

Моделирование систем видео наблюдения в 3D сценах для виртуального окружения*

А. В. Мальцев, Д. В. Омельченко

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

Аннотация. В работе рассматриваются методы и подходы для моделирования управляемых комплексов видеонаблюдения в системах виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексах на примере прототипа тренажера посадки пилотируемого космического корабля на лунную поверхность. Оригинальные решения включают принципы создания виртуальных моделей устройств наблюдения и отображения изображения в системе трехмерного моделирования Autodesk 3ds Max, методы имитации работы реальной камеры и экрана, а также осуществление управления системой наблюдения посредством трехмерного виртуального пульта.

Ключевые слова: виртуальное окружение, тренажерные комплексы, текстура, камера, экран, схема управления, посадка на Луну.

DOI 10.14357/20718632220403

Введение

Системы виртуального окружения получили широкое распространение во многих сферах человеческой деятельности от индустрии компьютерных игр до задач обучения квалифицированных специалистов [1-5]. В этих системах человек посредством VR-гарнитуры погружается в виртуальную среду, где окружающие объекты заменяются их виртуальными моделями [6-8]. В современной жизни важную роль играют такие объекты, как средства получения и отображения видеосигнала о происходящих в каком-либо месте событиях, объединяемые в комплексы видеонаблюдения. Они применяются, например, в автотранспорте с целью контроля водителем слепых зон, в беспилотных летательных аппара-

тах для осуществления ручного управления траекторией движения и обзора территории, в космических кораблях для обеспечения процессов стыковки с МКС и посадки на поверхность планет. Поэтому разработка эффективных методов и подходов к моделированию комплексов видеонаблюдения в системах виртуального окружения является важной и актуальной задачей.

В области создания и развития технологий виртуального моделирования систем видеонаблюдения и их элементов ведутся активные исследования. Основными направлениями таких исследований являются реализация виртуальных устройств наблюдения с учетом параметров их реальных прототипов, а также обработка получаемых с помощью этих устройств изображений трехмерных сцен на базе технологий

* Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2022-0012 «Системы виртуального окружения: технологии, методы и алгоритмы математического моделирования и визуализации. 0580-2022-0012».

компьютерного зрения. Например, в работах [9-11] описываются методы и подходы к моделированию видеокамер в виртуальной среде в части рендеринга видимых ими изображений с учетом характеристик реальных устройств. Авторы публикации [12] рассматривают задачу реализации в трехмерных сценах сети виртуальных камер с автоматическим управлением, которая обеспечивает контроль перемещения подвижных объектов, попадающих в поле зрения этих камер. Несмотря на хороший уровень проработки многих важных аспектов в рассматриваемой области, недостаточно внимания уделено задаче комплексного моделирования систем видеонаблюдения в виртуальном окружении, включавшего бы реализацию виртуальных устройств наблюдения и отображения, а также управления ими оператором, погруженным в виртуальное пространство.

В данной работе предлагаются методы и подходы для моделирования комплексов видеонаблюдения в системах виртуального окружения и тренажерах, включая создание моделей базовых элементов таких комплексов в среде проектирования трехмерных сцен. Также рассматривается применение этих методов и подходов при построении виртуальной системы видеонаблюдения для прототипа VR-тренажера посадки пилотируемого космического корабля на поверхность Луны. Новизной разработанных решений является реализация нового типа текстурных карт, необходимых для создания моделей устройств отображения в виртуальной среде. Такие текстуры позволяют использовать произвольный виртуальный объект или его часть в качестве экрана, который показывает изображения с одной из виртуальных камер сцены. Кроме того, в работе применяется оригинальный подход к организации управления элементами моделей комплексов видеонаблюдения на основе функциональных схем и трехмерных виртуальных пультов управления.

1. Реализация элементов комплекса видео наблюдения в системе моделирования

Для обеспечения возможности проектирования комплексов видеонаблюдения в трехмер-

ной виртуальной среде в данной работе предлагается технология, основанная на интеграции в систему моделирования Autodesk 3ds Max специального программного модуля (плагины). Данный модуль позволяет реализовать важнейшие элементы такого комплекса, а именно: виртуальные модели устройства наблюдения и устройства отображения с характерными для них физическими и оптическими свойствами. Создание плагина выполняется с помощью средств программирования на встроенном в систему моделирования скриптовом языке.

Виртуальная модель устройства наблюдения (видеокамеры) в трехмерной сцене включает в себя геометрическую модель и объект виртуальной камеры. Геометрическая модель – это совокупность текстурированных полигонов-треугольников, создающая визуальное представление устройства. Обычно она повторяет какой-либо реальный прототип и может быть реализована стандартными средствами 3ds Max. Виртуальная камера используется при рендеринге изображения трехмерной сцены, видимого моделируемым устройством, и иерархически связана с геометрической моделью, являясь ее дочерним узлом. Стандартная камера 3ds Max обладает ограниченным количеством параметров и не охватывает необходимый набор физических и оптических свойств, требуемых для имитации реального устройства. Разработанный плагин добавляет в систему моделирования новый объект *"Физическая камера"*. Наряду с базовыми свойствами, данная виртуальная камера позволяет задавать такие параметры, как физический размер матрицы устройства, фокусное расстояние объектива, диафрагму и следящий автофокус. Свиток настроек объекта *"Физическая камера"* проиллюстрирован в левой части Рис. 1.

Визуальное представление модели устройства отображения (экран, монитор и т.д.) также основано на полигональной геометрии с применением материалов и текстур. Чтобы наложить полученные виртуальной камерой изображения сцены на необходимую область такой модели, в данной работе предлагается новый тип текстурной карты, названный *"Виртуальным экраном"*. В правой части Рис. 1 показан свиток настроек такой текстуры, который

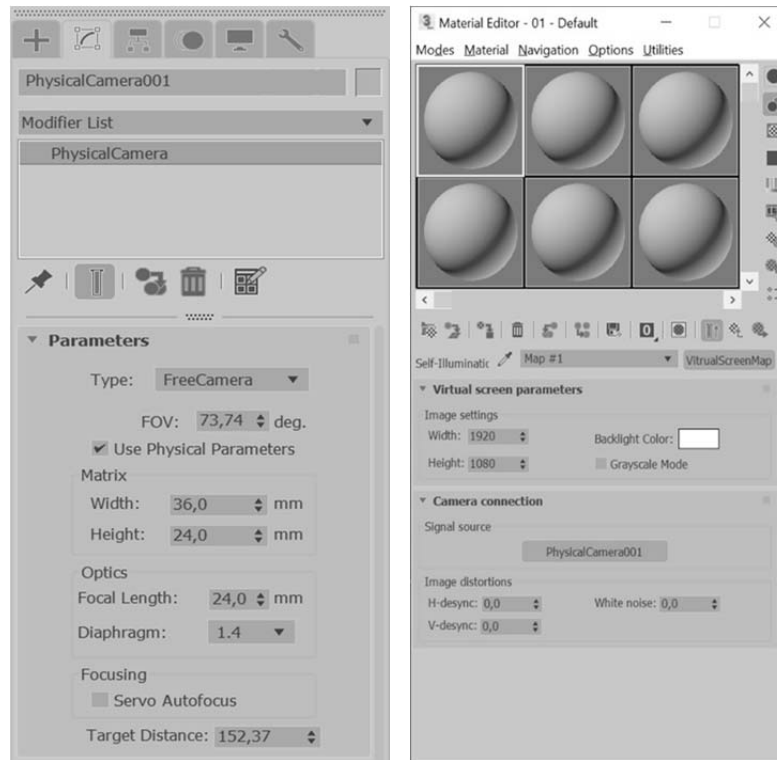


Рис. 1. Свитки настроек новой виртуальной камеры с физическими параметрами (слева) и нового материала "Виртуальный экран" (справа) в 3ds Max

включает два блока, а именно, параметры моделируемого экрана и параметры соединения с устройством наблюдения. Первый блок позволяет выбирать разрешение выводимых изображений в пикселах, корректировать интенсивность подсветки пикселей экрана по цветовым каналам R, G, B, а также устанавливать режим отображения в оттенках серого цвета. Основным параметром второго блока является *Signal source*, который определяет одну из виртуальных камер сцены в качестве источника изображения для рассматриваемой текстурной карты. Фактически, он устанавливает связь между устройством наблюдения и устройством отображения. Кроме того, существует возможность имитации искажений сигнала, которые могут возникать в электронных системах реальных устройств и в каналах передачи информации между ними. Это обеспечивается настройками коэффициентов k_h , k_v срыва синхронизации (горизонтальной и вертикальной) в полях *H-desync*, *V-desync* и величины k_{wn} так называемого белого шума в поле *White noise*. Подход к реализации моделей устройств отображения с

применением текстурной карты "Виртуальный экран" позволяет реализовывать для них область вывода изображения с произвольной геометрической формой.

2. Синтез текстуры "Виртуальный экран"

Одной из основных задач, решаемых в рамках предлагаемого подхода к моделированию комплексов видеонаблюдения является реализация в системе визуализации трехмерных сцен нового типа текстурной карты "Виртуальный экран" с учетом параметров связанной с ней виртуальной камеры. Чтобы решить эту задачу, каждый раз перед рендерингом основного кадра необходимо выполнить этап предобработки, состоящий в синтезе изображения для каждой из используемых в сцене текстур типа "Виртуальный экран". Структурная схема такого процесса показана на Рис. 2.

Вначале определяется пирамида видимости на основе фокусного расстояния f объектива и размеров W_M , H_M матрицы виртуальной камеры



Рис. 2. Схема синтеза изображения для текстуры "Виртуальный экран"

типа "Физическая камера", которая связана с рассматриваемой текстурой. Значения ширины W_T и высоты H_T текстуры (в пикселах), указанные в ее параметрах *Width* и *Height*, устанавливаются в качестве размеров порта вывода изображения. Далее выполняется рендеринг трехмерной сцены на графическом процессоре (GPU), в ходе которого система визуализации записывает значение цвета и глубину каждого пиксела не в буферы кадра и глубины, а в промежуточные текстуры посредством технологии внеэкранных буферов FBO [13]. Эти текстуры передаются на вход специального шейдера для моделирования на GPU глубины резкости в соответствии с текущими параметрами виртуальной камеры (фокусное расстояние f , диафрагменное число k и расстояние r фокусировки). Оно производится путем специального размытия входящей цветовой текстуры с применением фильтра Гаусса [14]. Результирующее изображение также сохраняется в промежуточную текстуру, которая используется на стадии имитации искажений сигнала.

Шейдер имитации искажений выполняется только в том случае, если коэффициенты k_h, k_v, k_{wp} срыва синхронизации или величины белого шума для рассматриваемой текстуры "Виртуальный экран" отличны от нуля. Белый шум моделируется на основе шумовой карты в оттенках серого цвета, текстурные координаты для которой вычисляются с использованием псевдослучайных чисел. Срыв синхронизации моделируется путем рендеринга четырехугольного стрипа (цепочки связанных четырехугольников), который состоит из одинаковых горизонтальных полос, покрывающих всю площадь буфера вывода. На данный стрип накладывает-

ся текстура с исходным неискаженным изображением. Текстурные координаты каждой пары вершин стрипа, лежащей на одной горизонтальной линии, сдвигаются вправо или влево на величину смещения, зависящую от псевдослучайного числа и коэффициента k_h срыва горизонтальной синхронизации. Также текстурные координаты одновременно всех вершин стрипа сдвигаются вверх или вниз на одинаковую величину смещения, которая вычисляется, исходя из псевдослучайного числа и коэффициента k_v срыва вертикальной синхронизации. Результатом стадии имитации искажений сигнала также является промежуточная текстура.

На заключительном этапе выполняется моделирование на GPU таких настроек текстуры "Виртуальный экран", как режим *GS* вывода в оттенках серого цвета (параметр *Grayscale Mode*) или коррекция интенсивности подсветки экрана по цветовым каналам R, G, B. В данной работе эти настройки считаются взаимоисключающими. Поэтому RGB-коррекция реализуется только для режима *RGB*-вывода цветного изображения по следующей формуле:

$$C_{\text{corr}} = (E_R C_{\text{src}, R}, E_G C_{\text{src}, G}, E_B C_{\text{src}, B}),$$

где $C_{\text{src}}, C_{\text{corr}}$ – исходный и скорректированный цвет пиксела генерируемого изображения виртуального экрана, E – цвет (интенсивность) подсветки экрана, заданный в поле *Backlight Color* карты "Виртуальный экран".

Применение полученных текстур к объектам в процессе основного рендеринга виртуальной сцены выполняется аналогично текстурам самосвечения. Фрагментный шейдер добавляет к рассчитанной интенсивности I каждого обраба-

тываемого фрагмента объекта цвет C_{vscr} соответствующего пиксела текстурной карты:

$$I_{res} = I + C_{vsrc}.$$

3. Управление моделью системы наблюдения

Помимо реализации моделей комплексов видеонаблюдения в виртуальной среде, в данной работе рассматривается задача управления такими моделями с помощью рук оператора, погруженного в эту среду (Рис. 3). Предлагаемое решение основано на двух ключевых элементах: виртуальном наблюдателе и трехмерном виртуальном пульте управления.

Виртуальный наблюдатель представляет собой совокупность двух виртуальных камер и моделей человеческих рук. Камеры являются глазами оператора в виртуальной среде. Визуализированные с их помощью изображения трехмерной сцены отображаются в глаза человека посредством VR-гарнитуры Oculus Rift. Положения и ориентация камер рассчитываются на основе данных о положении и ориентации головы оператора, поступающих с датчиков гарнитуры. Для реализации воздействия наблюдателя на объекты сцены созданы реалистичные виртуальные модели кистей рук (Рис. 3, а), управление которыми осуществляется посредством пары контроллеров Oculus Touch. Модели копируют движения кистей рук оператора и обеспечивают возможность сгибания и разгибания виртуальных пальцев. Помимо геометрии, виртуальные руки включают

описывающие эту геометрию неотображаемые ограничивающие объемы (параллелепипеды, сферы, цилиндры и т.д.). Воздействия на объекты сцены моделируются путем поиска и обработки коллизий между ограничивающими объемами рук и этих объектов.

Трехмерный виртуальный пульт управления (Рис. 3, б) состоит из полигональной модели, ограничивающих объемов, моделей датчиков срабатывания элементов, а также функциональной схемы. Схема содержит входы, логические элементы, функциональные блоки, линии связи и выходы. Входы соединены с датчиками, а выходы – с управляемыми объектами сцены. При воздействии пальцев виртуальной кисти на элементы пульта (например, нажатие кнопок) датчики формируют отличные от нуля сигналы на соответствующих входах схемы. Перед рендерингом каждого кадра выполняется расчет управляющих сигналов на выходах схемы в соответствии с сигналами на ее входах. Полученные сигналы обеспечивают возможность контролировать параметры виртуальных устройств наблюдения (фокусное расстояние, диафрагма, режим фокусировки, направление взгляда и т.д.) и отображения (источник сигнала, цвет подсветки экрана и т.д.).

4. Результаты

Предложенные в статье методы и подходы для моделирования систем видеонаблюдения были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim [15], созданном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Также был



Рис. 3. Трехмерные виртуальные модели рук (а) и пульта управления (б)

разработан плагин для системы моделирования Autodesk 3ds Max, позволяющий использовать при создании трехмерных сцен виртуальные камеры с физическими параметрами и текстуры типа "Виртуальный экран".

Тестирование предложенных решений проводилось при реализации на базе технологий виртуальной реальности прототипа тренажера для обучения ручному управлению посадкой пилотируемого космического корабля на поверхность Луны. Разработка таких средств тренировки космонавтов в настоящее время является актуальной задачей в рамках развития отечественной лунной программы. Для создания тренажера была спроектирована трехмерная виртуальная модель корабля, включающая

его интерьер и экстерьер, а также модель лунной поверхности (Рис. 4). Оператор погружается в интерьер корабля с помощью VR-гарнитуры Oculus Rift CV1, а действия его рук копируются виртуальными руками посредством контроллеров Oculus Touch.

На внешней стороне модели космического корабля размещено пять устройств наблюдения: одно снизу и четыре по бокам (некоторые из них продемонстрированы на Рис. 5, а), позволяющих оператору осуществлять визуальный контроль за параметрами перемещения корабля и выбор оптимального места посадки. Видеопоток от них передается на дисплеи панели управления (на Рис. 5, б проиллюстрирован вывод изображений с нижней и двух боковых

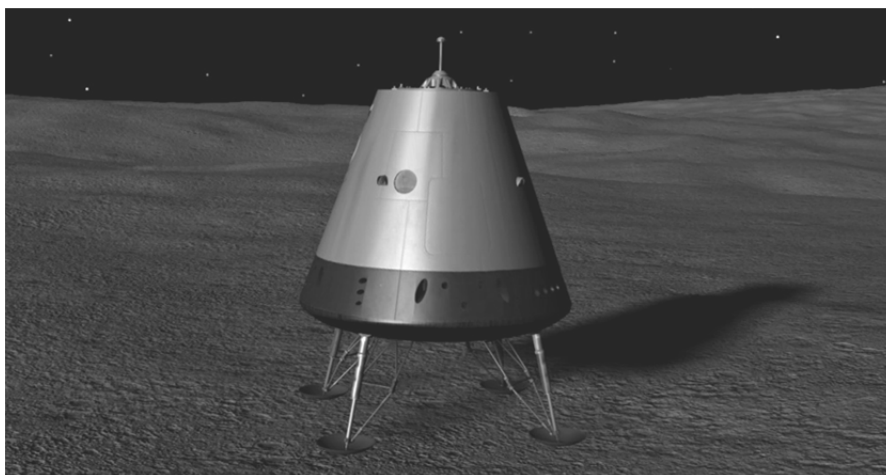
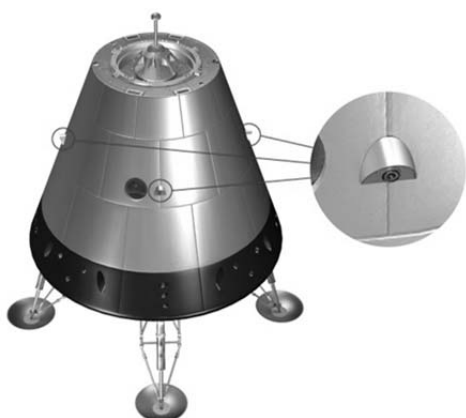
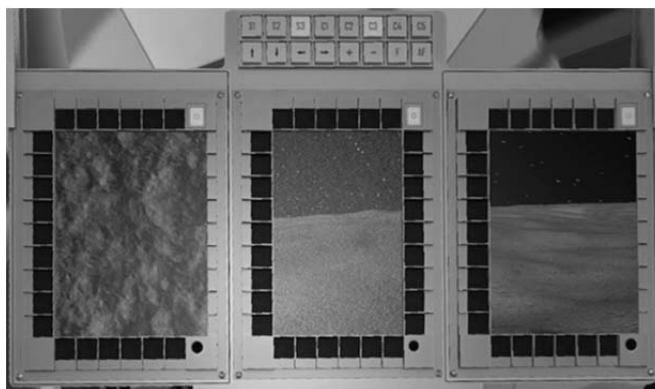


Рис. 4. Виртуальная модель пилотируемого космического корабля и лунной поверхности



а)



б)

Рис. 5. Модели устройств наблюдения (а) и панели управления кораблем (б)

камер, а также моделирование белого шума на центральном экране). Для этого к дисплеям применены материалы, содержащие текстуру типа "Виртуальный экран". Управление устройствами наблюдения производится путем нажатия кнопок на упомянутой панели посредством виртуальных рук. Формирование сигналов для осуществления действий, связанных с нажатиями тех или иных кнопок, выполняется с помощью специально созданной функциональной схемы (Рис. 6), загружаемой в подсистему управления программного комплекса VirSim. В данной работе реализованы возмож-

ности выбора управляемого дисплея (кнопки «S1», «S2», «S3») и его источника сигнала (кнопки «C1», «C2», «C3», «C4», «C5»), регулировки фокусного расстояния камер (кнопки «+» и «-»), изменения направления их взгляда (кнопки «Вверх», «Вниз», «Влево», «Вправо»), а также осуществления однократной или постоянной автофокусировки (кнопки «F» и «AF»). Размещенный в схеме блок *Селектор* вычисляет и сохраняет код (от 0 до 4) источника сигнала для каждого из трех дисплеев, выдавая на выход код того источника, который связан с текущим выбранным экраном. *Блок управления*

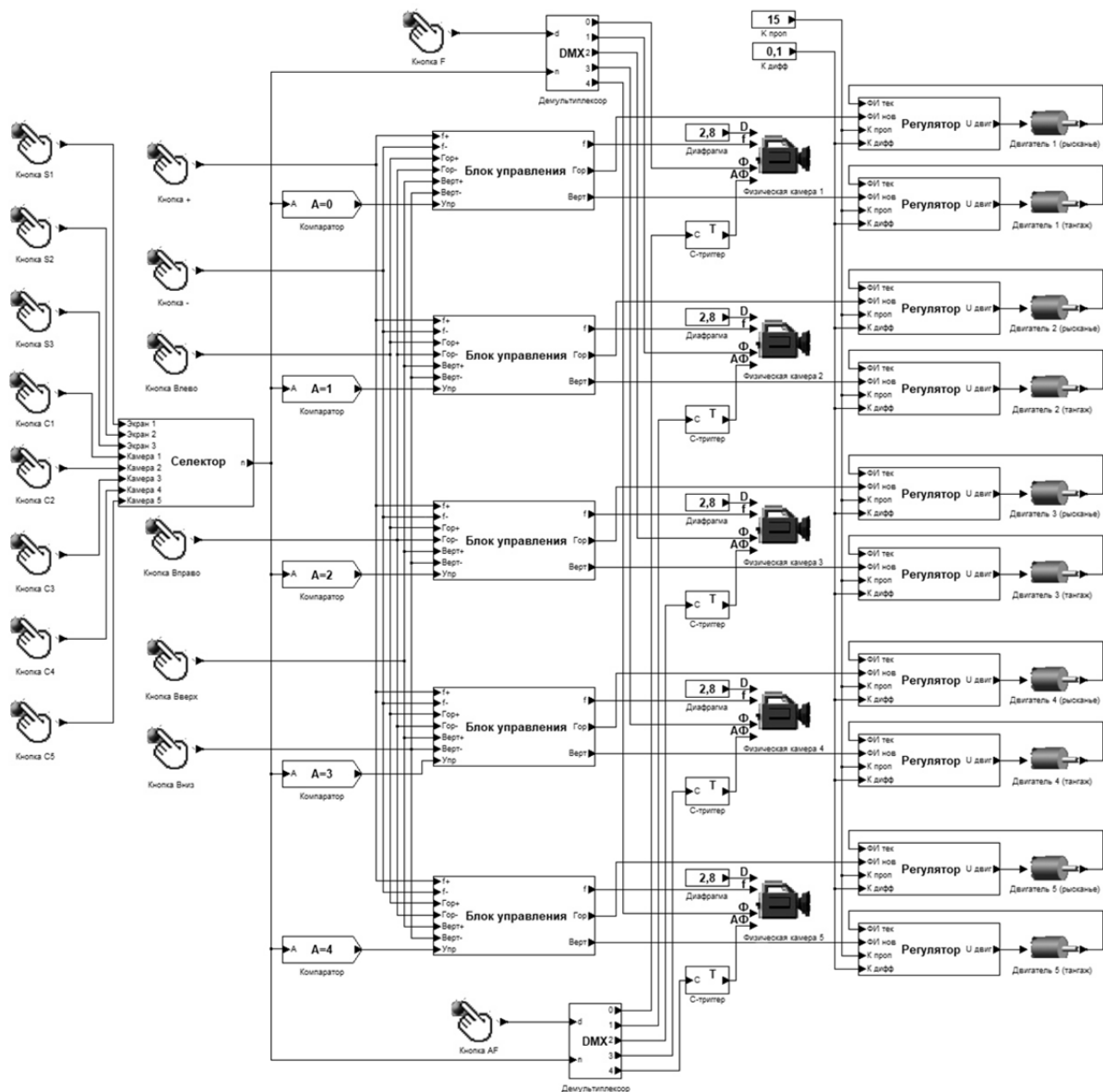


Рис. 6. Функциональная схема для управления системой видеонаблюдения модели корабля



Рис. 7. Оператор управляет посадкой виртуальной модели космического корабля

каждой камеры пересчитывает значения ее фокусного расстояния и углов ориентации в зависимости от времени нажатия соответствующих кнопок пульта. Расчет напряжений, подаваемых на электроприводы в шарнирах устройств наблюдения, осуществляется с применением ПД-регуляторов.

На Рис. 7 показан оператор, погруженный в созданный нами интерьер космического корабля и управляющий посадкой на модель лунной поверхности путем взаимодействия виртуальной руки с виртуальным джойстиком посредством контроллеров Oculus Touch.

Результаты апробации в программном комплексе VirSim показали, что предложенные в статье методы и подходы эффективны для решения задачи моделирования комплексов видеонаблюдения в системах виртуального окружения, тренажерных комплексах и других приложениях.

Заключение

В данной работе представлены новые методы для реализации моделей систем видеонаблюдения в виртуальной среде, оригинальность которых заключается в разработке и использовании собственного типа текстурных карт с внедрением его в систему проектирования виртуальных сцен Autodesk 3ds Max, а также в организации управления создаваемыми моделями на основе функциональных схем. преимуще-

ством и новизной предлагаемых решений также является комплексный подход к моделированию систем видеонаблюдения, включающий их создание в трехмерной сцене, синтез видеопотоков от моделей устройств наблюдения и визуализацию на моделях устройств отображения, а также управление элементами системы с использованием технологий виртуальной реальности. 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 для системы моделирования 3ds Max, созданные на базе описанных в статье решений. Реализация программных компонентов выполнялась с использованием возможностей языка C++, Oculus SDK и WinAPI. Предложенные методы и подходы прошли успешную апробацию в составе системы виртуального окружения VirSim, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

Литература

1. Селиванов В.В., Селиванова Л.Н. Виртуальная реальность как метод и средство обучения // Образовательные технологии и общество. 2014. Том 17, №3. С. 378-391.
2. Garcia A.D., Schlueter J., Paddock E. Training astronauts using hardware-in-the-loop simulations and virtual reality // AIAA SciTech Forum, Orlando, FL. 2020.

3. 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.
4. VR тренажер. Виртуальная реальность в обучении. Нефтяная промышленность // XR PRO. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=keXlfMKyxsI> (дата обращения: 21.06.2022)
5. VR-тренажер. Действия при пожаре // DreamPort. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cm9vFeB18X8> (дата обращения: 21.06.2022)
6. Мальцев А.В., Торгашев М.А. Визуализация виртуального окружения с использованием VR-гарнитуры // Труды НИИСИ РАН. 2020. Том 10, № 1. С. 22-25.
7. Boletsis C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology // Multimodal Technologies and Interaction. 2017, 1, 24.
8. Мальцев А.В., Омельченко Д.В. Технологии и методы погружения оператора в трехмерную виртуальную среду // Труды НИИСИ РАН. 2019. Том 9, № 2, С. 59-63.
9. Bisagno N., Conci N. Virtual camera modeling for multi-view simulation of surveillance scenes // Proceedings of the 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2018. P. 2170-2174.
10. Kučič M., Zemčík P. Simulation of Camera Features // Proceedings of the 16th Central European Seminar on Computer Graphics. 2012. P. 117-123.
11. Barsky B.A., Horn D.R., Klein S.A., Pang J.A., Yu M. Camera models and optical systems used in computer graphics: part I, object-based techniques // Proceedings of the 2003 international conference on Computational science and its applications. 2003. P. 246-255.
12. Qureshi F.Z., Terzopoulos D. Surveillance in virtual reality: System design and multi-camera control // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2007. P. 1-8.
13. Framebuffer object // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Framebuffer_object (дата обращения: 15.08.2022)
14. Мальцев А.В., Торгашев М.А. Распределенное моделирование глубины резкости при визуализации трехмерных сцен на GPU // Труды НИИСИ РАН. 2019. Том 9, № 5. С. 100-104.
15. Михайлюк М.В., Мальцев А.В., Тимохин П.Ю., Страшнов Е.В., Крючков Б.И., Усов В.М. Система виртуального окружения Virsim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. 2020. Том 37, № 4. С. 72-95.

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: 100. 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: 22. Область научных интересов: виртуальное моделирование, информатика, компьютерная графика. E-mail: omelchenko_dv@mail.ru

Modeling of Video Surveillance Systems in 3D Scenes for Virtual Environment

A. V. Maltsev, D. V. Omelchenko

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

Abstract. The paper presents methods and approaches for simulation of controlled video surveillance complexes in virtual environment systems and training complexes on the example of a prototype simulator for landing a manned spacecraft on the lunar surface. Original solutions include principles of creating virtual models of observation and image display devices in 3D modeling system Autodesk 3ds Max, methods for operation simulation of a real camera and screen, as well as surveillance system control by means of three-dimensional virtual control panel.

Keywords: virtual environment, training complex, texture, camera, screen, control scheme, moon landing.

DOI 10.14357/20718632220403

References

1. Selivanov V.V., Selivanova L.N. Virtual reality as method and means of learning // *Educational Technology and Society*. 2014. Vol. 17, No.3. P.378-391.
2. Garcia A.D., Schlueter J., Paddock E. Training astronauts using hardware-in-the-loop simulations and virtual reality // *AIAA SciTech Forum*, Orlando, FL. 2020.
3. 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.
4. XR PRO. Virtual reality in learning. Oil industry. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=keXlfMKyxsl> (accessed: June 21, 2022).
5. DreamPort. VR Fire Safety Training. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cm9vFeB18X8> (accessed: June 21, 2022).
6. Maltsev A.V., Torgashev M.A. Virtual environment visualization with using VR headset // *Trudy NIISI RAN, Proceedings of SRISA RAS*. 2020. Vol. 10, No.1. P. 22-25.
7. Boletsis C. The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology // *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017, 1, 24.
8. Maltsev A.V., Omelchenko D.V. Technologies and methods for the operator immersion in a three-dimensional virtual environment // *Trudy NIISI RAN, Proceedings of SRISA RAS*. 2019. Vol. 9, No.2. P. 59-63.
9. Bisagno N., Conci N. Virtual camera modeling for multi-view simulation of surveillance scenes // *Proceedings of the 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2018. P. 2170-2174.
10. Kučiš M., Zemčík P. Simulation of Camera Features // *Proceedings of the 16th Central European Seminar on Computer Graphics*. 2012. P. 117-123.
11. Barsky B.A., Horn D.R., Klein S.A., Pang J.A., Yu M. Camera models and optical systems used in computer graphics: part I, object-based techniques // *Proceedings of the 2003 international conference on Computational science and its applications*. 2003. P. 246-255.
12. Qureshi F.Z., Terzopoulos D. Surveillance in virtual reality: System design and multi-camera control // *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. P. 1-8.
13. Framebuffer object. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Framebuffer_object (accessed: August 15, 2022).
14. Maltsev A.V., Torgashev M.A. Distributed simulation of DOF when rendering virtual scenes on GPU // *Trudy NIISI RAN, Proceedings of SRISA RAS*. 2019. Vol.9, No.5. P. 100-104.
15. Mikhailyuk M.V., Maltsev A.V., Timokhin P.Yu., Strashnov E.V., Kryuchkov B.I., Usov V.M. The VirSim Virtual Environment System for the Simulation Complexes of Cosmonaut Training // *Scientific Journal Manned Spaceflight*. 2020. No.4. P. 72-95.

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