

УДК 004.5

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОРГАНИЗАЦИИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА, ОСНОВАННОГО НА МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ИНТЕРФЕЙСЕ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Е.В. Бова (*bova.ev@phystech.edu*)

НИЦ Курчатовский институт, Москва
Московский физико-технический институт, Москва

В.В. Леушина (*wandbpand@gmail.com*)

НИЦ Курчатовский институт, Москва
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Аннотация. В работе описываются принципы организации человеко-машинного интерфейса (ЧМИ), основанного на «погружении» оператора в контур управления, созданного для повышения эффективности выполнения задач, поставленных перед оператором. Приводится обоснование применимости предложенного подхода в виде результатов предыдущих исследований. Описание концепции подкрепляется представлением реализации в виде прототипов некоторых ее частей. В состав ЧМИ входит система визуализации (виртуальной реальности) и мультимодальный интерфейс, способный воздействовать на оператора при помощи тепла, давления, вибрации и слабого электрического тока. «Погружение» оператора достигается за счет трансляции картины мира робота через виртуальную реальность, что заставляет человека видеть «глазами» робота, и через тактильную мультимодальность, помогающую оператору ощущать, как «чувствует» себя робот.

Ключевые слова: тактильные интерфейсы, мобильные роботы, виртуальная реальность, делегированная автономность

Введение

Существует класс технических систем (ТС), которые называются системами с делегированной автономностью. Они относятся к категории дистанционно управляемых, однако часть задач выполняется ими автоматически. Адекватное управление такими системами требует не столько максимального объема данных телеметрии, сколько информации о

состоянии ТС в оценочных, качественных параметрах или терминах, чтобы оператор полностью понимал поведение объекта управления. Это означает, что оператор должен знать, на основе каких данных или «суждений» ТС поступила определенным образом, и должен иметь максимально полное представление о его состоянии. Увеличение объема сенсорных данных, поступающих от управляемых устройств, усложняет процесс восприятия постоянно обновляемого большого потока данных: огромная нагрузка на один лишь зрительный канал связи повышает вероятность упущения человеком значимой информации. Ввиду этого возникает потребность оповещать оператора альтернативными способами. Достаточно давно ведутся исследования применения различных тактильных воздействий в качестве замены визуального оповещения или в качестве дополнительного информационного канала для оповещения пользователя [Spirkovska, 2005]. В том числе проводятся исследования о применении мультимодальности с ЧМИ [Velázquez et al., 2008].

В этой работе описаны принципы организации ЧМИ, которые должны повысить эффективность выполнения оператором поставленных перед ним задач. В его состав входят мультимодальный тактильный интерфейс и шлем-виртуальной реальности. Далее будут рассмотрены существующие решения поставленной проблемы, приведена концепция системы управления и текущие результаты ее разработки.

1 Методы представления информации

Способы передачи информации оператору о состоянии технического объекта, использующие воздействия тактильного, звукового и зрительного характера, исследуются уже давно, при этом особое место в этом ряду занимают именно тактильные воздействия [Hamza-Lup et al., 2019]. Этот подход не только снижает нагрузку на визуальный канал связи, но и условно разделяет получаемую информацию путем контролирования типа («чем воздействуют на человека?») и силы («с какой интенсивностью?») тактильного воздействия. Стоит отметить особое распространение технологий, реализующих вибротактильную обратную связь. При помощи вибраций можно добиться и простого осознания объекта [Minamizawa et al., 2008], например, манипулятором, и сенсорной замены [Eagleman, 2015], которая позволяет «ощущать» информацию другого канала связи. Огромный пласт работ, в которых в качестве связи между пользователем и устройством выступали тактильные ощущения, можно примерно поделить на две группы: нацеленные на имитацию естественных ощущений [Nabeel et al., 2016] и используемые в качестве дополнительного или единственного канала связи для предупреждения пользователя [Yamauchi, 2020].

Однако такие решения не учитывают состояние объекта в полной мере: пока ТС не действует нефункционирующие элементы интерфейса, оператор может не ощущать их существования. В результате он не будет иметь полного представления о работоспособности устройства. В работе предлагаются новые принципы организации взаимодействия оператора с технической системой, основанные на «погружении» оператора в контур управления робота. Под погружением понимается решение, способное передать информацию о ТС или окружающем ее мире так же, как его воспринимает сам управляемый аппарат.

2 Описание общей концепции системы

На основе данных, полученных от ТС, система должна транслировать состояние робота таким образом, чтобы оператор мог видеть его «глазами» и «чувствовать» его состояние. Формально опишем общую концепцию системы. Будем считать, что поведение ТС в момент времени t определено множеством его переменных состояния $X(t) = \{x_i(t)\}$. Характер величин x_i может быть самым разным: значения сенсоров, текущие потребности ТС, состояние выполнения задач и т.п. Пусть далее поведение робота Y определяется как действие некоторого математического оператора A : $Y = AX$. Разделим внешние воздействия на ТС на две группы – сигналы среды S , воспринимаемые сенсорикой робота, и внешнее управление от оператора G . Тогда

$$X(t) = X(t, S(t), G(t)) \quad (1)$$

Пусть далее оператор может воспринимать множество воздействий M разного вида – тактильные, визуальные, акустические и т.п.

$$M = \{M_{\text{такт.}}, M_{\text{виз.}}, M_{\text{акуст.}}, \dots\} \quad (2)$$

Характер этих воздействий определяется транслируемым оператору подмножеством переменных состояния X_n (аналог наблюдаемых переменных), $X_n \subseteq X$. Получаем

$$M = \Psi(X_n) \quad (3)$$

Здесь Ψ – основная функция ЧМИ, отображающая состояние ТС в воспринимаемые оператором мультимодальные воздействия. Назовем эту функцию функцией трансляции. Управляющая реакция G оператора в таком случае определяется как функция от M .

$$G = \Gamma(M) \quad (4)$$

где Γ – это т. н. функция реакций оператора.

Основная задача реализации мультимодального ЧМИ заключается в синтезе функций трансляции Ψ и функции реакции Γ (Рис. 8), обеспечивающих требуемую эффективность управления ТС, оцениваемую как значение некоторой целевой функции φ от множества переменных состояния.

$$\varphi(X) \xrightarrow{\Psi, \Gamma} opt \quad (5)$$

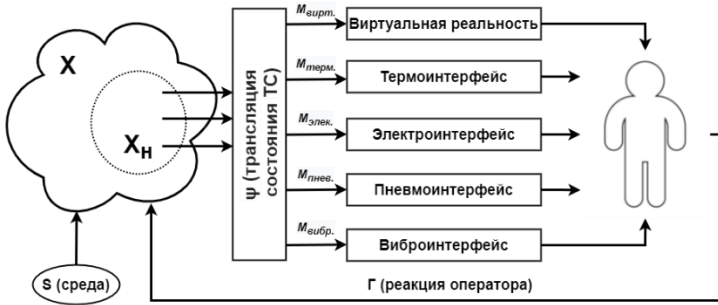


Рис. 8. Общая концепция системы

В состав ЧМИ входит система визуализации, задачей которой является передача оператору картины мира робота, и мультимодального интерфейса, необходимого для трансляции ощущений ТС (Рис. 9). На данный момент в качестве ТС используется модель робота YARP-2 лаборатории робототехники НИЦ «Курчатовского института» (Рис. 10).

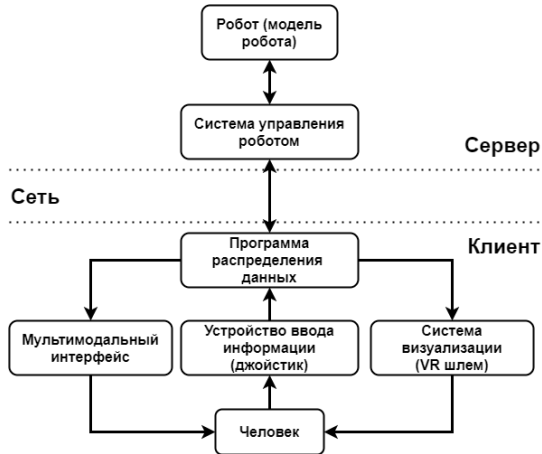


Рис. 9. Концептуальная схема

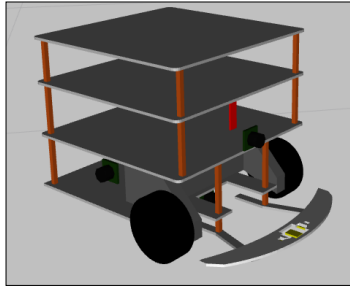


Рис. 10. Модель робота

2.1 Система визуализации

В качестве системы визуализации предлагается использовать шлем виртуальной реальности. Он позволяет усилить ощущение погружения ввиду исключения отвлекающих факторов на периферии. Ранее было проведено исследование эффективности использования интерфейса виртуальной реальности для взаимодействия с роботами [Гарифуллина, 2019]. В нем испытуемым предлагалось определить тип сообщения и номер робота, передавшего его, считывая информацию при помощи консоли, графического интерфейса или виртуальной реальности. Критерием оценки эффективности была скорость реакции оператора. Данное исследование доказало, что интерфейс виртуальной реальности не уступает по эффективности традиционным графическим интерфейсам и даже обеспечивает небольшой выигрыш по скорости реакции.

В представленной концепции основная функция виртуальной реальности заключается в двух аспектах. Во-первых, она решает проблему каналов связи. Далеко не всегда возможно передавать видеопоток от робота к оператору хотя бы для реализации режима управления «от первого лица», необходимого для реконструкции среды, в которой находится управляемая ТС. Во-вторых, виртуальная реальность затрагивает когнитивный аспект. Необходимо учитывать, что человеческое восприятие окружающего мира кардинально отличается от восприятия техническим объектом. Чтобы заставить человека «видеть» глазами аппарата, необходимо сформировать новую систему образов, характеризующих окружающую среду с «точки зрения» робота.

По сравнению с человеком робот описывает свое окружение намного проще. Для аппарата не важно, какой конкретно объект перед ним находится, для него важны лишь его форма, размер и расстояние до него. Поэтому отображение сенсорных данных в виртуальной реальности предлагается свести к отображению картины мира примитивными объектами (куб, сфера и т. п.). На данный момент реализована трансляция

распознанных объектов (данные с дальномеров) в виде объекта (сферы) в виртуальной реальности.

2.2 Мультимодальный интерфейс

Мультимодальный интерфейс осуществляет трансляцию «чувств» робота на человека при помощи четырех типов тактильного воздействия. На данный момент собран прототип мультимодальной системы с термо-, элетро- и вибротактильными интерфейсами (Рис. 11). Расположение воздействующих элементов на человеке изображено на рисунке 5.

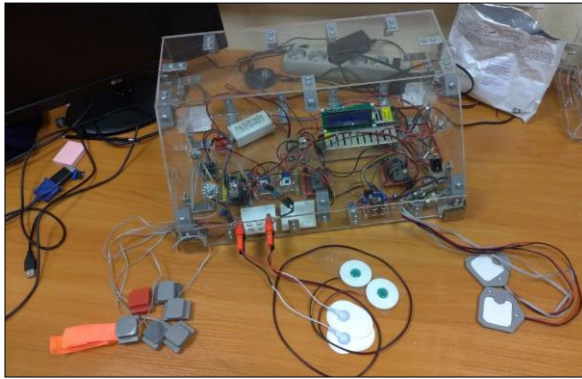


Рис. 11. Экспериментальный стенд мультимодального интерфейса

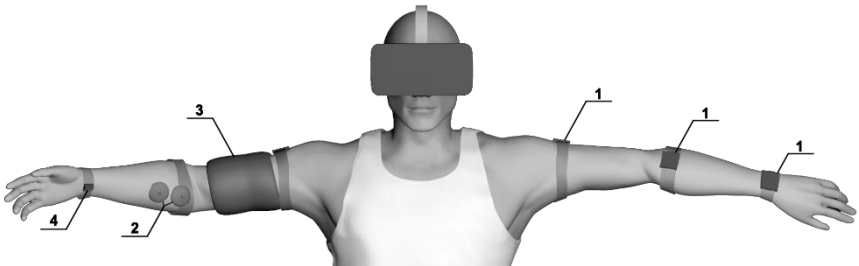


Рис. 12. Расположение на модели человека воздействующих элементов: 1 – термоинтерфейс; 2 - электроинтерфейс; 3 - пневмоинтерфейс; 4 - виброинтерфейс

Ранее были проведены исследования эффективности ранее упомянутых модальностей [Голубурдо и др., 2021]. Задача испытуемых заключалась в том, чтобы аккуратно и быстро довести робота до конечной цели. На пути робот мог встретить препятствия, столкновение с которыми приводило к падению его скорости и прибавке штрафных секунд к основному времени.

Были проведены серии экспериментов с применением и без применения различных тактильных воздействий, в которых эффективность интерфейсов оценивалась по времени решения тестовой задачи. В результате вибротактильный интерфейс повысил скорость выполнения задачи в среднем на 25%, медиана времени выполнения задания с термоинтерфейсом понизилась примерно на 15%, а электротактильный интерфейс позволил оператору быстрее достичь результата близкого к оптимальному. Далее рассмотрим каждый интерфейс отдельно.

Термотактильный интерфейс. Выступает в качестве индикатора опасной близости объектов и состояния внутренней системы. В первом случае проводится аналогия с желанием человека убрать руку от чего-то горячего, т. е. опасного (Рис. 13, а). Во втором случае интенсивность индикации показывает работоспособность робота: чем сильнее температурное воздействие, тем менее дееспособный робот (Рис. 13, б). В данном случае интенсивность меняется у всех воздействующих элементов одновременно. Аналог этого воздействия – температура человека: тем выше у него температура, тем менее он дееспособен. Структура собранного интерфейса, вошедшего в прототип мультимодальной системы, изображена на рисунке 7.

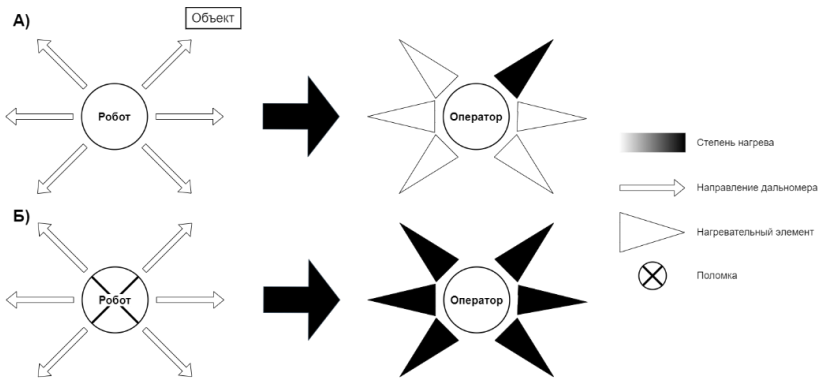


Рис. 13. Иллюстрация работы тактильного интерфейса: а) оповещение об опасной близости объекта; б) оповещение о внутренних неполадках

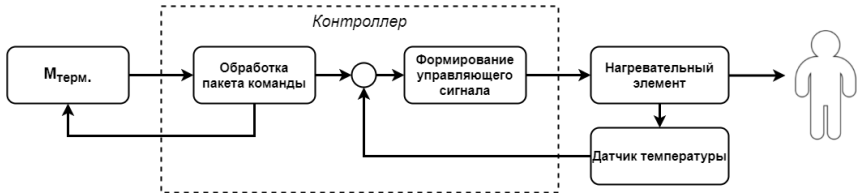


Рис. 14. Общая схема термоинтерфейса

Электротактильный интерфейс. При помощи воздействия на человека слабым электрическим током предлагается «транслировать» силу столкновения мобильного робота с объектом. Сила столкновения определяется путем анализа скорости робота перед самым столкновением: чем выше его скорость, тем сильнее аппарат столкнулся с препятствием. Подачу слабого электрического тока осуществляется по паре электродов на обеих руках. Благодаря такому расположению оператор сможет не только определить силу столкновения, но и сторону. Структура собранного интерфейса, вошедшего в прототип мультимодальной системы, изображена на рисунке 8.

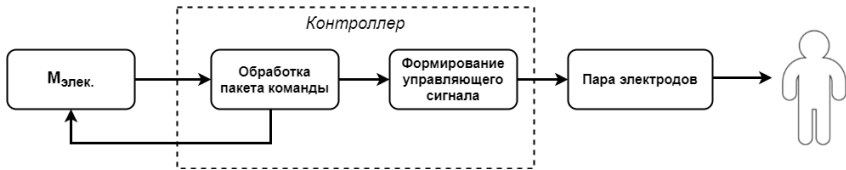


Рис. 15. Общая схема электроинтерфейса

Пневматический интерфейс. Автономная система подразумевает использование мобильных источников энергии, таких как аккумулятор. Оператору подобной системы необходимо знать о текущем состоянии заряда для предотвращения неожиданного выхода системы из строя. В качестве такого индикатора в исследовании решено использовать пневматический интерфейс. Он обладает следующей интерпретацией: при полном заряде аккумулятора манжета накачивается до плотного сжатия руки, по мере разрядки манжета сдувается, тем самым причиняя дискомфорт у оператора и желание подкачать манжету (т. е. зарядить севший аккумулятор). Структура интерфейса представлена на рисунке 9.

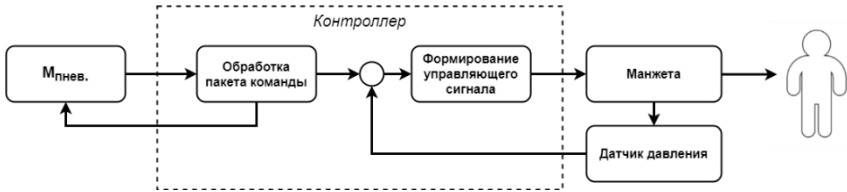


Рис. 16. Общая схема пневмоинтерфейса

Вибротактильный интерфейс. При помощи вибрации предлагается уведомлять оператора о таких событиях, как: возникновение программной ошибки в ходе работы, потеря связи или выхода из строя какого-либо компонента робота и т. п. Структура собранного интерфейса, вошедшего в прототип мультимодальной системы, изображена на рисунке 10.

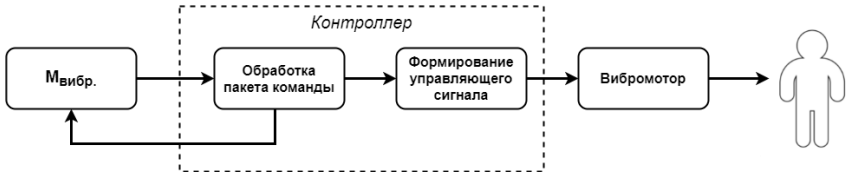


Рис. 17. Общая схема виброинтерфейса

2.3 Система оценивания состояния робота

Оператор должен понимать, в какой ситуации находится управляемый им робот: все ли его компоненты работают корректно, есть ли модули, которые вышли из строя, и способно ли устройство продолжать выполнять поставленные перед ним задачи. Для этого в системе предлагается использовать общую оценку состояния робота. Система оценивания включает в себя анализ сенсорных данных и работы его собственных модулей программы. Например, можно определить цветную систему градации: красная – возникли конфликты, из-за которых робот не может продолжить выполнение задания и требуется вмешательство оператора; желтая – произошли события, которые могут повлечь за собой возникновение конфликтов; зелёная – робот в полном порядке. Отображать состояние робота можно визуально при помощи примитивного объекта определенного цвета над моделью робота.

Заключение

Таким образом, были предложены новые принципы организации ЧМИ, основанные на «погружении» оператора в контур управления, а также было приведено описание общей концепции системы, реализующей

предложенные принципы. В рамках этой концепции были проведены первоначальные исследования виртуальной реальности [Гарифуллина, 2019] и тактильных интерфейсов [Голубурдо и др., 2021], которые доказали перспективность развития нового подхода, и в которых были апробированы ранее описанные компоненты разрабатываемого ЧМИ. Основной задачей в ближайшее время является проведение исследований влияния готовой системы на выполнение поставленных перед оператором ТС задач, по результатам которых можно будет сделать выводы об особенностях и эффективности применения предложенного подхода.

Список литературы

- [Гарифуллина, 2019] Гарифуллина К. В. “Взаимодействие с группой роботов путем отображения картины мира средствами виртуальной реальности”: выпускная квалификационная бакалаврская работа. Московский физико-технический институт, Москва, 2019.
- [Голубурдо и др., 2021] Голубурдо Е. И., Леушина В. В., и Сорокоумов П. С., “Интеллектуальная система тактильного мультимодального оповещения пользователя,” 10-я Международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 17-21 мая 2021, Коломна, т.2, 2021, pp. 37–45.
- [Eagleman, 2015] Eagleman D. Can we create new senses for humans? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.piquenewsmagazine.com/TED/archives/2015/03/19/david-eagleman-can-we-create-new-senses-for-humans>.
- [Hamza-Lup et al., 2019] Hamza-Lup F. G., Bergeron K., and Newton D., “Haptic systems in user interfaces – State of the art survey,” *ACMSE 2019 - Proc. 2019 ACM Southeast Conf.*, no. March, pp. 141–148, 2019, doi: 10.1145/3299815.3314445.
- [Minamizawa et al., 2008] Minamizawa K., Kamuro S., Kawakami N., and Tachi S., “A palm-worn Haptic display for bimanual operations in virtual environments,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5024 LNCS, pp. 458–463, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-69057-3_59.
- [Nabeel et al., 2016] Nabeel M., Aqeel K., Ashraf M. N., Awan M. I., and Khurram M., “Vibrotactile stimulation for 3D printed prosthetic hand,” *2016 2nd Int. Conf. Robot. Artif. Intell. ICRAI 2016*, no. November, pp. 202–207, 2016, doi: 10.1109/ICRAI.2016.7791254.
- [Spirkovska, 2005] Spirkovska L., “Summary of Tactile User Interfaces Techniques and Systems,” *NASA Ames Res. Center; Moffett Field, CA, United States*, no. January 2005, p. 39p, 2005.
- [Velázquez et al., 2008] Velázquez R. and Pissaloux E. E., “Tactile Displays in Human-Machine Interaction : Four Case Studies,” *Int. J. Virtual Real.*, vol. 7, no. 2, pp. 51–58, 2008.
- [Yamauchi, 2020] Yamauchi Y., “Vibro-tactile Notification in Different Environments for Motorcyclists,” no. c, pp. 59–65, 2020.