

ОБЗОР ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ КОДЕКОВ ТАКТИЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А. И. Выборнова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Адрес для переписки: a.vybornova@gmail.com

Аннотация

Среди задач, стоящих в настоящий момент перед исследователями в области телекоммуникаций, одной из самых перспективных является задача предоставления возможности передачи по сетям связи тактильных ощущений. **Предметом исследования** являются существующие методы работы с тактильной информацией. **Метод исследования:** сбор и анализ имеющихся прикладных исследований по теме. **Основными результатами** проведенной работы являются обобщенные данные по методам сбора и воспроизведения тактильных данных, а также перспективный подход к созданию тактильных кодеков на основе вибрации, дискретизируемой с частотой 2 кГц, и добавления других тактильных параметров, измеряемых и передаваемых при необходимости. **Практическая значимость** работы состоит в формулировании подходов, которые в перспективе позволят за счет стандартизированных кодеков тактильной информации быстро и без существенных затрат добавлять тактильную составляющую в процесс удаленного управления техническими средствами или дистанционной коммуникации между людьми.

Ключевые слова: Тактильный интернет, тактильные кодеки, тактильная обратная связь, эффект присутствия.

Информация о статье

УДК 004.046

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 18.06.19, принята к печати 02.09.19.

Ссылка для цитирования: Выборнова А. И. Обзор подходов к созданию кодеков тактильной информации // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Том 7. № 1. С. 31–40. DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-1-31-40

A SURVEY ON HAPTIC CODEC DESIGN APPROACHES

A. Vybornova

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Corresponding author: a.vybornova@gmail.com

Abstract—Tactile communication as a part of Tactile Internet concept now is one of the most promising research areas in telecommunications. Methods and approaches to design tactile codec, as well as equipment for the tactile sensation capture and display were the **research subject** of this work. As a **research method** author engaged collection and analysis of the known approaches to the subject of research. **Core result**. In this article author provide a survey of tactile data capture and display methods. Additionally, author propose a promising approach to the tactile codecs design, where vibration with sampling frequency of 2 kHz is combined with other tactile data, which is captured and send on an ad hoc basis. **Practical relevance** of the result allows to create a standard tactile codec. This in turn allows to widely introduce tactile component to the telecommunication applications.

Keywords—Tactile Internet, haptic codecs, tactile feedback, immerse effect.

Article info

Article in Russian.

Received 18.06.19, accepted 02.09.19.

For citation: Vybornova A.: A Survey on Haptic Codec Design Approaches // Telecom IT. 2019. Vol. 7. Iss. 1. pp. 31–40 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-1-31-40

Введение

Одним из наиболее важных направлений развития телекоммуникационной отрасли в настоящий момент является Тактильный Интернет (ТИ). Концепция ТИ подразумевает такое изменение сетей связи на всех уровнях функционирования, чтобы стала возможной дистанционная передача тактильных ощущений [1]. Приложения ТИ могут найти применение в широком спектре отраслей, например, в телемедицине, дистанционном обучении, при проведении спасательных операций и в сфере развлечений. Последние годы концепция передачи движений и тактильных ощущений совместно с видео- и аудиоинформацией рассматривается более широко как часть так называемого Интернета Навыков [2], в котором телекоммуникационная инфраструктура рассматривается как способ передачи между людьми различных знаний и умений.

Внедрение приложений ТИ требует от телекоммуникационной инфраструктуры достижения новых показателей работы, среди которых центральным явля-

ется уменьшение задержки передачи данных до ультрамалых величин. Общепринятым для сетей ТИ является требование величины круговой задержки не более одной миллисекунды¹ [1], что, как считается, позволит пользователю воспринимать тактильную информацию как непосредственно возникающую, а не переданную по сети. Для достижения такого времени передачи информации необходимо внедрение новых технологий, в частности, сетей связи пятого поколения 5G [3], программно-конфигурируемых сетей SDN (*Software Defined Networks*) [4], многоуровневых распределенных облачных вычислений MEC (*Mobile Edge Computing*) [4] и технологий искусственного интеллекта [5].

Однако немаловажным для достижения ультрамалых задержек передачи информации по сети является вопрос о том, каким образом будет осуществляться кодирование и декодирование тактильной информации. В настоящий момент уже существует несколько работ по этой теме и в данной статье автор предлагает обзор существующих предложений по созданию тактильных кодеков.

В первой части статьи приводятся общие сведения об инфраструктуре, требуемой для передачи тактильной информации. Вторая часть посвящена способам сбора и воспроизведения тактильной информации и имеющимся подходам к реализации этих способов. Третья часть описывает подходы к созданию кодеков тактильной информации. В заключительной части приводятся перспективы исследований в данной области и вопросы, требующие решения.

1. Инфраструктура для передачи тактильной информации

В настоящий момент описано достаточно много различных приложений ТИ, но большинство из них использует схожую схему организации передачи данных [3, 6]. Эту схему можно условно разделить на три домена: ведущий домен, где оператор при помощи устройств-манипуляторов передает свои движения и получает тактильную обратную связь, ведомый домен, на который передаются движения оператора и формируется тактильная обратная связь, и сетевой домен, осуществляющий передачу информации между ведущим и ведомым доменом (рис. 1)

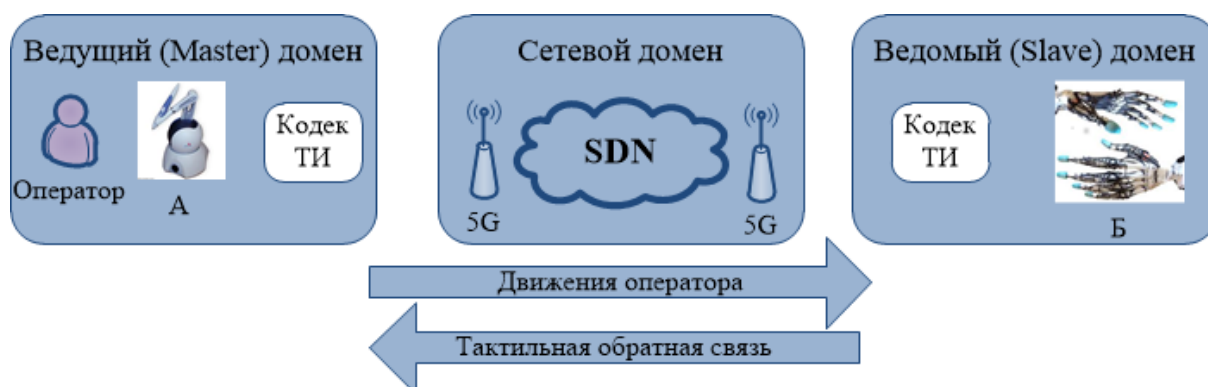


Рис. 1. Схема организации передачи различных типов данных в приложениях ТИ.

А – устройство записи движений оператора и воспроизведения тактильной обратной связи,

Б – устройство воспроизведения движений оператора и записи тактильной обратной связи

Ведущий домен представляет собой оборудование, позволяющее оператору выполнять различные движения, и получать тактильную обратную связь.

¹ The Tactile Internet. Technology Watch report. ITU-T, Geneva, 2014. 24 p.

Различные манипуляторы, фиксирующие движения оператора, существуют уже достаточно давно, однако добавление тактильной обратной связи значительно расширяет возможности применения такого оборудования, позволяя не просто удаленно манипулировать устройством, но и получать важную информацию об удаленной среде, в дополнение к видео- и аудиоинформации.

В настоящий момент уже существует некоторое количество устройств для передачи двигательной информации от оператора и приема и воспроизведения тактильной обратной связи, например, PHANTOM OMNI (рис. 2) [7], Virtuouse 6D [8]. Также следует отметить, что воспроизведение вибрации, доступное в большинстве современных смартфонов, также является формой тактильной обратной связи, и дальнейшее развитие данной технологии в перспективе может позволить воспроизводить приближенную к реальной тактильную обратную связь непосредственно при помощи смартфона.

Ведомый домен может состоять из различных устройств, воспроизводящих движения оператора, например, роботизированной установки для выполнения хирургических операций или робота-спасателя, исследующего местность. Также, в связи с развитием технологий виртуальной и дополненной реальности, ведомый домен может быть полностью виртуальным.

Среди приложений ТИ можно выделить те, что обеспечивают взаимодействие не между человеком и машиной, а между двумя людьми, например, для виртуального рукопожатия на расстоянии. В этом случае может быть использовано два оконечных устройства, каждое из которых совмещает в себе функции ведущего и ведомого доменов.

Для построения **сетевого домена** достаточно общепризнанным на текущий момент является следующий набор технологий:

- в качестве технологии доступа будет использоваться мобильная сеть связи пятого поколения 5G, что позволит сократить сетевые задержки не только за счет новых технологий радиодоступа, но и за счет коммуникации Device to Device (D2D) [3];
- ядро сети, построенное на основе оптических каналов связи, будет использоваться для своей работы технологии программно-конфигурируемых сетей SDN и виртуализации сетевых функций NFV (*Network Functions Virtualization*), что позволит добиться высокой производительности и скорости передачи данных за счет гибкого подхода к использованию сетевых ресурсов [4].

Помимо этого, в сети связи будет применяться концепция граничных вычислений MEC, что позволит в значительной части случаев перенести некоторые функции сети из ядра ближе к пользователям для еще большего уменьшения времени передачи информации [4].

Предполагается, что применение данных технологий позволит минимизировать задержку в сети связи и приблизиться к декларируемой круговой задержке в 1 мс. Однако достижение такой круговой задержки будет возможно не всегда,



Рис. 2. Устройство для передачи двигательной информации и воспроизведения тактильной обратной связи Phantom Omni. Изображение взято с сайта <https://www.immersion.fr/>

что обусловлено фундаментальной ограниченностью скорости света. Преодоление этого ограничения в некоторой степени возможно при помощи технологий искусственного интеллекта, позволяющих предсказывать действия пользователя и возникающую обратную связь до того, как действия были выполнены. Помимо этого, технологии искусственного интеллекта могут применяться и для оптимизации сети, что также может служить цели уменьшения задержки передачи данных [5].

2. Типы тактильной информации и способы работы с ними

Исследования способов сбора и воспроизведения тактильной информации ведутся достаточно давно [9, 10], однако в связи с возникновением концепции ТИ интерес к ним усилился в последние годы. Для того, чтобы найти подходы к построению кодеков тактильной информации, необходимо в первую очередь определить составляющие тактильных ощущений.

В соответствии с [11, 12] за тактильные ощущения отвечают несколько типов рецепторов, которые можно условно разделить по месту их расположения – кожные рецепторы и рецепторы, расположенные в мышцах, суставах и сухожилиях. Первые в свою очередь делятся на медленно и быстро адаптирующиеся, в зависимости от скорости реакции на внешние стимулы.

В таблице (переведено из [13] и дополнено из [11]) приведены некоторые типы рецепторов и примеры соответствующих тактильных ощущений, а также воспринимаемая частота внешних воздействий. Как видно из таблицы, рецепторы способны воспринимать тактильные ощущения в большом диапазоне частот, причем для каждого типа рецепторов (и, соответственно, типа тактильных ощущений) существует свой диапазон воспринимаемых частот.

Таблица

Типы и функции тактильных рецепторов
(переведено из [13], дополнено из [11])

Рецептор	Воспринимаемые внешние воздействия	Пример	Диапазон частот, Гц	Лучше всего воспринимаемая частота, Гц
Клетки Меркеля	Давление, грани углы и точки	Чтение шрифта Брайля	0–100	5 (медленно адаптирующиеся)
Тельца Руффини	Растяжение кожи, ощущение тепла	Поднятие тяжелых объектов	Медленно адаптирующиеся рецепторы	
Тельца Меснера	Легкие прикосновения	Ощущение скольжения объекта	100–300	50 (быстро адаптирующиеся)
Тельца Пачини	Вибрация	Ощущение текстуры	5–1000	200 (быстро адаптирующиеся)
Колбы Краузе	Ощущение холода	Ощущение холода	10–100	(медленно адаптирующиеся)

Различные диапазоны воспринимаемых рецепторами частот, как и различия в самих воспринимаемых ощущениях, приводят к необходимости разделения так-

тильных ощущений на группы. Ниже приведена классификация тактильных ощущений вместе с описанием способов фиксации (измерения) и воспроизведения этих ощущений [15]:

1. **Тактильное воздействие силы трения.** Сила трения, возникающая при проведении (или попытке провести) пальцем или другой частью тела по поверхности объекта, зависит от структуры поверхности объекта и силы нажатия на него – чем больше сила нажатия и «неровность» поверхности, тем сложнее будет провести манипулятором по ней.

Измерить силу трения можно при помощи резистивных датчиков давления (*force sensor*) – комбинации из нескольких резисторов давления (*force sensing resistors*), позволяющих фиксировать силу нажатия при сдвигании или попытке сдвинуть манипулятор в ведомом домене [15]. Также существуют работы, посвященные использованию трибометров для измерения силы трения [16], однако пока неясно, насколько такой подход может быть использован в устройствах, имеющих рыночные перспективы.

Воспроизведение тактильных ощущений от трения для оператора возможно при помощи изменения сопротивления устройства в ведущем домене движению оператора [15]. Другим подходом может быть физическое воспроизведение текстуры объекта на устройстве в ведущем домене. Такой подход также может быть полезен и в воспроизведении следующей группы тактильных ощущений.

2. **Ощущение формы и текстур объекта** – тактильные ощущения, возникающие при перемещении пальца или другой части тела по объекту. Можно разделить на микроскопические (текстура) и макроскопические (форма).

Определение формы объекта может быть выполнено при помощи различных техник, например, фотометрической системы стереоскопического зрения (*photometric stereo*, трехмерное изображение объекта получается путем освещения объекта под разными углами и фиксации отраженного света) или путем сканирования лазером. Аналогично, лазер может быть использован для измерения вибрации, возникающей при перемещении манипулятора по неровной поверхности в ведомом домене, что позволяет зафиксировать ее текстуру. Для этой же цели можно использовать закрепленный на манипуляторе акселерометр. Воспроизведение текстуры оператору в этом случае происходит путем воспроизведения записанной вибрации [15].

3. **Твердость** – реакция объекта на нажатие. Твердость поверхности объекта может быть зафиксирована при помощи датчиков давления или измерения глубины вдавливания при нажатии манипулятором на поверхность. Воспроизведение твердости объекта (как и его формы) возможно путем изменения сопротивления устройства в ведущем домене движениям оператора [15].

4. **Температура и теплопроводность объекта** – тактильное ощущение температуры объекта. Восприятие теплопроводности объекта позволяет распознать наощупь материал, из которого он изготовлен, например, отличить пластик от металла. Измерение температуры объекта может быть выполнено при помощи терморезистора или инфракрасного термодатчика. Для измерения теплопроводности требуется предварительно разогреть объект, например, при помощи элемента Пельтье, установленного на манипуляторе, или дистанционно лазером, а затем измерить скорость охлаждения объекта. Воспроизведение температуры объекта оператору может быть реализовано при помощи элементов Пельтье [15].

3. Проблемы создания тактильного кодека

Как показано в предыдущей части, разные виды тактильной информации заметно отличаются друг от друга как с точки зрения требуемого объема передачи данных, так и с точки зрения частоты дискретизации. Так, например, измерение температуры и теплопроводности объекта может быть выполнено только один раз для каждого объекта, к которому удаленно прикасается оператор, в то время как вибрация при проведении манипулятором по объекту (для фиксации его текстуры) должна измеряться с частотой 2 кГц, исходя из возможностей восприятия вибрации человеком (см. табл.) и теоремы Котельникова [13].

Объемы тактильной информации, тем не менее, достаточно малы, что позволяет для создания кодека тактильной информации использовать существующие подходы к кодированию и декодированию информации. Так, в [13] авторы на основе схожести тактильной и аудиоинформации (исходя из вибрационной природы обеих) предложили подход к созданию кодеков тактильной информации на основе аудиокодеков. Аналогичный подход для вибрационной составляющей тактильного сигнала предлагался и ранее [17].

Данный подход видится достаточно перспективным, однако следует учитывать, что тактильный сигнал, в отличие от звукового, является мультимодальным – при ошупывании поверхности манипулятор может перемещаться в трех измерениях, помимо этого, тактильная информация, как было показано во второй части, не ограничивается только вибрацией, а требует добавления данных о жесткости, форме и температуре объекта.

Помимо этого, отличаются требования к задержке передачи данных по сети. Для аудиоинформации задержка до 100 мс не является существенной, в то время как для качественной передачи тактильной информации требуются значительно меньшие величины задержки передачи пакета² [1]. Данное обстоятельство, помимо необходимости модернизации самой сети связи, делает также проблемным применение некоторых кодеков, в которых используются большие с точки зрения длительности кодируемого сигнала кадры (например, G.723.1).

Также следует отметить, что требуемая частота дискретизации для тактильных ощущений предположительно меньше, чем для звука (2 кГц против 8 кГц), что вносит дополнительные сложности в проектирование тактильных кодеков на основе существующих аудиокодеков.

Кодирование и декодирование вибрационных тактильных данных на основе аудиокодеков является не единственным подходом к созданию тактильных кодеков. В более ранней работе по данной теме [18] предлагалось передавать из ведомого домена в ведущий данные о позиции, скорости, ускорении и давлении на поверхность манипулятора дискретизируемые с требуемой частотой. Можно предположить, что достаточно перспективным окажется гибридный подход, когда текстура объекта будет передаваться при помощи вибрации с частотой дискретизации 2 кГц, а такие параметры, как форма, температура, твердость (показания датчиков давления) будут измеряться и передаваться с меньшей частотой или при необходимости.

² The Tactile Internet. Technology Watch report. ITU-T, Geneva, 2014. 24 p.

Заключение

В данной статье приводятся подходы к работе с тактильной обратной связью, однако нельзя не отметить, что отдельной важной частью приложений Тактильного Интернета является сбор, передача и воспроизведение движений оператора, то есть создания кинестетических кодеков и оборудования записи и воспроизведения.

В связи с широкими перспективами практического применения технологий Тактильного Интернета, исследования, посвященные созданию тактильного кодека в настоящий момент, идут достаточно активно. Однако все еще остается ряд вопросов, которые исследователям предстоит решить.

С точки зрения восприятия человеком тактильная информация неотделима от визуальной и звуковой, поэтому и при дистанционной передаче тактильной информации следует решить вопрос синхронизации ее с потоком аудио- и видеоданных. Учитывая разные требования к передаче этих видов информации и разные характеристики траффика, порождаемого соответствующими приложениями, решение этой задачи может потребовать дополнительных исследований.

Кроме того, важным является и вопрос стандартизации в области сбора, передачи и воспроизведения тактильных данных. В настоящий момент подходы к решению этих задач отличаются у разных компаний и исследовательских групп, однако в рамках работы над стандартом IEEE P1918.1.1 проделана значительная работа по созданию универсального подхода к работе с тактильными данными³.

Создание тактильного кодека поднимает также и вопрос о качестве передачи тактильных данных и требует разработки новых субъективных и объективных методов оценки качества обслуживания и качества восприятия тактильных данных, переданных через сеть связи.

Литература

1. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44–46.
2. M. Dohler, T. Mahmoodi, M. Lema, M. Condoluci, F. Sardis, K. Antonakoglou, A. Aghvami. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), 2017.
3. M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs and G. Fettweis. 5G-Enabled Tactile Internet // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 3, 2016. pp. 460–473.
4. A. A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek, A. Koucheryavy. Multilevel cloud based Tactile Internet system // 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2017. pp. 105–110.
5. Ateya, A.A.; Muthanna, A.; Vybornova, A.; Gudkova, I.; Gaidamaka, Y.; Abuarqoub, A.; Al-garni, A.D.; Koucheryavy, A. Model Mediation to Overcome Light Limitations—Toward a Secure Tactile Internet System // J. Sens. Actuator Netw. 2019, 8, 6.
6. M. Maier, M. Choudhury, B. P. Riwal, D. P. Van. The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges // IEEE Communications Magazine. May 2016. pp. 2–9.
7. Jarillo-Silva, A. & Domínguez-Ramírez, Omar & Parra-Vega, V. & Ordaz, P. (2009). PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability. pp. 193–198.
8. Garrec, P. & Friconneau, J-P & Louveaux, François. (2004). Virtuouse 6D: A new force-control master arm using innovative ball-screw actuators. URL: https://www.researchgate.net/publication/273422833_Advantages_of_mechanical_backdrivability_for_medical_applications_of_force_control

³ IEEE P1918.1.1 – Haptic Codecs for the Tactile Internet.

9. K. J. Kuchenbecker, J. Fiene, and G. Niemeyer. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *Visualization and Computer Graphics // IEEE Transactions on*, 2006. 12 (2): pp. 219–230.
10. S. J. Lederman and R. L. Klatzky. Haptic perception: A tutorial // Springer: Attention, Perception, & Psychophysics, vol. 71, no. 7, pp. 1439–1459, 2009.
11. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем : учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 28 с.
12. D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, et al., editors. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2001. Table 9.1 The Major Classes of Somatic Sensory Receptors.
13. X. Liu, M. Dohler, T. Mahmoodi and H. Liu. Challenges and opportunities for designing tactile codecs from audio codecs // *European Conference on Networks and Communications*, pp. 1–5, June 2017.
14. E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell, S. A. Siegelbaum, and A. J. Hudspeth. *Principles of Neural Science, Fifth Edition // 2013: McGraw-Hill Education*. pp. 499–510
15. E. Steinbach et al. Haptic Codecs for the Tactile Internet // *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 447–470, Feb. 2019.
16. R. V. Grigorii, M. A. Peshkin and J. E. Colgate. High-bandwidth tribometry as a means of recording natural textures // *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Munich, 2017, pp. 629–634.
17. R. Chaudhari, B. Çizmeçi, K. Kuchenbecker, S. Choi, E. Steinbach. Low bitrate source-filter model based compression of vibrotactile texture signals in haptic teleoperation. *MM 2012 // Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimedia*, 2012.
18. Kuchenbecker K. J., Romano J., McMahan W. (2011) Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces. In: Pradalier C., Siegwart R., Hirzinger G. (eds) *Robotics Research // Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 70. Springer, Berlin, Heidelberg.

References

1. Koucheryavy, A. E., Makolkina, M. A., Kirichek, R. V. Tactile Internet. Ultra Low Latency Communication Networks // *Elektrosvyaz*. 2016. No. 1. pp. 44–46.
2. Dohler, M., Mahmoodi, T., Lema, M., Condoluci, M., Sardis, F., Antonakoglou, K., Aghvami, A. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet // *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. 2017.
3. Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., Fettweis, G. 5G-Enabled Tactile Internet // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2016. Vol. 34. Iss. 3. pp. 460–473.
4. Ateya, A. A., Vybornova, A., Kirichek, R., Koucheryavy, A. Multilevel cloud based Tactile Internet system // *19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2017. pp. 105–110.
5. Ateya, A. A., Muthanna, A., Vybornova, A., Gudkova, I., Gaidamaka, Y., Abuarqoub, A., Algarni, A. D., Koucheryavy, A. Model Mediation to Overcome Light Limitations—Toward a Secure Tactile Internet System // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2019. Vol. 8. Iss. 1. pp. 6.
6. Maier, M., Choudhury, M., Riwal, B. P., Van, D. P. The Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54. Iss. 5. pp. 138–145.
7. Jarillo-Silva, A., Dominguez-Ramirez, O., Parra-Vega, V., Ordaz, P. PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability // *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*. 2009. pp. 193–198.
8. Garrec, P., Friconneau, J.-P., Louveaux, F. Virtuouse 6D: A new force-control master arm using innovative ball-screw actuators. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/280667300_Virtuose_6D_A_new_force-control_master_arm_using_innovative_ball-screw_actuators
9. Kuchenbecker, K. J., Fiene, J., Niemeyer, G. Improving Contact Realism Through Event-Based Haptic Feedback // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2006. Vol. 12. Iss. 2. pp. 219–230.
10. Lederman, S. J., Klatzky, R. L. Haptic perception: A tutorial // *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2009. Vol. 71. Iss. 7. pp. 1439–1459.
11. Vorotnikov, S. A. *Information Devices of Robotic Systems*. М.: BMSTU, 2005. 28 p.
12. Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., et al. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates, 2001.
13. Liu, X., Dohler, M., Mahmoodi, T., Liu, H. Challenges and Opportunities for Designing Tactile Codecs from Audio Codecs // *European Conference on Networks and Communications*. 2017. Pp. 1–5.

14. Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J. Principles of Neural Science. – 5th edition. McGraw-Hill Education, 2013. pp. 499–510.
15. Steinbach, E., et al. Haptic Codecs for the Tactile Internet // Proceedings of the IEEE. 2019. Vol. 10. Iss. 2. pp. 447–470.
16. Grigorii, R. V., Peshkin M. A., Colgate, J. E. High-Bandwidth Tribometry as a Means of Recording Natural Textures // IEEE World Haptics Conference (WHC). 2017. pp. 629–634.
17. Chaudhari, R., Çizmeçi, B., Kuchenbecker, K., Choi, S., Steinbach, E. Low Bitrate Source-Filter Model based Compression of Vibrotactile Texture Signals in Haptic Teleoperation // 20th ACM International Conference on Multimedia. 2012.
18. Kuchenbecker, K. J., Romano, J., McMahan, W. Haptography: Capturing and Recreating the Rich Feel of Real Surfaces // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2011. Vol. 70. pp. 245–260.

Выборнова

Анастасия Игоревна

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,
a.vybornova@gmail.com

Vybornova Anastasia

– Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, SUT,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation,
a.vybornova@gmail.com