исследованиях для решения этих проблем, как показано в Таблице 8. Оптимальный дизайн управления может компенсировать задержку E2E и обеспечить QoE для услуг тактильного Интернета.

### С. Гибридные подходы

В этом разделе обсуждаются совместные тактильные кодеки и схемы управления для обеспечения стабильности и прозрачности с акцентом на улучшение качества обслуживания и максимальное увеличение качества обслуживания. В таблице 9 сравниваются существующие методы интеграции тактильных кодеков и методы управления, обеспечивающие стабильность.

**ТАБЛИЦА 9 Гибридные подходы (сокращения определены в таблице 2)**

Reference	Haptic Codec	Control Scheme				Improved QoS/QoE factor(s)	QoE Evaluation		Major Contribution
		WVA	TDPA	MMT	ISS		Objective	Subjective	
Xu <i>et al.</i> [200]	PDb	×	×	✓	×	delay, PLR	✓	×	Propose a point cloud model to estimate the environment properties (Physical geometry) to enable a stable teleoperations.
Xu <i>et al.</i> [201]	PDb	×	✓	✓	×	delay, PLR	✓	✓	Present an adaptive switching strategy to explore optimal hybrid scheme.
Xu <i>et al.</i> [202]	PDb	×	×	×	✓	delay, PLR	✓	✓	Introduce a controller based on combining ISS and PDb to maximizing QoS and user's QoE.
Xu <i>et al.</i> [203]	PDb	×	✓	×	×	delay, PLR	✓	✓	Propose a joint solution using power-based TDPA and PDb approach to improve stability of the teleoperation under timely varying QoS.
Dena <i>et al.</i> [204]	PDb + ML	×	×	✓	×	delay, MSE	✓	×	Introduce a MMT approach utilizing gradient boosting decision tree algorithm to provide the feedback signals without delay.
Sun <i>et al.</i> [205]	-	✓	✓	×	×	delay	✓	×	Present a wave-based TDPA considering prescribed performance control algorithm to guarantee passivity of the communication network.

В [200] предложена основанная на восприятии схема телеопераций на основе облака точек (rcbMMT), использующая трехмерные датчики для сбора облаков точек для объекта в удаленной среде с последующей оценкой параметров среды в режиме реального времени. Предложенная стратегия rcbMMT обеспечила стабильность и прозрачность телеопераций для динамичных и сложных сред с низкой тактильной скоростью передачи пакетов и задержанными каналами связи. rcbMMT использовал подход PDb для сокращения передаваемых данных до 90% с гарантированным QoE для телеуправления, обеспечивая при этом стабильность и прозрачность с задержкой связи примерно до 1000 мс.

Стратегии переключения могут помочь в изучении оптимальных схем гибридного управления для систем дистанционного управления с различными диапазонами задержек [201]. Авторы

предложили подход динамического переключения для использования схем управления TDPA+PDb и MMT+PDb для улучшения QoE человека-оператора при различных задержках связи. Предложенная схема адаптивного переключения учитывала трехмерный компромисс между QoE, задержкой и методами управления, а также экспериментально подтверждала предложенный метод. Коммерческое тактильное устройство (Phantom Omni) использовалось в качестве ведущего и создавало виртуальную среду для ведомого устройства с использованием библиотеки Chai3D. Их результаты подтвердили эффективность предложенного метода с точки зрения задержки и PLR.

Включение неpassивного I Метод nput-to-State Stability (ISS) и сокращение тактильных данных PDb обеспечили наилучшее качество обслуживания и качество обслуживания для тактильных сервисов [202]. Предложенный гибридный подход позволил одновременно снизить скорость передачи пакетов и свести к минимуму эффекты постоянной задержки связи. Авторы экспериментально оценили эффективность предложенной схемы: основное внимание уделялось проверке воздействия подхода PDb; и сравнение QoE для подходов ISS+PDb и TDPA+PDb.

Чтобы найти подходящее решение для дрейфа позиции при одновременном улучшении QoE при различной ненадежности сети, такой как задержка, джиттер, потеря пакетов, [203] рассмотрели данные о перекрестном трафике, проблемы стабильности и прозрачности. Они предложили гибридное решение, объединяющее TDPA на основе отражения энергии [206] и PDb для компромисса между скоростью тактильных пакетов и качеством телеопераций. Их предложенный подход PDb с запуском по времени с TDPA на основе энергии резко снизил скорость передачи пакетов с 1000 до 100 пакетов в секунду с задержкой 150 мс. Результаты моделирования для предложенной схемы позволили достичь высокой степени сжатия и QoE при сохранении стабильности и прозрачности системы с минимальной задержкой, дрожанием и PLR.

Авторы [204] исследуют потенциальное использование ML с системами MMT для прогнозирования задержанных сигналов обратной связи в главный домен и последующего улучшения качества обслуживания. Они использовали алгоритм дерева решений с повышением градиента для построения моделей прогнозирования движения и силовой обратной связи. Модель обучалась на исходных данных положения/скорости и силовой обратной связи. Система MMT, основанная на дереве решений с градиентным усилением, нацелена на максимальную прозрачность восприятия при низкой тактильной скорости передачи пакетов. Предложенную модель сравнивали с MMT на основе Ханта-Кроссли с точки зрения предсказания силовой обратной связи.

В [205] предложено TDPA на основе волн для преодоления неопределенностей параметров модели или окружающей среды с использованием WVA и, следовательно, улучшения характеристик отслеживания силы и ошибки позиционирования, называемое TDPA на основе волн. Они представили расширенный предписанный алгоритм управления производительностью для улучшения характеристик синхронизации положения/скорости и силы для ведущего и ведомого. Предлагаемый волновой TDPA призван обеспечить пассивность сети связи при наличии переменных временных задержек.

Резюме и выводы. В этом разделе были рассмотрены решения по разработке гибридного управления для достижения QoE в телеоперациях с использованием модели управления и схем тактильных кодеков для улучшения качества обслуживания для интеллектуальных приложений Tactile Internet. В большинстве текущих исследований использовалась схема кодека PDb с дизайном управления на основе пассивности и непассивности для поддержания QoS и QoE для потока тактильных данных в телеоперациях. Таким образом, TDPA и MMT в основном использовались со схемами кодеков и оказывали влияние на существующее решение управления.

#### D. Методы интеллектуального прогнозирования

В предыдущих разделах были рассмотрены и обсуждены схемы кодеков и конструкции систем управления для уменьшения размера пакетов и скорости передачи пакетов при одновременном улучшении QoE при произвольном сетевом QoS. В этом разделе анализируется, как модели на основе ML обучаются на тактильных данных и развертываются на ведущей или подчиненной стороне для прогнозирования отсутствующих сигналов и компенсации задержек связи. Мы обсуждаем решения для интеллектуального прогнозирования для преодоления задержек обработки и распространения в сети связи, в том числе решения для прогнозирования на основе ИИ для преодоления ограничений скорости света. Подходы интеллектуального прогнозирования можно использовать с любой из ранее определенных схем управления. Как мы обсуждали в предыдущих разделах, тактильный трафик как локальной, так и удаленной сторон организуется в режиме реального времени, и с небольшой задержкой удаленные операции выполняются неэффективно из-за задержек с важной обратной связью. Таким образом, модель на основе прогнозирования, интегрированная со схемами управления, помогает обеспечить стабильность, надежность и высокую точность во время тактильного взаимодействия при прогнозировании отсутствующих/задержанных сигналов. Решения на основе машинного обучения для тактильного Интернета в последнее время привлекли значительное внимание исследователей. В [207] предложены основанные на машинном обучении алгоритмы для интеллектуального распределения пропускной способности для повышения показателей задержки, [208] предложен объединенный алгоритм на основе RL для распределения ресурсов для минимизации задержки в сети, а [209], [210] предложены методы прогнозирования для адресации передачи. задержка во время тактильной коммуникации.

В исследовании [223] были рассмотрены пограничные кэширующие и вычислительные решения с поддержкой ИИ для обеспечения требований QoE и QoE для критически важных интеллектуальных приложений в системах связи 5G. Они сравнили существующие алгоритмы глубокого обучения, глубокого RL и федеративного RL для кэширования и вычислений. Авторы в [224] обсудили схемы восприятия, конструкции управления, роботизированные методы обучения и методы ИИ для обеспечения сложных удаленных телеопераций. Однако эти исследования игнорировали тактильные аспекты интеллектуальных приложений. Поэтому мы обсуждаем эти проблемы, рассматривая тактильные аспекты с возможными решениями. В таблице 10 существующие предлагаемые решения классифицируются по основным, подчиненным и алгоритмам прогнозирования на стороне сети. Тактильный трафик включает в себя два типа параметров тактильного взаимодействия: положение/скорость сила.

Алгоритмы на стороне мастера прогнозируют положение/скорость для определения движения оператора и повышения прозрачности системы. Однако это несколько сложнее, чем

прогнозирование параметров подчиненной среды, поскольку действия человека для некоторых приложений непредсказуемы.

Алгоритмы ведомой стороны предсказывают сигналы обратной связи телеоператора и предоставляют их оператору для компенсации задержанных сигналов.

Алгоритмы на стороне сети заранее предсказывают сбои в сети, а затем регулируют параметры QoS в зависимости от типа телеоперации с тактильной поддержкой. На рис. 7 обобщены недавние исследования на стороне сети, дополнительные подробности доступны в [207], [208], [223], а в таблице 10 приведены алгоритмы прогнозирования на стороне ведущего и подчиненного устройств.

ТАБЛИЦА 10 Методы интеллектуального прогнозирования (сокращения определены в таблице 2)

	Reference	ML Methods	Improved QoS/QoE factor(s)	Application	Major Contribution
Master Side	Yazdankhoo <i>et al.</i> [211]	ANN	delay, MSE	Haptic teleoperation	Propose a predictive model to estimate the motion of the operator at master side to compensate the delayed network effects on teleoperation.
	Nikpour <i>et al.</i> [212]	ANN	delay, MSE	Haptic teleoperation	Present an adaptive online prediction algorithm to predict the master side position/velocity and time delay to the network to ensure the high level of transparency of the teleoperation systems
	Moon <i>et al.</i> [213]	Recurrent NN	MSE	Human guide	Introduce a human trajectory prediction algorithm and deployed on haptic-enabled robot to guide the visually impaired peoples.
	Yap <i>et al.</i> [214]	-	delay, PLR	Haptic teleoperation	Present a network-adaptive algorithm to reduce the desynchronization between master and slave position data to compensate delay and packet loss effect.
	Cheng <i>et al.</i> [215]	ANN	delay, MSE	Beating-heart surgery	Propose a control model integrating with NN-based model to predict beating heart motion and deliver the non-oscillatory force feedback.
Slave Side	Mondal <i>et al.</i> [216]–[218]	ANN, RL	delay	VR teleoperation	Propose a two-phase AI-enabled H2M server which utilized ANN and RL to forecast delayed haptic feedback signals with a focus to alleviating the master-slave distance limitation.
	Rasouli <i>et al.</i> [74], [219]	WKNN	delay, MSE	Phobia treatment	Propose an edge tactile learner based on weighted K-nearest neighbors to achieve the requirement of the specific tactile application, a tele-VR phobia treatment.
	Pérez-del-Pulgar <i>et al.</i> [220], [221]	GMM/GMR	MSE	Haptic teleoperation	Introduce a GMM-based predictive model that utilized GMR to reproduce the haptic feedback profiles to support tele-robotic operator guidance.
	Boabang <i>et al.</i> [222]	HMM/GMR	delay, PLR	Needle insertion	Present an HMM/GMR-based model to predicting force feedback for needle insertion during tele-surgery application.

В работе [211] был предложен прогностический метод прогнозирования движения человека с целью максимизации QoE для систем телеуправления с использованием ИНС для оценки положения руки человека в режиме реального времени. Предложенный ими алгоритм на основе ИНС предсказал не только движение человека, но и неопределенность в модели предсказания. Алгоритм собирал исходные данные для обучения модели, а затем предсказывал движения рук оператора. Предлагаемый подход не требует информации о намерениях человека перед обучением модели, а показатели производительности подтвердили, что предложенный метод может без задержки предсказывать движения руки как обученного, так и нетренированного человека, обеспечивая высокую прозрачность.

Как и в [211], авторы в [212] предложили адаптивную модель онлайн-прогнозирования на основе ИНС для прогнозирования движения на стороне хозяина и, следовательно, минимизации сетевых ухудшений (неизвестная и переменная задержка) и обеспечения требований QoE для телеопераций с тактильной поддержкой. В отличие от [211], предложенная прогностическая модель учитывала как перемещение оператора, так и сетевую задержку для повышения

прозрачности системы. Авторы использовали ИНС с тремя слоями нейронов: первый слой принимает положение на стороне мастера и оценивает входные данные временной задержки; тогда как второй уровень аппроксимирует вывод, а последний уровень предсказывает будущее движение оператора. Предложенный алгоритм был оценен моделированием и экспериментально. Показатели производительности подтвердили, что представленный алгоритм эффективно предсказал позиции и задержку на стороне мастера.

В [213] предложен алгоритм прогнозирования траектории движения человека, который помогает людям в зонах стихийных бедствий и помогает людям с нарушениями зрения избежать серьезных аварий. Они использовали тактильного робота для взаимодействия с людьми и взаимодействия человека с роботом для реализации моделей поведения и сбора мультимодальных тактильных данных для человеческих траекторий. Тактильный робот состоял из тактильного устройства (Omega 7) и камеры для сбора информации о глубине для взаимодействия с человеком. Они использовали рекуррентные нейронные сети с двухуровневым рекуррентным блоком для прогнозирования будущей траектории человека без визуальных сигналов. Экспериментальные результаты подтвердили, что предложенный алгоритм улучшил взаимодействие человека и робота, чтобы направлять людей и повышать социальный интеллект.

В работе [214] предложен алгоритм прогнозирования позиционных данных для синхронизации позиций между двумя тактильными одноранговыми узлами телеуправления при различных нарушениях в сети, включая задержку, дрожание и потерю пакетов. Они предложили адаптивное к сети прогнозирование стратегии доверия (TSP) для прогнозирования тактильных данных в режиме реального времени и, следовательно, минимизации десинхронизации потока тактильных данных и улучшения QoE оператора. Эффективность предложенного алгоритма TSP была измерена экспериментально для ведущей и подчиненной сред с различной задержкой, дрожанием и потерей пакетов. Они сравнили TSP при постоянной и переменной задержке = 0–200 мс и потере пакетов = 10%–40%, убедившись, что предлагаемый TSP превосходит базовый уровень с точки зрения задержки и PLR. В [225] была предложена интеллектуальная коммуникационная структура для учета влияния ошибок предсказания на надежность тактильных интернет-сервисов. Предлагаемая структура состоит из двух основных частей: алгоритма прогнозирования и алгоритма принятия решений. Первый оценивает состояние сети и поведение оператора/телеоператора, а второй использует выходные данные первого блока, чтобы максимизировать вознаграждение и принять возможное наилучшее решение.

В работе [215] обсуждалась система двусторонней телеоперации с тактильной поддержкой для хирургии работающего сердца, требующая задержки в миллисекундах с  $PLR \approx 10-7$ , с акцентом на комбинирование модели прогнозирования движения сердца на основе ИНС с конструкцией управления импедансом для компенсации задержки положения сердца и доказательство обратной связи по силе без осциллятора. На рис. 17 показаны подход к управлению импедансом и модели прогнозирования движения сердца на основе ультразвукового изображения для главного и подчиненного роботов соответственно. Предлагаемая система телеуправления включала человека-оператора, бьющееся сердце, главного и подчиненного роботов. Человек-оператор использовал главного робота для взаимодействия и управления подчиненным роботом для телехирургии. Модель ANN использовалась для предсказания биений и движения сердца с использованием ультразвуковых изображений и развертывания его на ведомом роботе, чтобы компенсировать временную задержку и синхронизировать движение сердца и

ведомого робота. Модель управления импедансом на ведущей стороне обеспечивала неколебательную обратную связь по усилию с человеком-оператором. Предложенная система была оценена экспериментально и сравнена с двумя базовыми моделями.

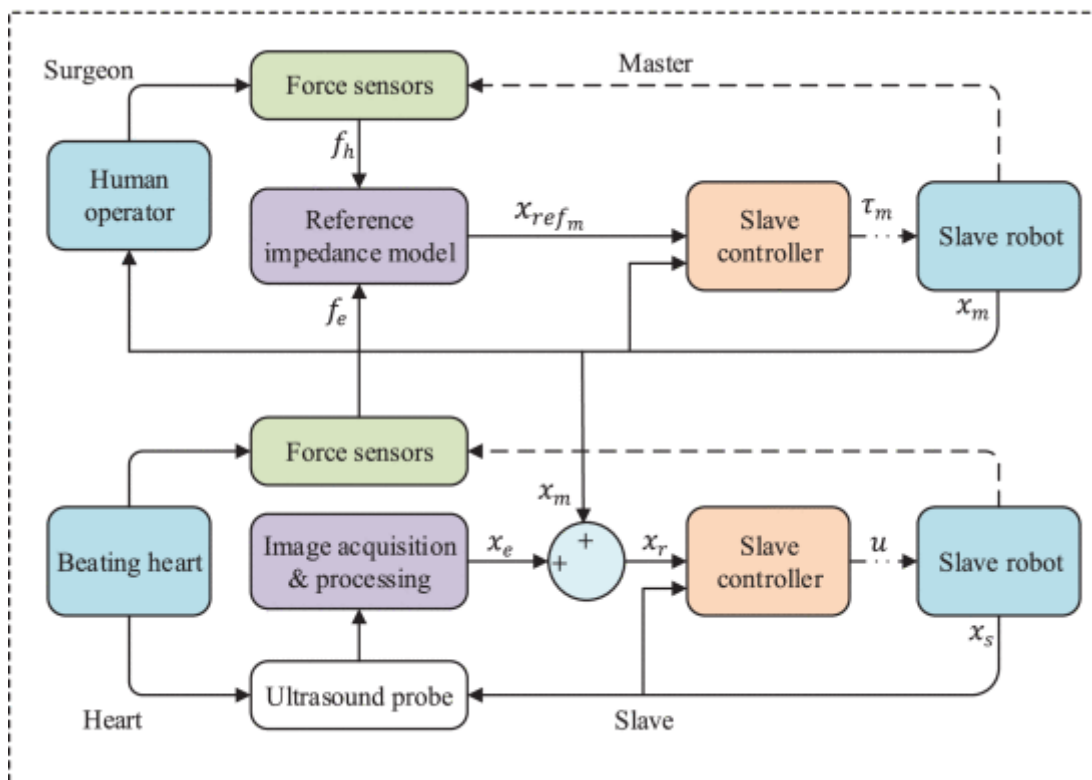


РИСУНОК 17. - Телероботизированная система хирургии работающего сердца. (взято из [215], обозначения определены в табл. 3).

В исследовании [216], [217] недавно был предложен подход с поддержкой ИИ для смягчения ограничений расстояния ведущий-ведомый. Авторы расширили [216], [217] HAptic Feedback SAmples Forecast (EHASAF) на основе событий, чтобы преодолеть задержку распространения E2E [218]. Структура EHASAF включает модуль ANN и RL. ИНС классифицирует управляющие сигналы и принимает решения, когда требуется тактильная обратная связь. Блок RL обеспечивает доставку надлежащих сигналов тактильной обратной связи в главный домен. Авторы развернули H2M-сервер со встроенным ИИ между ведущим и ведомым, чтобы прогнозировать отложенную тактильную обратную связь и доставлять ее непосредственно оператору. Для изучения предлагаемого EHASAF была разработана система телеуправления на основе виртуальной реальности, а данные тактильной обратной связи были собраны для дальнейшего численного анализа. Они рассмотрели три случая, чтобы зафиксировать схемы трафика управления и обратной связи: захват виртуальных шаров, кубов и/или круглых кубов. Собранные контрольные данные и сигналы обратной связи использовались для обучения параметров распределения для исследования эффектов задержки E2E. Платформа EHASAF была оценена на основе инфраструктуры транспортной сети на основе пассивной оптической сети с временным мультиплексированием, и EHASAF преодолел задержку поступления пакетов, одновременно упрощая приложения H2M.

В [74] авторы предложили основанную на тумане основу для тактильного интернет-приложения, названную удаленной терапией фобии. Предложенная архитектура на основе тумана позволила

терапевту показать объекты, которых пациент боится, включая пауков, змей, тараканов, скорпионов и мышей, чтобы вылечить их фобию через общую виртуальную среду. Виртуальная среда использовалась для взаимодействия друг с другом и обмена тактильной коммуникацией. Однако они не учитывали требования к задержке задержки E2E (50 мс) для тактильных приложений для телетерапевтического лечения. Кроме того, не учитывались такие проблемы QoS, как потеря пакетов и задержка, которые ухудшали бы QoE как терапевта, так и пациента.

Ссылка [219] расширена [74], чтобы предложить облачную прогностическую схему для лечения теле-VR-фобии с помощью тактильных технологий. Предлагаемый Edge Tactile Learner (ETL) был направлен на обеспечение требований QoS и QoE между терапевтом и пациентом для тактильных манипуляций. Предлагаемая структура включала три компонента: терапевт, облачная сеть и пациент. Терапевт и пациент взаимодействовали друг с другом через облачную сетевую инфраструктуру 5G, обмениваясь двунаправленной тактильной информацией в дополнение к традиционному трафику. Согласно предложенной схеме, терапевт сначала прикасается к объекту фобии в своей зоне, и соответствующая обратная связь передается как терапевту, так и пациенту. Если обратная связь не была получена в течение определенного времени ожидания, предложенный ETL предсказывал обратную связь и доставлял ее пациенту с тайм-аутом. Авторы использовали взвешенные K-ближайшие соседи (WKNN) для обучения ETL и прогнозирования обратной связи для выбранного объекта фобии. Результаты производительности подтвердили предсказание предложенного ETL и предоставили пациенту обратную связь с заданным порогом задержки = 50 мс.

В работе [220] была предложена прогностическая модель, использующая концепцию «Обучение на основе демонстрации» (LfD) для проведения эксперимента по вставке штифта в отверстие с помощью телеробота. Авторы использовали гауссову смешанную модель (GMM) для кодирования профиля силы/крутящего момента, а затем использовали гауссовскую смешанную регрессию (GMR) для получения профилей тактильной обратной связи в режиме онлайн. Модель GMM/GMR показала хорошую точность для ограниченного применения, но ее нельзя использовать для введения иглы во время телехирургии. Они также не считали, что прогнозируемые образцы тактильной обратной связи должны достигать главного оператора до создания следующей обратной связи на ведомой стороне. Расширенная версия этого подхода использовала GMM, чтобы тактильно направлять оператора для телеманипуляций [221].

Впоследствии [222] применили Скрытую Марковскую Модель (HMM), а не GMM, чтобы подогнать профиль силы/крутящего момента вместе с другими параметрами, и, следовательно, предложили модель, основанную на HMM/GMR. Модель GMR предсказывает тактильную обратную связь и передает ее хирургу во время телехирургии, чтобы заменить потерянную или задержанную обратную связь. Модель HMM/GMR с учетом жесткого ограничения задержки и точности предсказания. Они использовали общедоступный набор данных о взаимодействии игл для анализа моделирования [230]. Набор данных включает 39 значений силы введения иглы, зарегистрированных во время введения и втягивания иглы в печень. Авторы показали, что предложенная модель может предсказывать отсутствие или задержку силы. сигналы обратной связи за более короткое время, чем модель на основе GMM/GMR.



Резюме и идеи: В этом подразделе обсуждались методы интеллектуального прогнозирования, и они были обобщены в Таблице 10. Чтобы преодолеть проблемы, связанные с потерей/задержкой сигналов управления и/или сигналов обратной связи во время удаленного управления между ведущим и ведомым по каналу связи, существующие решения были разделены на три категории. классы: ведущий, сетевой и подчиненный. На рис. 7 показаны исследования с ключевым вкладом на стороне сети, а в таблице 10 показаны остальные системы. Таким образом, хотя стратегии прогнозирования с помощью ИИ могут помочь улучшить расстояние между ведущими и подчиненными и ограничения обработки, прогнозирование положения/скорости человека-оператора на стороне ведущего является более сложной задачей, чем прогнозирование сигналов тактильной обратной связи. Значительные исследования были сосредоточены в этом направлении, чтобы удовлетворить требования тактильных интернет-сервисов.

#### РАЗДЕЛ V. Задачи открытых исследований и будущие направления

В этом разделе представлены открытые исследовательские задачи и потенциальные будущие направления исследований для реализации строгих требований тактильного Интернета. Несмотря на значительную существующую литературу по рассмотренным схемам, включая тактильные кодеки, схемы управления и интеллектуальные схемы прогнозирования, некоторые аспекты этих схем все еще сталкиваются с проблемами. Как обсуждалось в разделе IV-A, большинство существующих исследований были сосредоточены на кинестетических характеристиках тактильных данных, а тактильным аспектам посвящено мало работ. Точно так же тактильные двусторонние системы управления остаются открытым вопросом и требуют дальнейшего изучения для определения различных возможных компромиссных решений для энергии-задержки, задержки-синхронизации и стабильности-прозрачности. Положения QoS и QoE для тактильных и других чувствительных к задержке тактильных интернет-сервисов требуют оптимальных интеллектуальных кодеков, адаптивного прогнозирования и решений по проектированию управления для компенсации сетевых ухудшений. На рис. 18 обобщены открытые вопросы исследований и желаемые направления будущих исследований, которые обсуждаются следующим образом:

Механизм автоматической скорости передачи данных: проблемы тактильного кодека с несколькими точками взаимодействия в беспроводной сети с ограничениями по задержке не были должным образом изучены [22]. Усовершенствованные модели на основе машинного обучения могут предоставлять вибротактильные кодеки с низкой скоростью передачи данных при сохранении требуемого качества обслуживания и качества обслуживания [239]. В частности, следует изучить методы RL, чтобы настроить механизм скорости передачи пакетов для условий сети, чувствительных к скорости.

Межмодельный подход: схемы тактильного кодирования с малой задержкой предназначены для минимизации скорости передачи пакетов и улучшения качества обслуживания без ухудшения качества восприятия. Однако очень сложно работать с обоими аспектами (кинестетический/тактильный) тактильных ощущений одновременно, что требует изучения кросс-модальных подходов [240], [241].

Универсальные эталонные базы данных и стандартные метрики оценки. Большинство предлагаемых схем тактильного кодирования оценивались в общедоступных базах данных или собственных трассировках собранных данных с относительно простыми метриками HQA для измерения качества восстановленного сигнала и без стандартного испытательного стенда. Крайне важно определить стандартные HQA для измерения воспринимаемого качества сигнала и разработать испытательный стенд и стандартные базы данных для сложных сред, подобных [242]. В таблицах 5, 11 и 12 показаны существующие доступные HQA, базы данных и испытательные стенды, соответственно, в исследовательском сообществе, которые можно использовать для исследования и рекомендации разумных решений, включая академические круги и отрасли.

Общая модель управления: в текущих исследованиях тактильных телеопераций было предложено множество методов управления для обеспечения компромисса между стабильностью и прозрачностью. Однако большинство из них достигают приемлемой стабильности системы за счет снижения производительности с точки зрения прозрачности и точности отслеживания. Выбор подходящей схемы управления для тактильных систем телеуправления, чувствительных к задержкам, зависит от состояния сети (задержка, потеря пакетов); сложность или динамика среды (неопределенности модели) и понимание аспектов применения. Очень желательно, чтобы универсальная модель отражала указанные выше зависимости, что также поможет понять эффективность управления и выбрать правильный метод управления [243]. Общая модель производительности может настраивать сетевые параметры в соответствии с выбранным методом управления.

Интеллектуальная модель прогнозирования состояния. Одной из существенных проблем двусторонних систем дистанционного управления является синхронизация или ошибка производительности отслеживания при учете переменной временной задержки. Потенциальные решения требуют дальнейшей оценки и разработки, такие как схемы синхронизации состояний [244], модели волнового фильтра [245] и модели предсказания состояний с поддержкой ИИ [246].

Возможности онлайн-обучения в ММТ. Было предложено несколько подходов к ММТ для обеспечения стабильности и прозрачности системы управления. Однако у этого подхода есть несколько серьезных проблем, в том числе обновление параметров модели по мере того, как в удаленных средах происходят быстрые изменения, и устранение эффектов скачка модели. ММТ не может добиться хороших результатов в сложных и неизвестных средах из-за недостатков выхода в онлайн. модели оценки параметров. В настоящее время лучшие алгоритмы онлайн-оценки на основе ML включают [214], [247], а концепция цифровых двойников [248] может помочь оптимизировать схемы ММТ.

Стратегии адаптивного переключения. Было предложено множество гибридных подходов, объединяющих тактильные схемы сокращения и управления данными, для улучшения QoS и максимизации QoE при одновременном обеспечении стабильности системы. В немногих исследованиях, если таковые имеются, сообщалось о гибридных подходах, и они не были хорошо изучены. Кроме того, есть потенциально плодотворные будущие исследования по

разработке стратегий переключения для адаптации тактильных кодеков и схем управления в зависимости от деталей сети и динамики окружающей среды [201], [205], [249].

RL для точности прогнозирования: было предложено несколько моделей прогнозирования с помощью ИИ для прогнозирования тактильных данных, включая команды управления и тактильную обратную связь в режиме реального времени и компенсации потери пакетов. Однако основная проблема заключается в поддержании точности прогнозирования в телеоперациях по неизвестным каналам связи с изменяющейся во времени задержкой. Для повышения точности прогнозирования следует изучить онлайн-модели на основе RL [51], [218].

Пограничный интеллект для прогнозирования тактильного трафика: для поддержки тактильных интернет-сервисов было предложено несколько встроенных в ИИ парадигм вычислений тумана / края и облачных вычислений. Интеграция ИИ с пограничными парадигмами — это потенциальное решение для прогнозирования тактильного трафика в режиме реального времени. Однако эти модели требуют большого объема вычислений и памяти, поэтому существует острая необходимость в изучении облегченных интеллектуальных моделей, таких как федеративное обучение с учетом подходов [39], для пограничного интеллекта [250], [251].

Алгоритм устойчивости к ошибкам прогнозирования: хотя алгоритмы прогнозирования предназначены для компенсации задержки и потери пакетов, ошибки прогнозирования возникают из-за колебаний сети в реальном времени. Алгоритм устойчивости к ошибкам (ERA) является эффективным решением для компенсации ошибок прогнозирования при тактильной передаче трафика в телеоперациях при колебаниях сети. Обычный ERA для тактильной связи применяет методы линейного предсказания, такие как линейное предсказание нулевого порядка и линейное предсказание первого порядка. Ссылка [252] предложила использовать артефакты, которые возникают для подходов, основанных на восприятии. Тактильный трафик — это не просто линейные данные, поэтому по-прежнему сложно повысить производительность ERA и гарантировать, что алгоритмы будут делать наилучшие прогнозы для реализации тактильно-управляемых услуг. Сообщалось о нескольких соответствующих исследованиях [118], [253], поэтому это четкая область для будущих исследований.

Интеграция/объединение схем прогнозирования и управления. Также были предложены подходы на основе прогнозирования для сокращения коммуникационного трафика для систем управления с тактильной поддержкой. Интеграция основанной на прогнозировании тактильной (управление/обратная связь) модели сокращения трафика с конструкциями систем управления [254] потенциально может улучшить тактильную передачу данных в пределах ограниченной полосы пропускания без ухудшения QoE.

ТАБЛИЦА 11 Тактильные базы данных

Database	Type	Samples	Capturing tool	References
Penn haptic texture toolkit	Various	100	6-DoF custom handheld device	[226]
LMT haptic texture database	Surface material	184	Haptic stylus	[144], [227]
HapTex	Fabric	120	Custom device (TexRecorder)	[228]
-	Various	100	Force sensors phantom premium device	[229]
Needle insertion	Insertion and retraction forces	39	Trocar needle	[230]
-	Various	100	Tactile sensor	[231]
Technical university of munich database	Surface material	280	Custom device	[143]
Open access haptic database	various	18	Tactile skin sensor	[232]
Open access haptic database	Thermal sensing	69	Thermal sensor	[233]
Open access haptic database	Thermal sensing	69	Thermal sensor	[233]
Haptic texture database	Surface texture	43	Geomagic device with custom stylus tip	[234]
Universal haptic library	Surface texture	84	Subjective selection	[234]

ТАБЛИЦА 12 Испытательные стенды для тактильного Интернета

Testbed	Standard	Non-Standard	Major Contribution
NFV-Enabled 5G Tactile Internet platform [56]	×	✓	Present a NFV-enabled platform to support 5G Tactile Internet delay-sensitive applications.
TCPSbed [235]	×	✓	Introduce a platform of tactile CPSs employing ns-3 for network simulations.
Adjustable instrumented multisensory stimuli (AIMS) [236]	×	✓	Present a haptic testbed system to analysis and comparing the different cutaneous haptic cues.
Haptic system testbed [15]	×	✓	Propose a platform for haptic communication considering centralized interface to provide latency assistance.
Tactile Internet extensible testbed (TIXT) [237]	✓	×	Propose an extensible testbed for Tactile Internet communication following the lines of IEEE P1918.1 Tactile Internet reference architecture.
Otto-von-guericke university-haptic communication (OVGU-HC) [238]	✓	×	Present a data-driven experiment design for haptic-driven applications with a focus on communication flow.

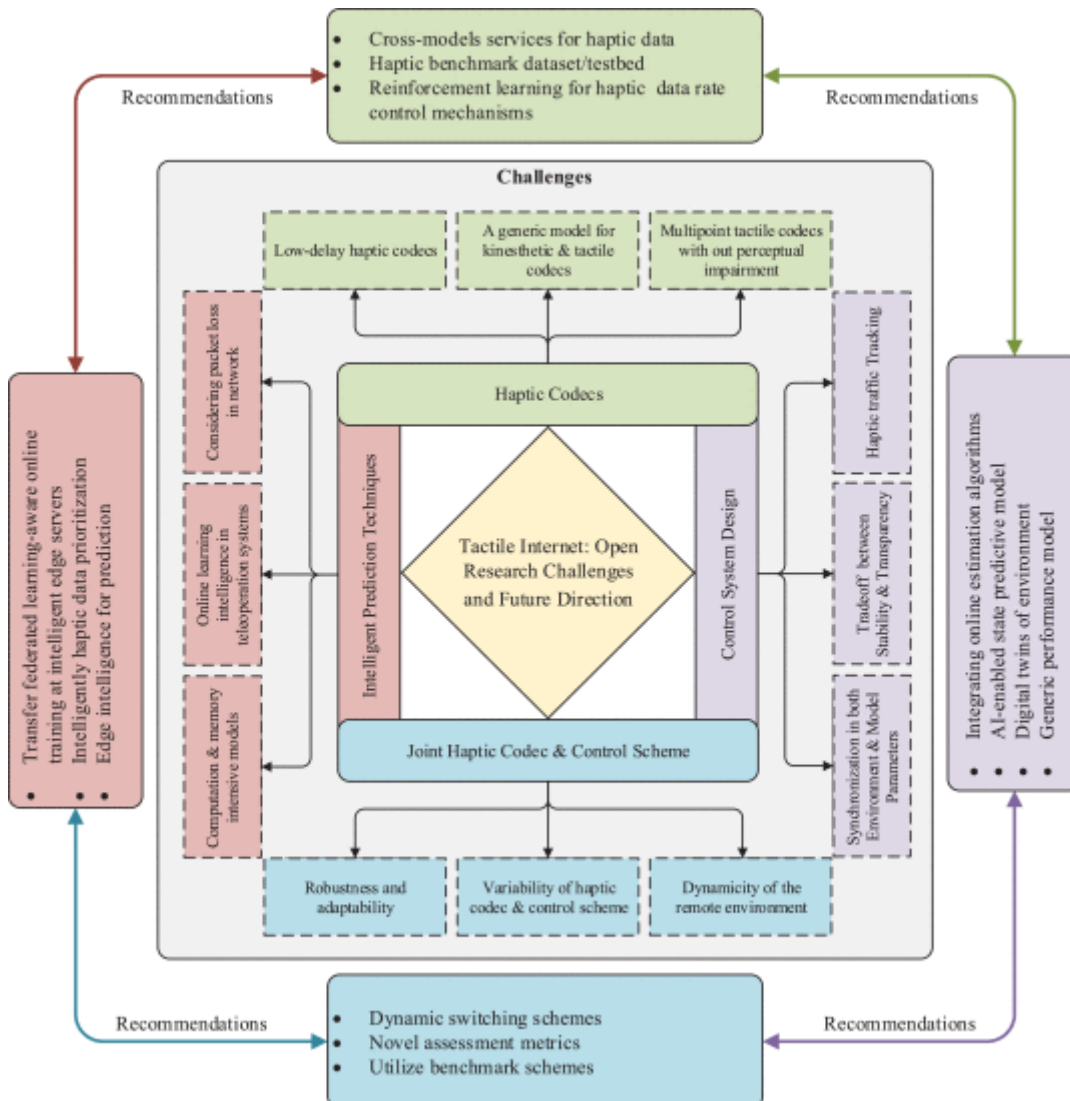


РИСУНОК 18. - Проблемы исследования и будущие направления.

## РАЗДЕЛ VI. Заключение

Тактильный Интернет — это важнейшая технология, обеспечивающая революции во всех сферах жизни. Он не только обеспечивает инновации в коммуникационных технологиях, но и улучшает пользовательский опыт при взаимодействии с объектом (физическим/виртуальным) в удаленных местах. Основные проблемы, в том числе сверхнизкая задержка, сверхвысокая надежность, высокая доступность и сверхбезопасность, должны быть решены для реализации услуг Tactile Internet. Однако строгие требования к QoS и QoE становятся все более важными для критически важных или чувствительных к задержкам приложений Tactile Internet. Эта область исследований все еще находится на начальной стадии. Поэтому мы рассмотрели методы предоставления QoS и QoE, включая тактильные кодеки, схемы тактильного управления, гибридные подходы и методы интеллектуального прогнозирования. Мы исследовали различные проблемы и обсудили сильные и слабые стороны различных возможных подходов к обеспечению требований Tactile Internet QoS и QoE для приложений. Мы разделили существующие решения на разные классы и провели сравнительный анализ, чтобы гарантировать стабильность и прозрачность системы при различной задержке и потере пакетов. Наконец, мы обобщили проблемы и представили идеи для каждого раздела в виде открытых исследовательских задач и потенциальных направлений будущих исследований.

## References

□

1.

J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, et al., "What will 5g be?", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

2.

M. Matthaiou, O. Yurduseven, H. Q. Ngo, D. Morales-Jimenez, S. L. Cotton and V. F. Fusco, "The road to 6G: Ten physical layer challenges for communications engineers", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 1, pp. 64-69, Jan. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

3.

W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi and H. D. Schotten, "The road towards 6G: A comprehensive survey", *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 334-366, 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

4.

L. Babun, K. Denney, Z. B. Celik, P. McDaniel and A. S. Uluagac, "A survey on IoT platforms: Communication security and privacy perspectives", *Comput. Netw.*, vol. 192, Jun. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**5.**

G. P. Fettweis, "The tactile internet: Applications and challenges", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, Mar. 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**6.**

G. Fettweis, H. Boche, T. Wiegand, E. Zielinski, H. Schotten, P. Merz, et al., "The tactile internet-ITU-T technology watch report", 2014.

Show in Context [Google Scholar](#)

**7.**

Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies, 2018.

Show in Context [Google Scholar](#)

**8.**

B. Devlin, L. Borg, J. F. Snow, D. Schnuelle, S. Llamb, J. Watts, et al., "Reports from the SMPTE technology committees", *SMPTE Motion Imag. J.*, vol. 127, no. 8, pp. 16-28, 2018.

Show in Context [Google Scholar](#)

**9.**

ETSI IP6 Industrial Specification Group (ISG), 2022.

Show in Context [Google Scholar](#)



**10.**

O. Holland, E. Steinbach, R. V. Prasad, Q. Liu, Z. Dawy, A. Aijaz, et al., "The IEEE 1918.1 'tactile internet' standards working group and its standards", *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 256-279, Feb. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**11.**

Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s), 2017.

Show in Context [Google Scholar](#)



**12.**

M. Maier, M. Chowdhury, B. P. Rimal and D. P. Van, "The tactile internet: Vision recent progress and open challenges", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 138-145, May 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**13.**

A. Aijaz, M. Dohler, A. H. Aghvami, V. Friderikos and M. Frodigh, "Realizing the tactile internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 2, pp. 82-89, Oct. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**14.**

Z. S. Bojkovic, B. M. Bakmaz and M. R. Bakmaz, "Vision and enabling technologies of tactile internet realization", *Proc. 13th Int. Conf. Adv. Technol. Syst. Services Telecommun. (TELSIKS)*, pp. 113-118, Oct. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**15.**

D. Van Den Berg, R. Glans, D. De Koning, F. A. Kuipers, J. Lugtenburg, K. Polachan, et al., "Challenges in haptic communications over the tactile internet", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23502-23518, 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**16.**

K. Antonakoglou, X. Xu, E. Steinbach, T. Mahmoodi and M. Dohler, "Toward haptic communications over the 5G tactile internet", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3034-3059, 4th Quart. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**17.**

A. Aijaz and M. Sooriyabandara, "The tactile internet for industries: A review", *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 414-435, Nov. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**18.**

A. A. Ateya, M. Khayyat, A. Muthanna and A. Koucheryavy, "Toward tactile internet", *Proc. 11th Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT)*, pp. 1-7, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**19.**

S. Aggarwal and N. Kumar, "Fog computing for 5G-enabled tactile internet: Research issues challenges and future research directions", *Mobile Netw. Appl.*, vol. 24, pp. 1-28, Nov. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**20.**



R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi and N. Kumar, "Tactile internet and its applications in 5G era: A comprehensive review", *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 32, no. 14, Sep. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**21.**

H. Yu, M. K. Afzal, Y. B. Zikria, A. Rachedi and F. H. P. Fitzek, "Tactile internet: Technologies test platforms trials and applications", *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 106, pp. 685-688, May 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**22.**

S. K. Sharma, I. Woungang, A. Anpalagan and S. Chatzinotas, "Toward tactile internet in beyond 5G era: Recent advances current issues and future directions", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56948-56991, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**23.**

C. She, C. Sun, Z. Gu, Y. Li, C. Yang, H. V. Poor, et al., "A tutorial on ultrareliable and low-latency communications in 6G: Integrating domain knowledge into deep learning", *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 3, pp. 204-246, Mar. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**24.**

N. Promwongsa, A. Ebrahimzadeh, D. Naboulsi, S. Kianpisheh, F. Belqasmi, R. Glitho, et al., "A comprehensive survey of the tactile internet: State of the art and research directions", *arXiv:2009.12164*, 2020.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**25.**

M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs and G. Fettweis, "5G-enabled tactile internet", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 3, pp. 460-473, Feb. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**26.**

A. Aijaz, "Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications", *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, pp. 145-150, Apr. 2016.

Show in Context [Google Scholar](#)

**27.**

A. Hodaei and S. Babaie, "A survey on traffic management in software-defined networks: Challenges effective approaches and potential measures", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 118, no. 2, pp. 1-28, May 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**28.**

B. Yi, X. Wang, S. K. Das, K. Li and M. Huang, "A comprehensive survey of network function virtualization", *Comput. Netw.*, vol. 133, pp. 212-262, Mar. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**29.**

Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang and K. B. Letaief, "A survey on mobile edge computing: The communication perspective", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358, Dec. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**30.**

I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat and H. Dai, "A survey on low latency towards 5G: RAN core network and caching solutions", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3098-3130, 4th Quart. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**31.**

D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Verissimo and C. E. Rothenberg, "Software-defined networking: A comprehensive survey", *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**32.**

H. Adhami, M. Al Ja'afreh and A. El Saddik, "Can we deploy tactile internet applications over Wi-Fi 3G and WiMAX: A comparative study based on riverbed modeler", *Proc. IEEE Int. Symp. Haptic Audio Vis. Environ. Games (HAVE)*, pp. 1-6, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**33.**

D. Szabo, A. Gulyas, F. H. Fitzek and D. E. Lucani, "Towards the tactile internet: Decreasing communication latency with network coding and software defined networking", *Proc. Eur. Wireless 21st Eur. Wireless Conf.*, pp. 1-6, May 2015.

Show in Context [Google Scholar](#)



**34.**

E. Steinbach, S. Hirche, M. Ernst, F. Brandi, R. Chaudhari, J. Kammerl, et al., "Haptic communications", *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 4, pp. 937-956, Apr. 2012.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**35.**

A. Masaracchia, Y. Li, K. K. Nguyen, C. Yin, S. R. Khosravirad, D. B. D. Costa, et al., "UAV-enabled ultra-reliable low-latency communications for 6G: A comprehensive survey", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 137338-137352, 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**36.**

M. Sarac, M. Solazzi and A. Frisoli, "Design requirements of generic hand exoskeletons and survey of hand exoskeletons for rehabilitation assistive or haptic use", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 12, no. 4, pp. 400-413, Oct./Dec. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**37.**

A. Costes, F. Danieau, F. Argelaguet, P. Guillotel and A. Lecuyer, "Towards haptic images: A survey on touchscreen-based surface haptics", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 3, pp. 530-541, Jul. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**38.**

G. S. Giri, Y. Maddahi and K. Zareinia, "An application-based review of haptics technology", *Robotics*, vol. 10, no. 1, pp. 29, Feb. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**39.**

M. Mukherjee, M. Guo, J. Lloret and Q. Zhang, "Leveraging intelligent computation offloading with fog/edge computing for tactile internet: Advantages and limitations", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 5, pp. 322-329, Sep. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**40.**

S. Mehrdad, F. Liu, M. T. Pham, A. Lelevé and S. F. Atashzar, "Review of advanced medical telerobots", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 209, Dec. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**41.**

I. de la Torre Díez, S. G. Alonso, S. Hamrioui, M. López-Coronado and E. M. Cruz, "Systematic review about QoS and QoE in telemedicine and eHealth services and applications", *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 10, pp. 1-10, Oct. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**42.**

D. Sun, W. Li, X. Yao, H. Liu, J. Chai, K. Xie, et al., "Research on IoT architecture and application scheme for smart grid", *Proc. 9th Int. Conf. Comput. Eng. Netw.*, pp. 921-928, Feb. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**43.**

Y. Issaoui, A. Khiat, A. Bahnasse and H. Ouajji, "Toward smart logistics: Engineering insights and emerging trends", *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 1-28, 2020.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**44.**

Y. Liu, M. Peng, G. Shou, Y. Chen and S. Chen, "Toward edge intelligence: Multiaccess edge computing for 5G and Internet of Things", *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 8, pp. 6722-6747, Aug. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**45.**

Y. Song, F. R. Yu, L. Zhou, X. Yang and Z. He, "Applications of the Internet of Things (IoT) in smart logistics: A comprehensive survey", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 6, pp. 4250-4274, Oct. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**46.**

P. Parekh, S. Patel, N. Patel and M. Shah, "Systematic review and meta-analysis of augmented reality in medicine retail and games", *Vis. Comput. Ind. Biomed. Art*, vol. 3, no. 1, pp. 1-20, Dec. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**47.**

Y. A. Qadri, A. Nauman, Y. B. Zikria, A. V. Vasilakos and S. W. Kim, "The future of healthcare Internet of Things: A survey of emerging technologies", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 2, pp. 1121-1167, 2nd Quart. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**48.**

H.-N. Dai, M. Imran and N. Haider, "Blockchain-enabled internet of medical things to combat COVID-19", *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 52-57, Sep. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**49.**

S. Sedaghat and A. H. Jahangir, "RT-TelSurg: Real time telesurgery using SDN fog and cloud as infrastructures", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 52238-52251, 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**50.**

S. Handelzalts, G. Ballardini, C. Avraham, M. Pagano, M. Casadio and I. Nisky, "Integrating tactile feedback technologies into home-based telerehabilitation: Opportunities and challenges in light of COVID-19 pandemic", *Frontiers Neurorobotics*, vol. 15, pp. 4, Feb. 2021.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**51.**

H. Beik-Mohammadi, M. Kerzel, B. Pleintinger, T. Hulin, P. Reisich, A. Schmidt, et al., "Model mediated teleoperation with a hand-arm exoskeleton in long time delays using reinforcement learning", *Proc. 29th IEEE Int. Conf. Robot Hum. Interact. Commun. (RO-MAN)*, pp. 713-720, Aug. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**52.**

A. M. Borujeni, M. Fathy and N. Mozayani, "Developing and evaluating a real time and energy efficient architecture for an Internet of Health Things", *Proc. 4th Int. Conf. Smart City Internet Things Appl. (SCIOT)*, pp. 106-111, Sep. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**53.**

T. Yang, D. Xie, Z. Li and H. Zhu, "Recent advances in wearable tactile sensors: Materials sensing mechanisms and device performance", *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, vol. 115, pp. 1-37, May 2017.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**54.**

X. Jiang, R. Chen and H. Zhu, "Recent progress in wearable tactile sensors combined with algorithms based on machine learning and signal processing", *APL Mater.*, vol. 9, no. 3, Mar. 2021.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**55.**

C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward and D. Prattichizzo, "Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy review and perspectives", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 580-600, Oct./Dec. 2017.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**56.**

P.-V. Mekikis, K. Ramantas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, L. Sanabria-Russo, J. Serra, et al., "NFV-enabled experimental platform for 5G tactile

internet support in industrial environments", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 16, no. 3, pp. 1895-1903, May 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**57.**

Ó. Blanco-Novoa, T. M. Fernández-Caramés, P. Fraga-Lamas and M. A. Vilar-Montesinos, "A practical evaluation of commercial industrial augmented reality systems in an Industry 4.0 shipyard", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 8201-8218, 2018.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**58.**

W. P. Neumann, S. Winkelhaus, E. H. Grosse and C. H. Glock, "Industry 4.0 and the human factor —A systems framework and analysis methodology for successful development", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 233, Mar. 2021.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**59.**

P. Schulz, M. Matthe, H. Klessig, M. Simsek, G. Fettweis, J. Ansari, et al., "Latency critical IoT applications in 5G: Perspective on the design of radio interface and network architecture", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 70-78, Feb. 2017.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**60.**

B. Natesha and R. M. R. Guddeti, "Fog-based intelligent machine malfunction monitoring system for Industry 4.0", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 12, pp. 7923-7932, Feb. 2021.

[Google Scholar](#)

**61.**

Y. A. Shim, K. Park, S. Lee, J. Son, T. Woo and G. Lee, "FS-Pad: Video game interactions using force feedback gamepad", *Proc. 33rd Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 938-950, 2020.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**62.**

D. Wang, K. Ohnishi and W. Xu, "Multimodal haptic display for virtual reality: A survey", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 1, pp. 610-623, Jun. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**63.**

K. Murphy and M. Darrah, "Haptics-based apps for middle school students with visual impairments", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 8, no. 3, pp. 318-326, Jul. 2015.

[View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**64.**

G. Baud-Bovy and N. Balzarotti, "Using force-feedback devices in educational settings: A short review", *Proc. 1st ACM SIGCHI Int. Workshop Multimodal Interact. Educ.*, pp. 14-21, Nov. 2017.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**65.**

Y. Lin, X. Wang, F. Wu, X. Chen, C. Wang and G. Shen, "Development and validation of a surgical training simulator with haptic feedback for learning bone-sawing skill", *J. Biomed. Informat.*, vol. 48, pp. 122-129, Apr. 2014.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**66.**

C. G. Corrêa, F. L. S. Nunes, E. Ranzini, R. Nakamura and R. Tori, "Haptic interaction for needle insertion training in medical applications: The state-of-the-art", *Med. Eng. Phys.*, vol. 63, pp. 6-25, Jan. 2019.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**67.**

F. Laamarti, F. Arafsha, B. Hafidh and A. El Saddik, "Automated athlete haptic training system for soccer sprinting", *Proc. IEEE Conf. Multimedia Inf. Process. Retr. (MIPR)*, pp. 303-309, Mar. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**68.**

T. Everson, M. Joordens, H. Forbes and B. Horan, "Virtual reality and haptic cardiopulmonary resuscitation training approaches: A review", *IEEE Syst. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 1391-1399, Jan. 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**69.**

A. G. R. Ramírez, M. Nandayapa, O. O. V. Villegas and F. G. Luna, "Haptic augmentation towards a smart learning environment: The haptic lever design", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78467-78481, 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**70.**

C. Themelis and J.-A. Sime, "From video-conferencing to holoportation and haptics: How emerging technologies can enhance presence in online education?" in *Emerging Technologies and Pedagogies in the Curriculum*, Berlin, Germany:Springer, pp. 261-276, 2020.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**71.**



J. Ashby, I. Ndayishimiye, A. Muhumuza and S. Niyoyita, "Digital medical school: New paradigms for tomorrow's surgical education" in *Digital Surgery*, Cham, Switzerland:Springer, pp. 379-387, 2021.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**72.**

A. W. K. Yeung, A. Tosevska, E. Klager, F. Eibensteiner, D. Laxar, J. Stoyanov, et al., "Virtual and augmented reality applications in medicine: Analysis of the scientific literature", *J. Med. Internet Res.*, vol. 23, no. 2, Feb. 2021.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**73.**

K. B. Chen, M. E. Sesto, K. Ponto, J. Leonard, A. Mason, G. Vanderheiden, et al., "Use of virtual reality feedback for patients with chronic neck pain and kinesiophobia", *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 8, pp. 1240-1248, Oct. 2016.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**74.**

Y. Jebbar, F. Belqasmi, R. Glitho and O. Alfandi, "A fog-based architecture for remote phobia treatment", *Proc. IEEE Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci. (CloudCom)*, pp. 271-278, Dec. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**75.**

F. Hofmann, N. Franchi, G. Fettweis, A. H. Mahdi, N. Brahmi, B. Wegmann, et al., "5G NetMobil: Pathways towards tactile connected driving", *Proc. IEEE 2nd 5G World Forum (GWF)*, pp. 114-119, Sep. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**76.**

A. Benloucif, A.-T. Nguyen, C. Sentouh and J.-C. Popieul, "Cooperative trajectory planning for haptic shared control between driver and automation in highway driving", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 12, pp. 9846-9857, Dec. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**77.**

S. Tanwar, S. Tyagi, I. Budhiraja and N. Kumar, "Tactile internet for autonomous vehicles: Latency and reliability analysis", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 66-72, Aug. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**78.**

W. Li, L. Ding, H. Gao and M. Tavakoli, "Haptic tele-driving of wheeled mobile robots under nonideal wheel rolling kinematic control and communication time delay", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 50, no. 1, pp. 336-347, Aug. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**79.**

C. Grasso and G. Schembra, "Design of a UAV-based videosurveillance system with tactile internet constraints in a 5G ecosystem", *Proc. 4th IEEE Conf. Netw. Softwarization Workshops (NetSoft)*, pp. 449-455, Jun. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**80.**

R. Gupta, A. Shukla and S. Tanwar, "BATS: A blockchain and AI-empowered drone-assisted telesurgery system towards 6G", *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 2958-2967, Dec. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**81.**

X. Wei, Q. Duan and L. Zhou, "A QoE-driven tactile internet architecture for smart city", *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 1, pp. 130-136, Sep. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**82.**

T. M. Ho, T. D. Tran, T. T. Nguyen, S. M. A. Kazmi, L. B. Le, C. S. Hong, et al., "Next-generation wireless solutions for the smart factory smart vehicles the smart grid and smart cities", *arXiv:1907.10102*, 2019.

[Google Scholar](#)



**83.**

S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari and F. A. Almalki, "Survey on collaborative smart drones and Internet of Things for improving smartness of smart cities", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128125-128152, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**84.**

O. Madamori, E. Max-Onakpoya, G. D. Erhardt and C. E. Baker, "Enabling opportunistic low-cost smart cities by using tactical edge node placement", *arXiv:2103.09860*, 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**85.**

K. A. Awan, I. U. Din, A. Almogren and H. Almajed, "Agritrust—A trust management approach for smart agriculture in cloud-based internet of agriculture things", *Sensors*, vol. 20, no. 21, pp. 6174, Oct. 2020.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**86.**

A.-T. Braun, E. Colangelo and T. Steckel, "Farming in the era of Industrie 4.0", *Proc. CIRP*, vol. 72, pp. 979-984, Jan. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**87.**

E. C. Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, et al., "6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 42-50, Sep. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**88.**

K. Sheth, K. Patel, H. Shah, S. Tanwar, R. Gupta and N. Kumar, "A taxonomy of AI techniques for 6G communication networks", *Comput. Commun.*, vol. 161, pp. 279-303, Sep. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**89.**

M. Shahbazi, S. F. Atashzar and R. V. Patel, "A systematic review of multilateral teleoperation systems", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 11, no. 3, pp. 338-356, Jul. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**90.**

T. B. Sheridan, "Space teleoperation through time delay: Review and prognosis", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 9, no. 5, pp. 592-606, Oct. 1993.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**91.**

A. H. Sodhro, Z. Luo, A. K. Sangaiah and S. W. Baik, "Mobile edge computing based QoS optimization in medical healthcare applications", *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 45, pp. 308-318, Apr. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**92.**

A. Bhardwaj, S. Chaudhuri and O. Dabeer, "Design and analysis of predictive sampling of haptic signals", *ACM Trans. Appl. Perception*, vol. 11, no. 4, pp. 1-20, Dec. 2014.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**93.**

C. She, C. Yang and T. Q. S. Quek, "Cross-layer transmission design for tactile internet", *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Dec. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**94.**

C. She, C. Yang and T. Q. S. Quek, "Cross-layer optimization for ultra-reliable and low-latency radio access networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 127-141, Oct. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**95.**

P. J. Braun, S. Pandi, R.-S. Schmoll and F. H. P. Fitzek, "On the study and deployment of mobile edge cloud for tactile internet using a 5G gaming application", *Proc. 14th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, pp. 154-159, Jan. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**96.**

V. Petrov, M. A. Lema, M. Gapeyenko, K. Antonakoglou, D. Moltchanov, F. Sardis, et al., "Achieving end-to-end reliability of mission-critical traffic in softwarized 5G networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 3, pp. 485-501, Mar. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**97.**

F. Gabriel, J. Acevedo and F. H. Fitzek, "Network coding on wireless multipath for tactile internet with latency and resilience requirements", *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Dec. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**98.**

J. A. Cabrera, R.-S. Schmoll, G. T. Nguyen, S. Pandi and F. H. P. Fitzek, "Softwarization and network coding in the mobile edge cloud for the tactile internet", *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 350-363, Feb. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**99.**

C. She, Z. Chen, C. Yang, T. Q. S. Quek, Y. Li and B. Vucetic, "Improving network availability of ultra-reliable and low-latency communications with multi-connectivity", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5482-5496, Nov. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**100.**

K. S. Kim, D. K. Kim, C. B. Chae, S. Choi, Y. C. Ko, J. Kim, et al., "Ultrareliable and low-latency communication techniques for tactile internet services", *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 376-393, Sep. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**101.**

N. Gholipoor, H. Saeedi and N. Mokari, "Cross-layer resource allocation for mixed tactile internet and traditional data in SCMA based wireless networks", *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, pp. 356-361, Apr. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**102.**

H.-T. Chien, Y.-D. Lin, C.-L. Lai and C.-T. Wang, "End-to-end slicing with optimized communication and computing resource allocation in multi-tenant 5G systems", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 2079-2091, Dec. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**103.**

J. Xu, K. Ota and M. Dong, "Energy efficient hybrid edge caching scheme for tactile internet in 5G", *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 483-493, Jun. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**104.**

J. Zeng, T. Lv, Z. Lin, R. P. Liu, J. Mei, W. Ni, et al., "Achieving ultrareliable and low-latency communications in IoT by FD-SCMA", *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 363-378, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**105.**

Z. Xiang, F. Gabriel, E. Urbano, G. T. Nguyen, M. Reisslein and F. H. P. Fitzek, "Reducing latency in virtual machines: Enabling tactile internet for human-machine co-working", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 5, pp. 1098-1116, May 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**106.**

M. Maier and A. Ebrahimzadeh, "Towards immersive tactile internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 11, no. 4, pp. B10-B25, Apr. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**107.**

N. Gholipour, S. Parsaeefard, M. R. Javan, N. Mokari, H. Saeedi and H. Pishro-Nik, "Resource management and admission control for tactile internet in next generation of radio access network", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136261-136277, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**108.**

W. Yang, C.-P. Li, A. Fakoorian, K. Hosseini and W. Chen, "Dynamic URLLC and eMBB multiplexing design in 5G new radio", *Proc. IEEE 17th Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, pp. 1-5, Jan. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**109.**

P. Yang, X. Xi, T. Q. S. Quek and H. Shin, "CoMP-enabled RAN slicing for tactile internet", *arXiv:2103.09532*, 2021.

Show in Context [Google Scholar](#)

**110.**

A. K. Permana and E. Y. Hamid, "Performance evaluation of GFDM channel estimation using DFT for tactile internet application", *Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 595, Mar. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**111.**

"5G; service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains", pp. 1-78, 2022.

Show in Context [Google Scholar](#)



**112.**

X. Liu, M. Dohler and Y. Deng, "Vibrotactile quality assessment: Hybrid metric design based on SNR and SSIM", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 22, no. 4, pp. 921-933, Aug. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**113.**

E. Muschter, A. Noll, J. Zhao, R. Hassen, M. Strese, B. Gulecyuz, et al., "Perceptual quality assessment of compressed vibrotactile signals through comparative judgment", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 14, no. 2, pp. 291-296, Apr. 2021.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**114.**

N. Sakr, N. D. Georganas and J. Zhao, "A perceptual quality metric for haptic signals", *Proc. IEEE Int. Workshop Haptic Audio Vis. Environ. Games*, pp. 27-32, Oct. 2007.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**115.**

R. Chaudhari, E. Steinbach and S. Hirche, "Towards an objective quality evaluation framework for haptic data reduction", *Proc. IEEE World Haptics Conf.*, pp. 539-544, Jun. 2011.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**116.**

R. Hassen and E. Steinbach, "HSSIM: An objective haptic quality assessment measure for force-feedback signals", *Proc. 10th Int. Conf. Quality Multimedia Exper. (QoMEX)*, pp. 1-6, May 2018.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)



**117.**

R. Hassen and E. Steinbach, "Subjective evaluation of the spectral temporal SIMilarity (ST-SIM) measure for vibrotactile quality assessment", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 25-31, Dec. 2019.

[View Article](#)



## [Google Scholar](#)



**118.**

Y. Xu, Y. Huang, W. Chen, H. Xue and T. Zhao, "Error resilience of haptic data in interactive systems", *Proc. 11th Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. (WCSP)*, pp. 1-6, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**119.**

L. Qian and Z. Tiesong, "Quality-of-experience in human-in-the-loop haptic communications", *ZTE Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 48-55, Nov. 2019.

Show in Context [Google Scholar](#)



**120.**

E. Steinbach, M. Strese, M. Eid, X. Liu, A. Bhardwaj, Q. Liu, et al., "Haptic codecs for the tactile internet", *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 447-470, Sep. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**121.**

P. Goudarzi, "A fuzzy admission control scheme for high quality video delivery over underlay cognitive radio", *Phys. Commun.*, vol. 7, pp. 134-144, Jun. 2013.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**122.**

Performance and Quality of Service Requirements for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) Access Networks, 2003.

Show in Context [Google Scholar](#)

**123.**

Methodologies for the Subjective Assessment of the Quality of Television Images Document Recommendation ITU-R BT. 500–14 (10/2019), Geneva, Switzerland, 2020.

Show in Context [Google Scholar](#)



**124.**

J. Li, L. Zhao, A. Li, B. Kang and M. Chen, "QoE- driven tactile internet: Scenario architecture and analysis", *Proc. 13th Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. (WCSP)*, pp. 1-6, Oct. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**125.**

M. Jalil Piran, Q.-V. Pham, S. M. R. Islam, S. Cho, B. Bae, D. Y. Suh, et al., "Multimedia communication over cognitive radio networks from QoS/QoE perspective: A comprehensive survey", *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 172, Dec. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**126.**

J. B. Van Erp, K.-U. Kyung, S. Kassner, J. Carter, S. Brewster, G. Weber, et al., "Setting the standards for haptic and tactile interactions: ISO's work", *Proc. Int. Conf. on Hum. Haptic Sens. Touch Enabled Comput. Appl.*, pp. 353-358, 2010.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**127.**

S. Chaudhuri and A. Bhardwaj, "Perceptual deadzone" in *Kinesthetic Perception*, Singapore:Springer, pp. 17-28, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**128.**

S. Chaudhuri and A. Bhardwaj, "Predictive sampler design for haptic signals" in *Kinesthetic Perception*, Singapore:Springer, pp. 29-53, 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**129.**

T. Nakano, S. Uozumi, R. Johansson and K. Ohnishi, "A quantization method for haptic data lossy compression", *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics (ICM)*, pp. 126-131, Mar. 2015.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**130.**

A. Kuzu, E. A. Baran, S. Bogosyan, M. Gokasan and A. Sabanovic, "Wavelet packet transform-based compression for teleoperation", *Proc. Inst. Mech. Eng. I J. Syst. Control Eng.*, vol. 229, no. 7, pp. 639-651, Aug. 2015.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**131.**

E. A. Baran, A. Kuzu, S. Bogosyan, M. Gokasan and A. Sabanovic, "Comparative analysis of a selected DCT-based compression scheme for haptic data transmission", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 12, no. 3, pp. 1146-1155, Jun. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**132.**

C. Zeng, T. Zhao, Q. Liu, Y. Xu and K. Wang, "Perception-lossless codec of haptic data with low delay", *Proc. 28th ACM Int. Conf. Multimedia*, pp. 3642-3650, Oct. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**133.**

A. Noll, B. Gulecyuz, A. Hofmann and E. Steinbach, "A rate-scalable perceptual wavelet-based vibrotactile codec", *Proc. IEEE Haptics Symp. (HAPTICS)*, pp. 854-859, Mar. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**134.**

R. Hassen and E. Steinbach, "Vibrotactile signal compression based on sparse linear prediction and human tactile sensitivity function", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 301-306, Jul. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**135.**

P. Seeling, M. Reisslein and F. H. P. Fitzek, "Real-time compression for tactile internet data streams", *Sensors*, vol. 21, no. 5, pp. 1924, Mar. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**136.**

M. Gui, X. Xu and E. Steinbach, "Adaptive packet rate control for the mitigation of bursty haptic traffic in teleoperation systems", *Proc. IEEE Haptics Symp. (HAPTICS)*, pp. 134-139, Mar. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**137.**

S. Kakade and S. Chaudhuri, "Perceptually compressive communication of interactive telehaptic signal", *Proc. Int. Conf. Hum. Haptic Sens. Touch Enabled Comput. Appl.*, pp. 480-488, 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**138.**

V. Gokhale, J. Nair and S. Chaudhuri, "Opportunistic adaptive haptic sampling on forward channel in telehaptic communication", *Proc. IEEE Haptics Symp. (HAPTICS)*, pp. 217-222, Apr. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**139.**

P. De Luca and A. Formisano, "Haptic data accelerated prediction via multicore implementation", *Proc. Sci. Inf. Conf.*, pp. 110-121, 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**140.**

R. Hassen, B. Gulecyuz and E. Steinbach, "PVC-SLP: Perceptual vibrotactile-signal compression based-on sparse linear prediction", *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 23, pp. 4455-4468, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**141.**

X. Liu and M. Dohler, "A data-driven approach to vibrotactile data compression", *Proc. IEEE Int. Workshop Signal Process. Syst. (SIPS)*, pp. 341-346, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**142.**

Z. Li, R. Hassen and Z. Wang, "Autoencoder for vibrotactile signal compression", *Proc. ICASSP*, pp. 4290-4294, Jun. 2021.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**143.**

J. Kirsch, A. Noll, M. Strese, Q. Liu and E. Steinbach, "A low-cost acquisition display and evaluation setup for tactile codec development", *Proc. IEEE Int. Symp. Haptic Audio Vis. Environ. Games (HAVE)*, pp. 1-6, Sep. 2018.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**144.**

M. Strese, L. Brudermeuller, J. Kirsch and E. Steinbach, "Haptic material analysis and classification inspired by human exploratory procedures", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 2, pp. 404-424, Nov. 2019.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**145.**

S. Lichiardopol, "A survey on teleoperation", vol. 20, pp. 40-60, 2007.

Show in Context [Google Scholar](#)

**146.**

C. Passenberg, A. Peer and M. Buss, "A survey of environment operator and task-adapted controllers for teleoperation systems", *Mechatronics*, vol. 20, no. 7, pp. 787-801, Oct. 2010.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**147.**

T. A. Varkonyi, I. J. Rudas, P. Pausits and T. Haidegger, "Survey on the control of time delay teleoperation systems", *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Intell. Eng. Syst. (INES)*, pp. 89-94, Jul. 2014.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**148.**

P. M. Kebria, H. Abdi, M. M. Dalvand, A. Khosravi and S. Nahavandi, "Control methods for internet-based teleoperation systems: A review", *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 49, no. 1, pp. 32-46, Nov. 2018.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**149.**

P. Arcara and C. Melchiorri, "Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study", *Robot. Auto. Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 49-64, Jan. 2002.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**150.**

G. Bauer and Y.-J. Pan, "Review of control methods for upper limb telerehabilitation with robotic exoskeletons", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 203382-203397, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**151.**

B. Brogliato, R. Lozano, B. Maschke and O. Egeland, "Dissipative systems analysis and control" in *Theory and Applications*, Cham, Switzerland:Springer, vol. 2, 2007.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**152.**

E. Nuño, L. Basañez and R. Ortega, "Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial", *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 485-495, Mar. 2011.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**153.**

G. Niemeyer and J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation", *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 522, no. 1, pp. 152-162, Jan. 1991.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**154.**

D. Sun, F. Naghdy and H. Du, "Application of wave-variable control to bilateral teleoperation systems: A survey", *Annu. Rev. Control*, vol. 38, no. 1, pp. 12-31, Jan. 2014.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**155.**

D. Tian, B. Zhang, H. Shen and J. Li, "Stability problem of wave variable based bilateral control: Influence of the force source design", *Math. Problems Eng.*, vol. 2013, Jan. 2013.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**156.**

L. Bate, C. D. Cook and Z. Li, "Reducing wave-based teleoperator reflections for unknown environments", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 392-397, Nov. 2009.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**157.**

M. Zheng, Q.-H. Chen, W. Xiao and H.-N. Yang, "Bilateral teleoperation with reducing wave-based reflections", *Adv. Manuf.*, vol. 1, no. 3, pp. 288-292, Sep. 2013.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**158.**

J. Guo, C. Liu and P. Pognet, "A scaled bilateral teleoperation system for robotic-assisted surgery with time delay", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 95, no. 1, pp. 165-192, Jul. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**159.**

N. D'Amore and D. L. Akin, "Transparency and tuning of wave-based bilateral teleoperation systems", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 321-328, Sep. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**160.**

F. E. Mujčić and S. A. Oračević, "Internet based teleoperations with using wave variables", *IFAC Proc. Volumes*, vol. 45, no. 7, pp. 255-260, Jan. 2012.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**161.**

B. Chen, Y. Guo and Y. Wu, "Comparative study of wave-variables and Smith predictor for teleoperator force-position control", *Proc. Chin. Control Decis. Conf. (CCDC)*, pp. 2960-2964, Jun. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**162.**

Y. Kawai, K. Honda, H. Kawai, T. Miyoshi and M. Fujita, "Tele-rehabilitation system for human lower limb using electrical stimulation based on bilateral teleoperation", *Proc. IEEE Conf. Control Technol. Appl. (CCTA)*, pp. 1446-1451, Aug. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**163.**

C. Yang, X. Wang, Z. Li, Y. Li and C.-Y. Su, "Teleoperation control based on combination of wave variable and neural networks", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 47, no. 8, pp. 2125-2136, Oct. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**164.**

E. Mujcic, A. Mujcic and S. Pajazetovic, "Internet-based teleoperation using wave variables and correction of position error", *Proc. Int. Conf. Smart Syst. Technol. (SST)*, pp. 219-224, Oct. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**165.**

J. Luo, C. Liu, N. Wang and C. Yang, "A wave variable approach with multiple channel architecture for teleoperated system", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143912-143920, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**166.**

Z. Chen, F. Huang, W. Sun and W. Song, "An improved wave-variable based four-channel control design in bilateral teleoperation system for time-delay compensation", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12848-12857, 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**167.**

Z. Chen, F. Huang, W. Song and S. Zhu, "A novel wave-variable based time-delay compensated four-channel control design for multilateral teleoperation system", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 25506-25516, 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**168.**

D. Sun, F. Naghdy and H. Du, "Stability control of force-reflected nonlinear multilateral teleoperation system under time-varying delays", *J. Sensors*, vol. 2016, Mar. 2016.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**169.**

P. Huang, P. Dai, Z. Lu and Z. Liu, "Asymmetric wave variable compensation method in dual-master-dual-slave multilateral teleoperation system", *Mechatronics*, vol. 49, pp. 1-10, Feb. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**170.**

X. Xu and E. Steinbach, "Elimination of cross-dimensional artifacts in the multi-dof time domain passivity approach for time-delayed teleoperation with haptic feedback", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 223-228, Jul. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**171.**



D. Sun, F. Naghdy and H. Du, "Neural network-based passivity control of teleoperation system under time-varying delays", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 47, no. 7, pp. 1666-1680, Apr. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**172.**

S. F. Atashzar, M. Shahbazi, M. Tavakoli and R. V. Patel, "A passivity-based approach for stable patient–robot interaction in haptics-enabled rehabilitation systems: Modulated time-domain passivity control", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 991-1006, Aug. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**173.**

D. Buongiorno, D. Chiaradia, S. Marcheschi, M. Solazzi and A. Frisoli, "Multi-DoFs exoskeleton-based bilateral teleoperation with the time-domain passivity approach", *Robotica*, vol. 37, no. 9, pp. 1641-1662, Sep. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**174.**

F. Porcini, D. Chiaradia, S. Marcheschi, M. Solazzi and A. Frisoli, "Evaluation of an exoskeleton-based bimanual teleoperation architecture with independently passivated slave devices", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, pp. 10205-10211, May 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**175.**

F. Hashemzadeh, I. Hassanzadeh, M. Tavakoli and G. Alizadeh, "Adaptive control for state synchronization of nonlinear haptic telerobotic systems with asymmetric varying time delays", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 68, no. 3, pp. 245-259, Dec. 2012.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**176.**

S. Forbrigger and Y.-J. Pan, "Improving haptic transparency for uncertain virtual environments using adaptive control and gain-scheduled prediction", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 11, no. 4, pp. 543-554, Oct. 2018.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**177.**

U. J. Na, "A new impedance force control of a haptic teleoperation system for improved transparency", *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 12, pp. 6005-6017, Dec. 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**178.**

L. Hu, J. Li, X. Liu, P. Xiong and S. He, "The maximum output force controller and its application to a virtual surgery system", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 15, no. 2, Mar. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**179.**

S. Hao, L. Hu and P. X. Liu, "Sliding mode control for a surgical teleoperation system via a disturbance observer", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43383-43393, 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**180.**

V. K. Pediredla, S. Annamraju and A. Thondiyath, "Enhancement of high-fidelity haptic feedback through multimodal adaptive robust control for teleoperated systems", *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 5526-5536, Nov. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**181.**

J. Guo, P. Li, H. Yan and H. Ren, "Viscoelastic model based bilateral teleoperation for robotic-assisted tele-palpatation", *Assem. Autom.*, vol. 37, no. 3, pp. 322-334, Aug. 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**182.**

C. Liu, J. Guo and P. Pognet, "Nonlinear model-mediated teleoperation for surgical applications under time variant communication delay", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 22, pp. 493-499, Jan. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**183.**

J. Song, Y. Ding, Z. Shang and J. Liang, "Model-mediated teleoperation with improved stability", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 15, no. 2, Mar. 2018.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**184.**

B. Yazdankhoo and B. Beigzadeh, "Increasing stability in model-mediated teleoperation approach by reducing model jump effect", *Scientia Iranica*, vol. 26, no. 1, pp. 3-14, Jan./Feb. 2019.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**185.**

B. Hannaford and J.-H. Ryu, "Time-domain passivity control of haptic interfaces", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, Feb. 2002.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**186.**

R. Balachandran, J. Artigas, U. Mehmood and J.-H. Ryu, "Performance comparison of wave variable transformation and time domain passivity approaches for time-delayed teleoperation: Preliminary results", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, pp. 410-417, Oct. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**187.**

J.-H. Ryu, J. Artigas and C. Preusche, "A passive bilateral control scheme for a teleoperator with time-varying communication delay", *Mechatronics*, vol. 20, no. 7, pp. 812-823, Oct. 2010.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**188.**

Y. Ye, Y.-J. Pan and T. Hilliard, "Bilateral teleoperation with time-varying delay: A communication channel passification approach", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1431-1434, Aug. 2013.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**189.**

V. Chawda and M. K. O'Malley, "Position synchronization in bilateral teleoperation under time-varying communication delays", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 245-253, May 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**190.**

K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 20, no. 6, pp. 419-445, Jun. 2001.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**191.**

Y. Sang Kim and B. Hannaford, "Some practical issues in time domain passivity control of haptic interfaces", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Expanding Societal Role Robot. Next Millennium*, vol. 3, pp. 1744-1750, Oct./Nov. 2001.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**192.**

J.-H. Ryu, "Bilateral control with time domain passivity approach under time-varying communication delay", *Proc. 16th IEEE Int. Symp. Robot Human Interact. Commun. (RO-MAN)*, pp. 986-991, Aug. 2007.

Show in Context [Google Scholar](#)

□

**193.**

U. Ahmad and Y.-J. Pan, "Switching time domain passivity control for multilateral teleoperation systems under time varying delays", *Proc. IEEE 55th Conf. Decis. Control (CDC)*, pp. 1429-1434, Dec. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**194.**

J.-H. Ryu, Q. Ha-Van and A. Jafari, "Multilateral teleoperation over communication time delay using the time-domain passivity approach", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 28, no. 6, pp. 2705-2712, Nov. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**195.**

L. Chan, F. Naghdy and D. Stirling, "Application of adaptive controllers in teleoperation systems: A survey", *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, vol. 44, no. 3, pp. 337-352, Jun. 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**196.**

S. Hirche and M. Buss, "Human-oriented control for haptic teleoperation", *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 3, pp. 623-647, Mar. 2012.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**197.**

B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, Aug. 1989.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**198.**

P. Mitra and G. Niemeyer, "Model-mediated telemanipulation", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 27, no. 2, pp. 253-262, Feb. 2008.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**199.**

X. Xu, B. Cizmeci, C. Schuwerk and E. Steinbach, "Model-mediated teleoperation: Toward stable and transparent teleoperation systems", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 425-449, 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**200.**

X. Xu, B. Cizmeci, A. Al-Nuaimi and E. Steinbach, "Point cloud-based model-mediated teleoperation with dynamic and perception-based model updating", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 11, pp. 2558-2569, May 2014.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**201.**

X. Xu, Q. Liu and E. Steinbach, "Toward QoE-driven dynamic control scheme switching for time-delayed teleoperation systems: A dedicated case study", *Proc. IEEE Int. Symp. Haptic Audio Vis. Environ. Games (HAVE)*, pp. 1-6, Oct. 2017.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**202.**

X. Xu, Q. Liu and E. Steinbach, "Haptic data reduction for time-delayed teleoperation using the input-to-state stability approach", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 533-538, Jul. 2019.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**203.**

X. Xu, M. Panzirsch, Q. Liu and E. Steinbach, "Integrating haptic data reduction with energy reflection-based passivity control for time-delayed teleoperation", *Proc. IEEE Haptics Symp. (HAPTICS)*, pp. 109-114, Mar. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**204.**

Q. Deng, T. Faghanimakrani and A. H. Aghvami, "GBDT-based modules for force prediction in a model-mediated teleoperation system", *Proc. 27th Int. Conf. Telecommun. (ICT)*, pp. 1-6, Oct. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**205.**

D. Sun, F. Naghdy and H. Du, "Time domain passivity control of time-delayed bilateral telerobotics with prescribed performance", *Nonlinear Dyn.*, vol. 87, no. 2, pp. 1253-1270, Jan. 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**206.**

M. Panzirsch, J.-H. Ryu and M. Ferre, "Reducing the conservatism of the time domain passivity approach through consideration of energy reflection in delayed coupled network systems", *Mechatronics*, vol. 58, pp. 58-69, Apr. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**207.**

L. Ruan, M. P. I. Dias and E. Wong, "Enhancing latency performance through intelligent bandwidth allocation decisions: A survey and comparative study of machine learning techniques", *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 12, no. 4, pp. B20-B32, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**208.**

L. Ruan, S. Mondal, I. Dias and E. Wong, "Low-latency federated reinforcement learning-based resource allocation in converged access networks", *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, Mar. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**209.**

N. Sakr, J. Zhou, N. D. Georganas and J. Zhao, "Prediction-based haptic data reduction and transmission in telementoring systems", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 5, pp. 1727-1736, Dec. 2008.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)



**210.**

Y. Kusunose, Y. Ishibashi, N. Fukushima and S. Sugawara, "Adaptive delta-causality control with prediction in networked real-time game using haptic media", *Proc. 18th Asia-Pacific Conf. Commun. (APCC)*, pp. 800-805, Oct. 2012.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**211.**

B. Yazdankhoo, M. Nikpour, B. Beigzadeh and A. Meghdari, "Improvement of operator position prediction in teleoperation systems with time delay: Simulation and experimental studies on phantom omni devices", *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 197-205, Oct. 2019.

Show in Context [Google Scholar](#)

**212.**

M. Nikpour, B. Yazdankhoo, B. Beigzadeh and A. Meghdari, "Adaptive online prediction of operator position in teleoperation with unknown time-varying delay: Simulation and experiments", *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 13, pp. 1-18, Nov. 2020.

Show in Context [Google Scholar](#)



**213.**

H.-S. Moon and J. Seo, "Prediction of human trajectory following a haptic robotic guide using recurrent neural networks", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 157-162, Jul. 2019.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**214.**

K. M. Yap, T. H. Tee, A. Marshall, K. S. Eu, Y. K. Lee, T.-H. Lee, et al., "A network-adaptive prediction algorithm for haptic data under network impairments", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 52672-52683, 2021.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**215.**

L. Cheng and M. Tavakoli, "Neural network-based physiological organ motion prediction and robot impedance control for teleoperated beating-heart surgery", *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 66, Apr. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**216.**

S. Mondal, L. Ruan and E. Wong, "Remote human-to-machine distance emulation through AI-enhanced servers for tactile internet applications", *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, pp. 1-3, Mar. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**217.**

E. Wong, S. Mondal and L. Ruan, "Alleviating the master-slave distance limitation in H2M communications through remote environment emulation", *Proc. Int. Conf. Opt. Netw. Design Modeling (ONDM)*, pp. 1-3, May 2020.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**218.**

S. Mondal, L. Ruan, M. Maier, D. Larrabeiti, G. Das and E. Wong, "Enabling remote human-to-machine applications with AI-enhanced servers over access networks", *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 889-899, 2020.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**219.**

F. Rasouli, A. Ebrahimzadeh, S. Kianpisheh, N. Promwongsa, F. Belqasmi and R. Glitho, "A predictive framework for haptic enabled VR-based remote phobia treatment in cloud/fog environment", *Proc. 24th Conf. Innov. Clouds Internet Netw. Workshops (ICIN)*, pp. 20-27, Mar. 2021.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**220.**

C. J. Perez-del-Pulgar, J. Smisek, V. F. Munoz and A. Schiele, "Using learning from demonstration to generate real-time guidance for haptic shared



control", *Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern. (SMC)*, pp. 003205-003210, Oct. 2016.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**221.**

C. J. Pérez-del-Pulgar, J. Smisek, I. Rivas-Blanco, A. Schiele and V. F. Muñoz, "Using Gaussian mixture models for gesture recognition during haptically guided telemanipulation", *Electronics*, vol. 8, no. 7, pp. 772, Jul. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**222.**

F. Boabang, R. Glitho, H. Elbiaze, F. Belqami and O. Alfandi, "A framework for predicting haptic feedback in needle insertion in 5G remote robotic surgery", *Proc. IEEE 17th Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, pp. 1-6, Jan. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**223.**

L. C. Mutalemwa and S. Shin, "A classification of the enabling techniques for low latency and reliable communications in 5G and beyond: Ai-enabled edge caching", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 205502-205533, 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**224.**

J. Luo, W. He and C. Yang, "Combined perception control and learning for teleoperation: Key technologies applications and challenges", *Cognit. Comput. Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 33-43, Jun. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**225.**

Z. Hou, C. She, Y. Li, D. Niyato, M. Dohler and B. Vucetic, "Intelligent communications for tactile internet in 6G: Requirements technologies and challenges", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 12, pp. 82-88, Dec. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

**226.**

H. Culbertson, J. J. L. Delgado and K. J. Kuchenbecker, "One hundred data-driven haptic texture models and open-source methods for rendering on 3D objects", *Proc. IEEE Haptics Symp. (HAPTICS)*, pp. 319-325, Feb. 2014.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**227.**

M. Strese, C. Schuwerk, A. Iepure and E. Steinbach, "Multimodal feature-based surface material classification", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 226-239, Nov. 2016.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**228.**

J. Jiao, Y. Zhang, D. Wang, X. Guo and X. Sun, "HapTex: A database of fabric textures for surface tactile display", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 331-336, Jul. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**229.**

A. Abdulali, R. Rakhmatov, T. Ogay and S. Jeon, "Data-driven modeling and rendering of force responses from elastic tool deformation", *Sensors*, vol. 18, no. 1, pp. 237, Jan. 2018.

[CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**230.**

T. L. de Jong, J. Dankelman and J. J. van den Dobbelsteen, "Dataset on force measurements of needle insertions into two ex-vivo human livers", *Data Brief*, vol. 11, pp. 308-310, Apr. 2017.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**231.**

M. Kerzel, E. Strahl, C. Gaede, E. Gasanov and S. Wermter, "Neuro-robotic haptic object classification by active exploration on a novel dataset", *Proc. Int. Joint Conf. Neural Netw. (IJCNN)*, pp. 1-8, Jul. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**232.**

T. Bhattacharjee, J. M. Rehg and C. C. Kemp, "Haptic classification and recognition of objects using a tactile sensing forearm", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 4090-4097, Oct. 2012.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

**233.**

T. Bhattacharjee, H. Bai, H. Chen and C. C. Kemp, "A model that predicts the material recognition performance of thermal tactile sensing", *arXiv:1711.01490*, 2017.

[Google Scholar](#)

□

**234.**

M. Strese, J.-Y. Lee, C. Schuwerk, Q. Han, H.-G. Kim and E. Steinbach, "A haptic texture database for tool-mediated texture recognition and

classification", *Proc. IEEE Int. Symp. Haptic Audio Vis. Environ. Games (HAVE)*, pp. 118-123, Oct. 2014.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**235.**

K. Polachan, T. V. Prabhakar, C. Singh and F. A. Kuipers, "Towards an open testbed for tactile cyber physical systems", *Proc. 11th Int. Conf. Commun. Syst. Netw. (COMSNETS)*, pp. 375-382, Jan. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**236.**

J. J. Fleck, Z. A. Zook, T. W. Tjandra and M. K. O'Malley, "A cutaneous haptic cue characterization testbed", *Proc. IEEE World Haptics Conf. (WHC)*, pp. 319-324, Jul. 2019.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**237.**

V. Gokhale, K. Kroep, V. S. Rao, J. Verburg and R. Yechangunja, "TIXT: An extensible testbed for tactile internet communication", *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 32-37, Apr. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**238.**

F. Engelhardt, J. Behrens and M. Gunes, "The OVGU haptic communication testbed (OVGU-HC)", *Proc. IEEE 31st Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun.*, pp. 1-6, Aug. 2020.

[View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**239.**

A. Noll, A. Gurbuz, B. Gulecyuz, K. Cui and E. Steinbach, "Quality enhancement of compressed vibrotactile signals using recurrent neural networks and residual learning", *IEEE Trans. Haptics*, vol. 14, no. 2, pp. 316-321, Apr. 2021.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**240.**

L. Zhou, D. Wu, J. Chen and X. Wei, "Cross-modal collaborative communications", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 112-117, Oct. 2019.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**241.**

L. Zhou, D. Wu, X. Wei and J. Chen, "Cross-modal stream scheduling for eHealth", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 2, pp. 426-437, Sep. 2020.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**242.**

M. Simsek, S. Oteafy, Z. Dawy, M. Eid, O. Holland and E. Steinbach, "Tactile internet standards of the IEEE p1918. 1 working group" in Tactile Internet, Amsterdam, The Netherlands:Elsevier, pp. 351-374, 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**243.**

K. Antonakoglou, M. Mahlouji and T. Mahmoodi, "Bilateral teleoperation performance model for network resource management", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29106-29117, 2021.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)



**244.**

Y. Dong and N. Chopra, "Passivity-based bilateral tele-driving system with parametric uncertainty and communication delays", *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 350-355, Mar. 2018.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**245.**

I. O. Ogunrinde, C. F. Adetu, C. A. Moore, R. G. Roberts and K. McQueen, "Experimental testing of bandstop wave filter to mitigate wave reflections in bilateral teleoperation", *Robotics*, vol. 9, no. 2, pp. 24, Apr. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)



**246.**

X. Tao, J. Li and Q. Huang, "Stability analysis of time-varying delay bilateral teleoperation system with state prediction", *Proc. 6th Int. Conf. Control Autom. Robot. (ICCAR)*, pp. 272-276, Apr. 2020.

Show in Context [View Article](#)  
[Google Scholar](#)

**247.**

C. Thomas, S. Yi, S. Meadows and R. Sherrill, "Adaptive Smith predictor for teleoperation of UAVs with time-varying internet delay", *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 18, no. 6, pp. 1465-1473, Jun. 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**248.**

M. Dohler, "5G networks haptic codecs and the operating theatre" in *Digital Surgery*, Cham, Switzerland:Springer, pp. 71-86, 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**249.**

D. Budolak and P. Ben-Tzvi, "Series elastic actuation for improved transparency in time delayed haptic teleoperation", *Mechatronics*, vol. 63, Nov. 2019.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**250.**

Y. Cheng, "Edge caching and computing in 5G for mobile augmented reality and haptic internet", *Comput. Commun.*, vol. 158, pp. 24-31, May 2020.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**251.**

C. Grasso, K. E. Kn, P. Nagaradjane, M. Ramesh and G. Schembra, "Designing the tactile support engine to assist time-critical applications at the edge of a 5G network", *Comput. Commun.*, vol. 166, pp. 226-233, Jan. 2021.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

**252.**

F. Brandi, J. Kammerl and E. Steinbach, "Error-resilient perceptual coding for networked haptic interaction", *Proc. Int. Conf. Multimedia (MM)*, pp. 351-360, 2010.

Show in Context [CrossRef](#) [Google Scholar](#)

□

**253.**

Y. Xu, Q. Zheng, Q. Lin, K. Wang and T. Zhao, "Error resilience algorithm for haptic communication based on remedy-LSTM", *Proc. IEEE 6th Int. Conf. Comput. Commun. (ICCC)*, pp. 2207-2211, Dec. 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)

□

**254.**

S. Hangai and T. Nozaki, "Haptic data prediction and extrapolation for communication traffic reduction of 4-channel bilateral control system", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 4, pp. 2611-2620, May 2020.

Show in Context [View Article](#)

[Google Scholar](#)