

Технология информационного взаимодействия VR-оборудования с программными компонентами системы виртуального окружения

А. В. Мальцев, Д. В. Омельченко

Федеральное государственное учреждение "Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук", Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматривается реализация информационной связи между различными составляющими программного комплекса системы виртуального окружения и устройствами виртуальной реальности (VR) на примере VR-гарнитуры Oculus Rift, контроллеров Oculus Touch и пульта Oculus Remote. Предлагается оригинальный подход к созданию блока для схемы управления виртуальным наблюдателем, использующий передачу данных на основе сетевого соединения.

Ключевые слова: виртуальное окружение, управление, сеть, визуализация, стерео, трехмерная сцена, VR-гарнитура.

DOI 10.14357/20718632210301

Введение

В настоящее время в области компьютерного моделирования наблюдается активная разработка и создание имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения (СВО), основанных на применении возможностей виртуальной реальности [1]. Существующие и перспективные VR-технологии выступают в качестве эффективного средства подготовки квалифицированного персонала и операторов технических устройств. С их помощью достигается высокая степень погружения обучаемого человека в синтезируемое виртуальное пространство. Такая модель обучения имеет

ряд существенных преимуществ по сравнению с классическими подходами. Во-первых, решения на базе виртуальной реальности подразумевают полную замену окружающей обстановки на трехмерную виртуальную сцену, которую оператор видит с помощью VR-гарнитур или шлемов. Таким образом, пропадает необходимость в реализации реальных моделей сложных динамических комплексов и систем, а также окружающего их пространства, которые часто требуют значительных финансовых затрат на производство и обслуживание. Виртуальная же сцена, создаваемая в одной из систем трехмерного компьютерного моделирования (3ds Max, Maya и т.п.) существенно проще с точки зрения поддержки и модернизации. Во-вторых, внедря-

* Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2021-0012 «Системы виртуального окружения: технологии, методы и алгоритмы математического моделирования и визуализации. 0580-2021-0012» (Рег.№ 121031300061-2).

емые в имитационно-тренажерные комплексы и СВО VR-решения обеспечивают осязаемое улучшение качества визуального восприятия виртуальной среды обучаемым человеком, что приближает ее к реальной среде и повышает эффективность подготовки операторов.

Поскольку применение VR-технологий в образовательных и обучающих целях пока еще является относительно новым явлением, то актуальным является исследование вопроса целесообразности данного вида обучения. Так, авторы работы [2] приходят к выводу, что виртуальная реальность позволяет учащемуся испытать широкий спектр сценариев, включая те, которые физически невозможно создать в рамках класса или какого-то другого помещения. Подчеркивается большой диапазон охвата областей обучения (от естественных наук и математики до истории, археологии и культурного наследия), а также возможность визуализировать макроскопический и микроскопический миры в человеческом масштабе, что дает возможность прийти к пониманию сущностей и явлений, которого невозможно было бы достичь с помощью классических методов. Целесообразность и эффективность использования VR-технологий в качестве полноценного инструмента для подготовки квалифицированного персонала подробно рассмотрена в публикации [3].

Программные и аппаратные возможности виртуальной реальности применяются для создания тренажерных и обучающих систем и СВО в различных областях человеческой деятельности. Например, в работе [4] демонстрируется использование тренажера, построенного на аппаратной базе VR-гарнитуры и устройства Oculus Touch, с целью обучения работников нефтяной промышленности. Обучающие системы, создаваемые на основе VR-технологий, также применяются для общей подготовки персонала на случай нештатных ситуаций [5]. Методы тренировок на базе виртуальной реальности приобретают особую актуальность в тех областях, где невозможно или весьма затруднительно физическое воссоздание окружающей обстановки. Ярким представителем является область изучения и освоения космоса, которая требует подходов к подготовке космонавтов в обучающих центрах на земле. Примером использования

VR-технологий в данной области служат тренажеры [6, 7], предназначенные для обучения человека управлению космическими аппаратами и выполнению задач в условиях внекорабельной деятельности. В работе [8] для тренировки космонавтов выходу в открытый космос рассмотрены решения, включающие несколько систем трекинга, которые позволяют отслеживать движения различных частей тел человека (рук, ног и головы). Авторами статьи [9] был разработан симулятор управления пилотируемым космическим аппаратом с помощью джойстиков в рамках задачи перспективного освоения Луны. Также широкое распространение получили аппаратные решения лаборатории NASA [10], в которых обучение космонавтов происходит на базе VR-технологий.

Одной из важных задач при создании любой системы, использующей средства виртуальной реальности, является разработка методов и подходов для обмена данными между ее программным комплексом и VR-оборудованием. Существуют различные типы и архитектуры таких систем [2, 11, 12], что определяет необходимость реализации того или иного механизма передачи информации. В настоящей работе рассматриваются оригинальная технология организации информационного взаимодействия между комплектом VR-оборудования Oculus и СВО. Новизной предлагаемого подхода является двухкомпонентная схема подключения таких устройств к программному комплексу СВО, состоящему из нескольких элементов, с использованием модели клиент-сервер и передачей данных по сетевому протоколу. Также применяются механизмы подключения на основе функциональных схем управления, являющиеся развитием подходов из работы [13].

1. Программный комплекс СВО

Рассмотрим предлагаемую технологию подключения VR-оборудования к СВО на примере реализации информационного взаимодействия связки устройств Oculus (Rift CV1, Touch и Remote) с программным комплексом VirSim, разработанным в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН и включающим три основные компоненты: систему управления, систему динамики и систему

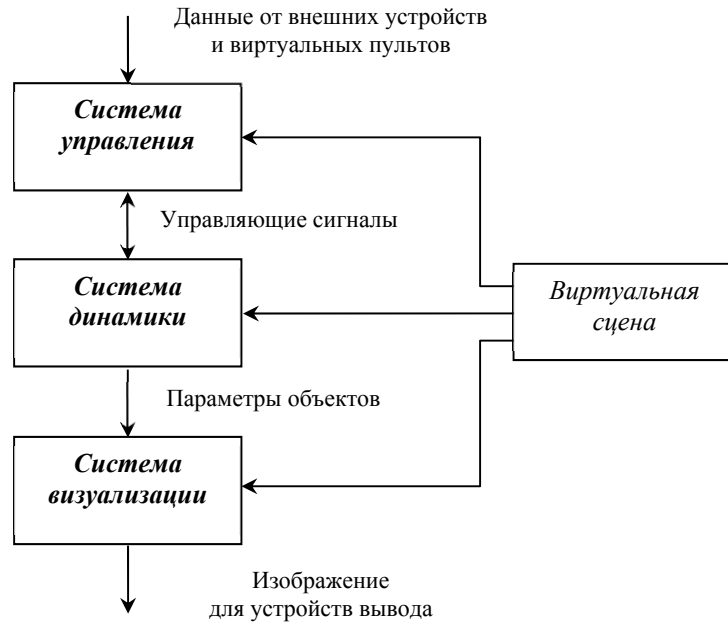


Рис. 1. Программная часть системы виртуального окружения

визуализации. Схематичная структура данного комплекса представлена на Рис. 1. Каждая из компонент функционирует в виде отдельного процесса. Взаимодействие между ними производится посредством общей оболочки и специально разработанных протоколов.

Принцип работы комплекса заключается в следующем. В ходе инициализации СВО производится загрузка трехмерной виртуальной сцены, содержащей данные об объектах (полигональная геометрия, текстуры, положение, ориентация и т.д.) и их динамических характеристиках (центр масс, вес, скорость, ускорение и т.д.), а также функциональные схемы и вир-

туальные пульты управления [14, 15]. Примеры такой схемы и пультов показаны на Рис. 2 и 3. Кроме того, чтобы обеспечить взаимодействие пользователя с виртуальной средой, в сцену, как правило, вводится ассоциируемый с ним виртуальный наблюдатель. В минимальной конфигурации он содержит пару виртуальных камер (для левого и правого глаз), пару моделей кистей рук и собственную функциональную схему. Задача системы управления состоит в получении данных от виртуальных пультов в сцене и внешних реальных USB-устройств, например, джойстиков или других контроллеров, и расчете на их основе всех имеющихся

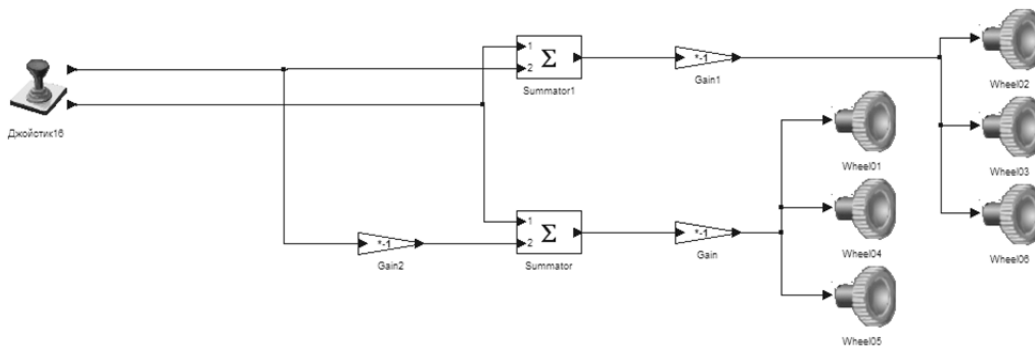


Рис. 2. Пример функциональной схемы управления колесами робота от джойстика

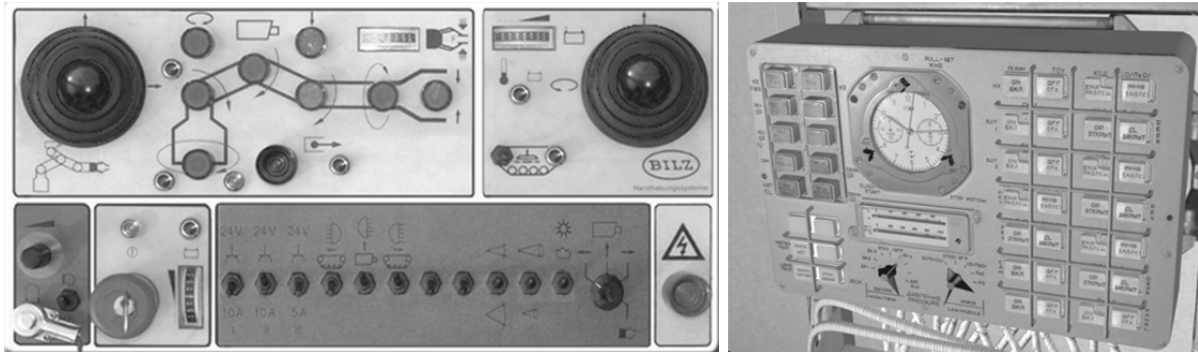


Рис. 3. 2D и 3D виртуальные пульты управления

функциональных схем. В результате такого расчета формируются управляющие сигналы, передаваемые в систему динамики. Используя поступившие сигналы, она вычисляет текущие значения характеристик динамических объектов, включая положение и ориентацию в виртуальном пространстве, определяет и разрешает коллизии объектов друг с другом. Изменившиеся положения и ориентации объектов отправляются в систему визуализации. Она же, в свою очередь, выполняет распределенный рендеринг объектов сцены с расчетом реалистичной освещенности их поверхностей, наложением текстур и моделированием различных эффектов (таких, как помехи, свойства оптики и электроники камеры) и явлений (дождь, туман и т.д.). Результатом работы системы визуализации является моно- или стереоизображение, передаваемое на устройство вывода.

Описанный программный комплекс функционирует в масштабе реального времени и обеспечивает поддержку двух режимов работы. Основной режим предполагает задействование всех имеющихся компонентов для СВО. Также возможно использование только системы визуализации, что позволяет осуществлять визуальную инспекцию виртуальной среды без взаимодействия с ней.

2. Блок управления от устройств Oculus

Интеграция VR-оборудования Oculus в рассмотренный выше комплекс подразумевает реализацию информационного взаимодействия с двумя его компонентами: системами управле-

ния и визуализации. Система управления должна иметь доступ к данным о положении и ориентации гарнитуры Rift и контроллеров Touch, а также состоянию кнопок и других элементов управления, размещенных на контроллерах Touch и пульте Remote. Система визуализации формирует стереопару с изображениями виртуальной среды, соответствующими положению и ориентации головы пользователя, погружение которого в эту среду имитируется системой. Чтобы пользователь смог увидеть эти изображения своими глазами, стереопару необходимо передать в гарнитуру Rift. Кроме того, для обеспечения режима обособленного функционирования системы визуализации, упомянутого в п.1, она также должна получать информацию с датчиков ориентации гарнитуры и сигналы нажатия кнопок пульта, как и система управления.

Возникающая в данном случае проблема заключается в том, что инициализация канала приема/передачи информации с устройствами Oculus возможна только в рамках одного процесса. То есть нельзя одновременно получить доступ к устройствам и в системе управления, и в системе визуализации. Чтобы решить эту задачу, в данной работе предлагается подход, при котором реализуется прямая информационная связь между VR-оборудованием и системой визуализации, а также канал транзита необходимых системе управления данных с устройств Oculus через систему визуализации до функциональной схемы управления виртуальным наблюдателем посредством сетевого протокола UDP. Схема взаимодействия показана на Рис. 4. Для этого в системе визуализации необходимо

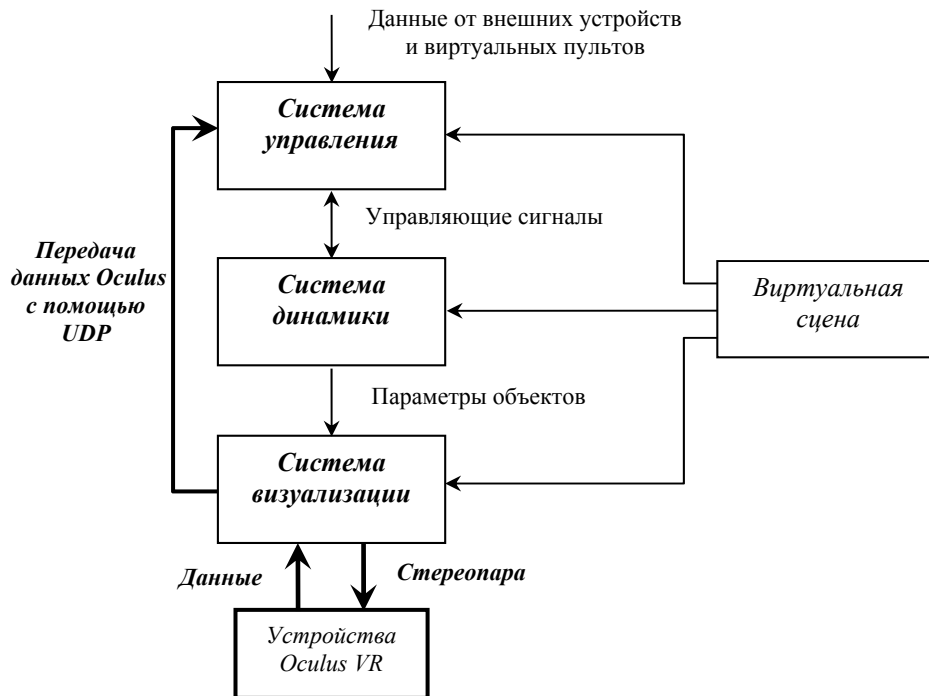


Рис. 4. Схема взаимодействия Oculus VR с программными компонентами СВО

реализовать модуль-клиент, взаимодействующий с VR-устройствами посредством Oculus SDK и осуществляющий отправку сетевых пакетов в систему управления, а в библиотеке элементов для функциональной схемы – специальный блок, который выступает в качестве сервера.

Модуль системы визуализации с определенной периодичностью запрашивает данные с VR-гарнитуры Rift, контроллеров Touch и пульта Remote. Ориентация контроллеров и гарнитуры возвращается в виде кватернионов, из которых вычисляются углы Эйлера относительно базовой системы координат, настраиваемой в процессе установки драйверов для оборудования Oculus, или пользовательской начальной системы координат, задаваемой с помощью функции *ovr_RecenterTrackingOrigin* из Oculus SDK. Вещественные значения положений и углов ориентации устройств Rift и Touch, отклонения джойстиков и элементов управления на контроллерах, а также целочисленные значения состояний кнопок контроллеров и пульта сохраняются модулем в специальную структуру данных. При формировании сетевого пакета эта структура записывается в него в виде массива байтов, после чего пакет

передается на отправку. Полученные модулем данные поступают также в систему визуализации, если она работает независимо от других систем программного комплекса СВО, где используются для изменения положения и ориентации текущей виртуальной камеры.

Упомянутый выше блок управления встраивается в функциональную схему для виртуального наблюдателя. В процессе расчета схемы системой управления блок принимает и разбирает посланные модулем-клиентом пакеты. При этом из пакета извлекается байтовый массив и восстанавливается та же структура данных, которая использовалась в модуле. При необходимости блок может производить дополнительную обработку полученных данных. Принятые координаты и углы ориентации VR-устройств, а также состояния нажатия кнопок на них, поступают на выходы блока, с которых далее передаются по линиям связи на другие элементы схемы.

3. Результаты

На основе созданных в работе решений был разработан программный модуль для системы визуализации и плагин-блок Oculus Control

для функциональных схем управления. Созданный модуль обеспечивает взаимодействие устройств Oculus с системой визуализации и отправку сетевых пакетов с полученными от устройств данными в плагин-блок. Инициализация информационного соединения модуля с блоком по протоколу UDP выполняется в автоматическом режиме на этапе загрузки сцены в СВО. Блок Oculus Control, показанный на Рис. 5, содержит 53 выхода, сгруппированные по принадлежности формируемых на них сигналов к тому или иному устройству, как показано в Табл. 1, и именуемых в формате "Имя группы"_"Выход".

Разработанный блок был применен и протестирован при реализации функциональной схемы управления виртуальным наблюдателем в сцене интерьера космического модуля Пирс. Используя данные с VR-устройств Oculus, поступающие посредством модуля-клиента и блока Oculus Control, она позволяет осуществлять перемещение наблюдателя внутри модуля, повороты головы и кистей рук, сгибы пальцев, что необходимо для взаимодействия с другими

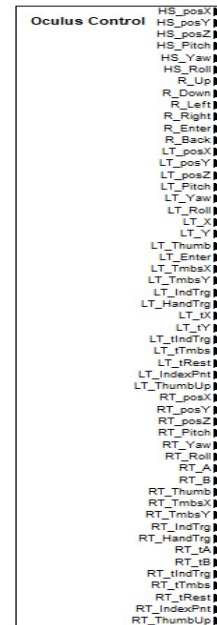


Рис. 5. Блок Oculus Control

элементами виртуальной среды, например, с клавишами трехмерной модели пульта, показанного на Рис. 6.

Табл. 1. Группы выходов блока Oculus Control (начало)

Имя группы	Устройство	Выходы	Описание
HS	Гарнитура Rift	posX, posY, posZ	Координаты положения, \mathbb{R}
		Pitch, Yaw, Roll	Углы ориентации, $[-180.0, 180.0]$
R	Пульт Remote	Up, Down, Left, Right, Enter, Back	Статус нажатия кнопок, 0/1
LT	Левый контроллер Touch	posX, posY, posZ	Координаты положения, \mathbb{R}
		Pitch, Yaw, Roll	Углы ориентации, $[-180.0, 180.0]$
		X, Y, Thumb, Enter	Статус нажатия кнопок, 0/1
		TmbsX, TmbsY	Координаты джойстика по горизонтальной и вертикальной осям, $[-1.0, 1.0]$
		IndTrg, HandTrg	Нажатие триггеров указательного и среднего пальцев, $[0.0, 1.0]$
		tX, tY, tIndTrg, tTmbs, tRest	Статус касания кнопок, триггера, джойстика и сенсорной площадки, 0/1
		IndexPnt, ThumbUp	Статус полного распрямления указательного и большого пальцев, 0/1

Табл. 1. (окончание)

Имя группы	Устройство	Выходы	Описание
RT	Правый контроллер Touch	posX, posY, posZ	Координаты положения, \mathbb{R}
		Pitch, Yaw, Roll	Углы ориентации, $[-180.0, 180.0]$
		A, B, Thumb	Статус нажатия кнопок, 0/1
		TmbsX, TmbsY	Координаты джойстика по горизонтальной и вертикальной осям, $[-1.0, 1.0]$
		IndTrg, HandTrg	Нажатие триггеров указательного и среднего пальцев, $[0.0, 1.0]$
		tA, tB, tIndTrg, tTmbs, tRest	Статус касания кнопок, триггера, джойстика и сенсорной площадки, 0/1
		IndexPnt, ThumbUp	Статус полного распрямления указательного и большого пальцев, 0/1

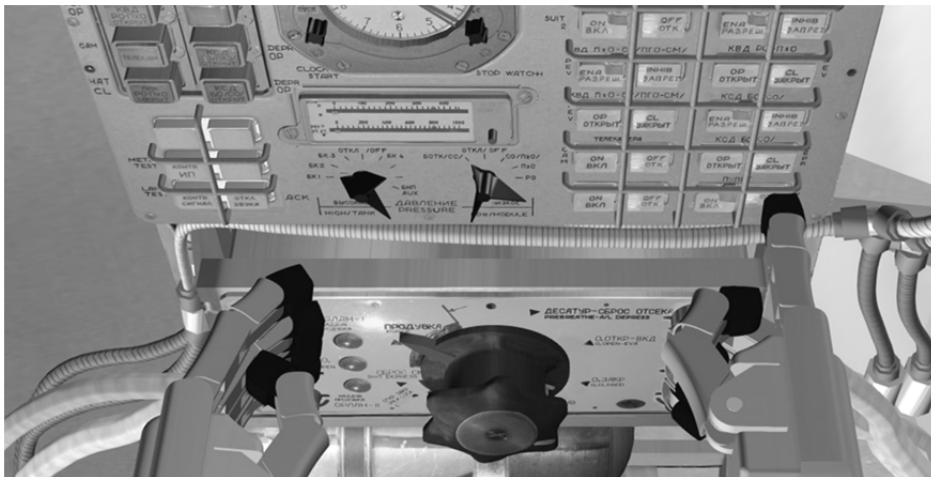


Рис. 6. Управление руками виртуального наблюдателя в трехмерной сцене

Предложенная технология и блок Oculus Control были применены также в задаче моделирования процесса спасения космонавта в случае непредвиденной ситуации его отрыва от Международной космической станции (МКС). В реальности спасение осуществляется с помощью управляемого реактивного ранца, одеваемого на скафандр и обеспечивающего возможность возврата космонавта к МКС. В разработанном нами тренажере оператор погружается в синтезируемую компьютером космическую среду с помощью VR-гарнитуры Oculus Rift CV1. Трекинг его головы обеспечивается с помощью упомянутой гарнитуры, а

рук – оригинальной конфигурацией применения контроллеров Oculus Touch и VR-перчаток Manus Prime II на Рис. 7. При этом, движения реальных кистей рук копируются виртуальными моделями рук, что позволяет оператору воздействовать своими собственными руками на виртуальные элементы управления, расположенные на пульте виртуальной модели реактивного ранца.

Апробация разработанных решений в упомянутых задачах показала адекватность и эффективность их использования при создании тренажерных комплексов и систем на базе виртуальной реальности.



Рис. 7. Тренировка оператора с применением Oculus Rift, Oculus Touch и Manus Prime II

Заключение

В данной работе представлен оригинальный подход к обеспечению информационного взаимодействия VR-оборудования Oculus одновременно с несколькими программными компонентами системы виртуального окружения. Его преимуществом является относительная простота реализации, не требующая изменений имеющихся межкомпонентных связей, а также возможность работы такого оборудования как со всем программным комплексом целиком, так и непосредственно с одной лишь системой визуализации. Значимость полученных результатов состоит в возможности их применения при разработке программного обеспечения имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения. Практическим вкладом данной работы в рассматриваемую область являются программный модуль для системы визуализации трехмерных виртуальных сцен и плагин-блок для управляющих схем, созданные на базе описанных в статье решений. Они обеспечивают интеграцию VR-устройств Oculus в систему виртуального окружения и систему визуализации. Реализация программных компонентов выполнялась с использованием возможностей языка C++, Oculus SDK и WinAPI.

Созданные решения прошли успешную апробацию в составе СВО VirSim, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

Литература

1. Boletsis C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology // *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017. Vol.1, No.4. P.1-17.
2. Christou C. Virtual reality in education // *Affective, interactive and cognitive methods for e-learning design: creating an optimal education experience*. 2010. P.228-243.
3. Селиванов В.В., Селиванова Л.Н. Виртуальная реальность как метод и средство обучения // *Образовательные технологии и общество*. 2014. Том 17, №3. С.378-391.
4. VR тренажер. Виртуальная реальность в обучении. Нефтяная промышленность // *XR PRO*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=keXlfMKyxsI> (дата обращения: 29.03.2021).
5. VR-тренажер. Действия при пожаре // *DreamPort*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cm9vFeB18X8> (дата обращения: 29.03.2021).
6. Stone R., Panfilov P., Shukshunov V. Evolution of aerospace simulation: From immersive virtual reality to serious games // *In Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on*, June 2011, P.655-662.
7. Cater J.P., Huffman S.D. Use of the remote access virtual environment network (RAVEN) for coordinated IVA-EVA astronaut training and evaluation // *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1995, Vol.4, No.2, P.103-109.
8. Yuqing L., Shanguang C., Guohua J., Xiuqing Z., Ming A., Xuewen C., Bohe Z., Yubin X. VR simulation system for EVA astronaut training // *Proceedings of AIAA Space 2010 Conference & Exposition*, Anaheim California, 2010.
9. Bruguera M.B., Ilk V., Ruber S., Ewald R. Use of virtual reality for astronaut training in future space missions – spacecraft piloting for the Lunar Orbital Platform – Gateway (LOP-G) // *70th International Astronautics Congress*, Washington D.C., 2019.
10. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training astronauts using hardware-in-the-loop simulations and virtual reality // *AIAA SciTech Forum*, Orlando, FL, 2020.
11. Lin J., Guo X., Shao J., Jiang C., Zhu Y., Zhu S. A virtual reality platform for dynamic human-scene interaction // *SIGGRAPH ASIA 2016 Virtual Reality meets Physical Reality: Modelling and Simulating Virtual Humans and Environments*. 2016. No.11. P.1-4.
12. Blauert J. The advent of Communication Acoustics in retrospect // *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics (ICA)*. 2016. Vol.28, No.1, P.1-10.
13. Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов // *Программные продукты и системы*. 2014. № 4. С.10-15.
14. Хураськин И.А. Взаимодействие с виртуальными пультами управления сложными процессами // *Ин-*

формационные технологии и вычислительные системы. 2007. №2. С.31-41.

15. Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Моделирование и визуализация трехмерных виртуальных пультов

управления в тренажерах // Научная визуализация. 2014. Том 6, №4. С.50-60.

Мальцев Андрей Валерьевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: 93. Область научных интересов: компьютерная графика, системы виртуальной реальности, информационные технологии. E-mail: avmaltcev@mail.ru

Омельченко Денис Викторович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: виртуальное моделирование, информатика, компьютерная графика. E-mail: omelchenko_dv@mail.ru

The Technology of VR Equipment Interaction with Software Components of Virtual Environment System

A. V. Maltsev, D. V. Omelchenko

Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" (SRISA RAS), Moscow, Russia

Abstract. The paper presents an implementation of information communication between various software components of virtual environment system and virtual reality (VR) devices, using the example of Oculus Rift VR headset, Oculus Touch controllers and Oculus Remote. The original approach is proposed to create a block for control scheme of virtual observer by means of data transmission via network connection.

Keywords: virtual environment, control, network, visualization, stereo, three-dimensional scene, VR headset.

DOI 10.14357/20718632210301

References

1. Boletsis C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology // *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017. Vol.1, No.4. P.1-17.
2. Christou C. Virtual reality in education // *Affective, interactive and cognitive methods for e-learning design: creating an optimal education experience*. 2010. P.228-243.
3. Selivanov V.V., Selivanova L.N. Virtualnaia realnost kak metod i sredstvo obucheniia [Virtual reality as method and means of learning] // *Obrazovatelnye tekhnologii i obshchestvo [Educational Technology and Society]*. 2014. Vol. 17, No.3. P.378-391.
4. VR trenazher. Virtualnaia realnost v obuchenii. Neftianaiia promyshlennost [VR simulator. Virtual reality in learning. Oil industry] // *XR PRO*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=keXlfMKyxsl> (accessed: March, 29, 2021)
5. VR-trenazher. Deistviia pri pozhare [VR Fire Safety Training] // *DreamPort*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cm9vFeB18X8> (accessed: March, 29, 2021)
6. Stone R., Panfilov P., Shukshunov V. Evolution of aerospace simulation: From immersive virtual reality to serious games // *In Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on*, June 2011, P.655-662.
7. Cater J.P., Huffman S.D. Use of the remote access virtual environment network (RAVEN) for coordinated IVA-EVA astronaut training and evaluation // *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1995, Vol.4, No.2, P.103-109.
8. Yuqing L., Shanguang C., Guohua J., Xiuqing Z., Ming A., Xuewen C., Bohe Z., Yubin X. VR simulation system for EVA astronaut training // *Proceedings of AIAA Space 2010 Conference & Exposition, Anaheim California*, 2010.
9. Bruguera M.B., Ilk V., Ruber S., Ewald R. Use of virtual reality for astronaut training in future space missions –

- spacecraft piloting for the Lunar Orbital Platform – Gateway (LOP-G) // 70th International Astronautics Congress, Washington D.C., 2019.
10. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training astronauts using hardware-in-the-loop simulations and virtual reality // AIAA SciTech Forum, Orlando, FL, 2020.
 11. Lin J., Guo X., Shao J., Jiang C., Zhu Y., Zhu S. A virtual reality platform for dynamic human-scene interaction // SIGGRAPH ASIA 2016 Virtual Reality meets Physical Reality: Modelling and Simulating Virtual Humans and Environments. 2016. No.11. P.1-4.
 12. Blauert J. The advent of Communication Acoustics in retrospect // Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics (ICA). 2016. Vol.28, No.1, P.1-10.
 13. Mikhaylyuk M.V., Torgashev M.A. Vizualnyi redaktor i modul rascheta funktsionalnykh skhem dlia imitatsionno-trenazhernykh kompleksov [The visual editor and calculation module of block diagrams for simulation and training complexes] // Programmnye produkty i sistemy [Software & Systems]. 2014. No.4. P.10-15.
 14. Khuraskin I.A. Vzaimodeistvie s virtualnymi pultami upravleniia slozhnymi protsessami [Interaction with virtual control panels for complex processes] // Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy [Information Technologies and Computation Systems]. 2007. No.2. P.31-41.
 15. Mikhaylyuk M.V., Torgashev M.A. Modelirovanie i vizualizatsiia trekhmernykh virtualnykh pultov upravleniia v trenazherakh [Modeling and visualization of 3D virtual consoles in simulators] // Nauchnaia vizualizatsiia [Scientific Visualization]. 2014. Vol.6, No.4. P.50-60.

Maltsev A. V. PhD. Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, 36/1 Nakhimovskiy Av., Moscow, 117218, Russia, e-mail: avmaltcev@mail.ru

Omelchenko D. V. Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, 36/1 Nakhimovskiy Av., Moscow, 117218, Russia, e-mail: omelchenko_dv@mail.ru