

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ МИССИЙ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Мальцев^а, П. Ю. Тимохин^б, Е. В. Страшнов^в

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, avmaltcev@mail.ru

^б ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0718-1436>, webpismo@yahoo.de

^в ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, strashnov_evg@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается задача виртуального моделирования процесса управления пилотируемым космическим кораблем в рамках исследовательских миссий по освоению лунной поверхности, предполагающих выполнение посадки на нее. Данная задача является актуальной ввиду необходимости изучения естественного спутника Земли в ближней и среднесрочной перспективе. Разработанные решения основаны на применении современных технологий виртуальной реальности, когда окружающая человека среда полностью заменяется на виртуальный прототип. Рассматривается предлагаемая для решения поставленной задачи структура системы виртуального окружения, которая включает в себя аппаратный блок, программный комплекс и цифровые модели. Моделирование движения и посадки виртуального прототипа космического корабля осуществляется путем расчета сил тяги реактивных двигателей и основано на синтезе оптимального управления с реализацией критериев быстрого действия (для переориентации корабля) и минимального расхода топлива (для торможения корабля). При этом разработанное управление формируется в виде обратной связи по показаниям виртуальных датчиков и обеспечивает стабилизацию, переориентацию, торможение и мягкую посадку космического корабля на поверхность Луны. Моделирование лунной поверхности выполняется на графическом процессоре с использованием детализированных текстур Луны и адаптивной триангуляции сетки высот. Апробация показала адекватность предложенных решений поставленной задаче и их применимость при реализации современных видеотренажеров подготовки космонавтов.

Ключевые слова: пилотируемый космический корабль, Луна, мягкая посадка, система виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИ-СИ 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».

Для цитирования: Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В. Моделирование виртуального окружения для пилотируемых миссий по исследованию лунной поверхности. *Успехи кибернетики*. 2022;3(4):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06.

SIMULATION OF VIRTUAL ENVIRONMENT FOR CREWED LUNAR MISSIONS

A. V. Maltsev^a, P. Yu. Timokhin^b, E. V. Strashnov^c

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, avmaltcev@mail.ru

^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0718-1436>, webpismo@yahoo.de

^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, strashnov_evg@mail.ru

Abstract: we studied the virtual simulation of a crewed spacecraft control for research missions to the Moon's surface. There is an obvious need to survey the Moon in the short and medium term. The solutions are based on advanced VR: the environment is completely replaced by a virtual one. We proposed an architecture of a virtual environment system consisting of hardware, software, and digital models. The motion and landing of a virtual spacecraft are simulated by estimating the jet engine thrust. The control inputs are optimized for fast response (spacecraft orientation) and min fuel consumption (for deceleration).

The control logic is supported with feedback from virtual sensors to stabilize, orient, decelerate, and perform a soft landing on the Moon. The moon's surface is simulated by a GPU using detailed Moon textures and adaptive triangulation of the terrain grid. The proposed solution is suitable to build video simulators for space crew training.

Keywords: crewed spacecraft, Moon, soft landing, virtual environment.

Acknowledgements: the study is a part of the 47 GP government contract for basic research with the Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences No. FNEF-2022-0012 Virtual Environment Systems: Technologies, Methods, and Algorithms for Simulation and Visualization. 0580-2022-0012.

Cite this article: Maltsev A. V., Timokhin P. Yu., Strashnov E. V. Simulation of Virtual Environment for Crewed Lunar Missions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(4):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-06.

Введение

В настоящее время ведется активное исследование и освоение космоса. В том числе разрабатываются планы по проведению как беспилотных, так и пилотируемых миссий для изучения Луны. Поэтому важной и актуальной задачей является обучение космонавтов таким необходимым навыкам, как управление космическим кораблем.

Интенсивно развивающимся направлением в области создания тренажерных и обучающих систем в последние годы стало применение в них технологий виртуальной реальности (VR) [1, 2]. Такой подход подразумевает замену реальных объектов на виртуальные прототипы и выполнение тренировки путем погружения оператора в виртуальную среду. Существенную роль играет применение VR-технологий в тренажерных комплексах космической тематики, поскольку это позволяет улучшить качество визуального восприятия для тех задач и операций, которые невозможно реализовать в земных условиях [3]. В качестве примеров могут выступать тренажеры для обучения космонавтов выходу в открытый космос [4], выполнению задач в условиях внекорабельной деятельности [5], а также решения на базе VR-технологий, применяемые в лаборатории НАСА [6].

В данной работе предлагаются методы и подходы к реализации тренажера обучения космонавтов навыкам управления пилотируемым космическим кораблем (ПКК) вблизи лунной поверхности и в процессе посадки на нее, основанные на применении VR-технологий и разработанной системы виртуального окружения. Новизна работы заключается в том, что управление моделью корабля осуществляется путем взаимодействия реального человека с элементами виртуального трехмерного пульта управления, размещенного в ее интерьере. Для этого была создана специальная модель виртуального наблюдателя, движения рук которого повторяют движения реальных рук оператора. Предлагаемое решение включает оригинальную структуру системы виртуального окружения, методы моделирования динамики и полуавтоматического управления виртуальным прототипом ПКК (переориентация и торможение — в автоматическом режиме, выбор места посадки — в ручном), а также методы построения и визуализации лунной поверхности. Апробация предложенных в статье методов была проведена в разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН системе виртуального окружения VirSim [7] и продемонстрировала их применимость при создании космических тренажерных систем на основе VR-технологий.

Структура системы виртуального окружения

Система виртуального окружения (СиВО), созданная в рамках данной работы для решения задачи обучения космонавтов управлению космическим кораблем при выполнении пилотируемых миссий по исследованию лунной поверхности, включает аппаратный блок, программный комплекс и цифровые визуальные модели (ЦВМ). На рис. 1 проиллюстрирована общая структура предлагаемой системы.

Аппаратный блок, реализуемый на базе VR-гарнитуры Oculus Rift CV1 и контроллеров Oculus Touch, осуществляет трекинг головы и рук оператора, а также отображение синтезируемой стереопары в его глаза. Разработанный программный комплекс состоит из нескольких подсистем, объединенных общей оболочкой и отвечающих за управление виртуальными объектами, моделирование их динамики и визуализацию виртуальной среды. Основными функциями оболочки являются обеспечение обмена данными между подсистемами по специальным протоколам и предоставление пользователю визуального интерфейса взаимодействия с комплексом. Подсистема управления собирает информацию от внешних устройств, входящих в аппаратный блок. Также в нее передаются показания датчиков о состоянии

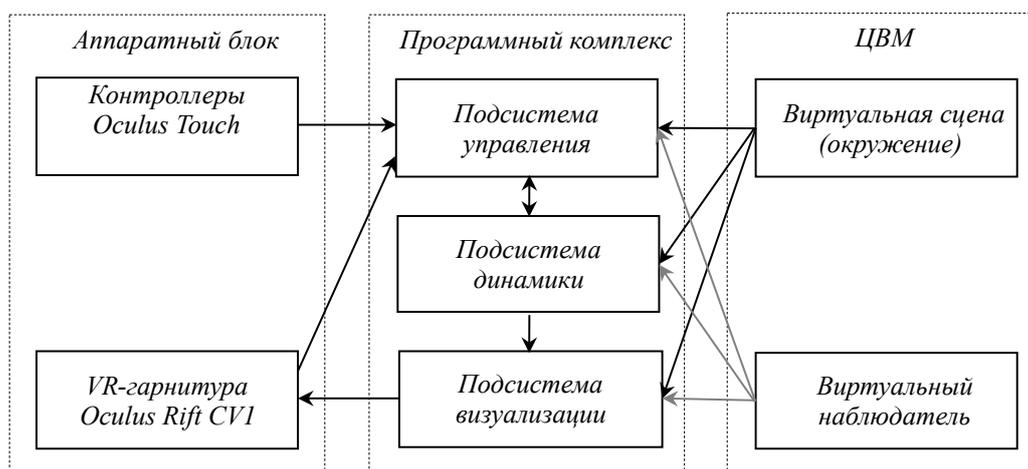


Рис. 1. Виртуальная модель ПКК (экстерьер и интерьер)

виртуальных элементов управления (кнопок, тумблеров, джойстиков и т.д.), являющихся частями ЦВМ. На базе поступающей информации выполняется расчет функциональных схем управления динамическими объектами виртуальной среды и синтез управляющих сигналов [8]. Функциональные схемы входят в состав ЦВМ и загружаются в подсистему управления при инициализации СиВО. Синтезированные сигналы направляются в подсистему динамики, отвечающую за определение новых положений и ориентаций объектов виртуальной среды, а также определение и обработку коллизий между ними. Подсистема визуализации выполняет рендеринг стерео изображений виртуальной среды и передает их на отображение в VR-гарнитуру Rift, входящую в состав аппаратного блока. Распределенная визуализация стереопары с моделированием реалистичной освещенности выполняется на многоядерном графическом процессоре (GPU) в масштабе реального времени, т. е. с частотой смены кадров не менее 25 раз в секунду.

Созданная в данном исследовании ЦВМ содержит высокодетализированную виртуальную сцену окружения космонавта, включающую модели ПКК (рис. 2) и Луны, а также модель виртуального наблюдателя. Последний является неким аватаром обучаемого оператора, позволяющим осуществлять погружение в виртуальную среду и взаимодействие с ней. Предлагаемая модель виртуального наблюдателя 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. Положения и ориентация камер рассчитываются на основе данных о положении и ориентации головы оператора, поступающих с датчиков гарнитуры. Возможность воздействия наблюдателя на объекты сцены реализуется с помощью созданных нами виртуальных моделей кистей рук, управление которыми осуществляется посредством пары контроллеров Oculus Touch. Они копируют движения кистей рук оператора и позволяют сгибать и разгибать виртуальные пальцы.

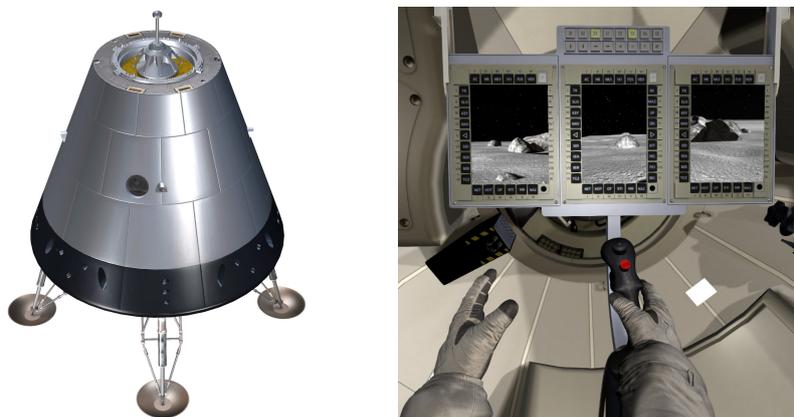


Рис. 2. Виртуальная модель ПКК (экстерьер и интерьер)

Помимо геометрии, виртуальные руки включают описывающие эту геометрию неотображаемые ограничивающие объемы (параллелепипеды, сферы, цилиндры и т. д.). Взаимодействия моделей рук с объектами сцены моделируются путем поиска и обработки коллизий между ограничивающими объемами рук и этих объектов. Чтобы обеспечить возможность управления движением и посадкой модели ПКК, в интерьере этой модели размещен трехмерный виртуальный пульт управления с кнопками, джойстиком и экранами. Оператор может воздействовать на элементы данного пульта с помощью рук виртуального наблюдателя. Управление виртуальным наблюдателем и моделью корабля реализуется на основе специально разработанных для этого функциональных схем.

Моделирование динамики и управление космическим кораблем

Созданная нами СиВО позволяет реализовать динамику и управление виртуальной моделью ПКК для его посадки на модель поверхности Луны. Движение ПКК осуществляется под действием реактивных двигателей, которые создают тягу вида

$$f_i = \beta_i f_{nom,i} = \beta_i k_{nom,i} v_h, \quad i = \overline{1, N},$$

где для каждого двигателя $0 \leq \beta_i \leq 1$ – коэффициент дросселирования, $f_{nom,i}$ – номинальное значение силы тяги, $k_{nom,i}$ – номинальный расход топлива, v_h – скорость истечения газов, N – число двигателей ПКК. Здесь $\beta_i = 1$ соответствует непрерывному режиму работы двигателя, $\beta_i \in (0, 1)$ – импульсному режиму, $\beta_i = 0$ – состоянию, когда двигатель не работает.

Действие реактивных двигателей приводит к тому, что формируется суммарная сила тяги $F = \sum_{i=1}^N f_i n_i$ и суммарный момент $\tau = \sum_{i=1}^N r_i \times f_i n_i$, где n_i – вектор оси направления действия тяги двигателя, r_i – положение двигателя относительно центра масс ПКК. Если рассматривать ПКК как твердое тело, то динамика его поступательного и вращательного движения описывается с помощью дифференциальных уравнений Ньютона–Эйлера [9]:

$$m\dot{v} = mg_l + F, \quad I\dot{\omega} + \omega \times I\omega = \tau,$$

где m – масса ПКК, I – его тензор инерции, v и ω – его линейная и угловая скорость, g_l – вектор ускорения свободного падения на Луне.

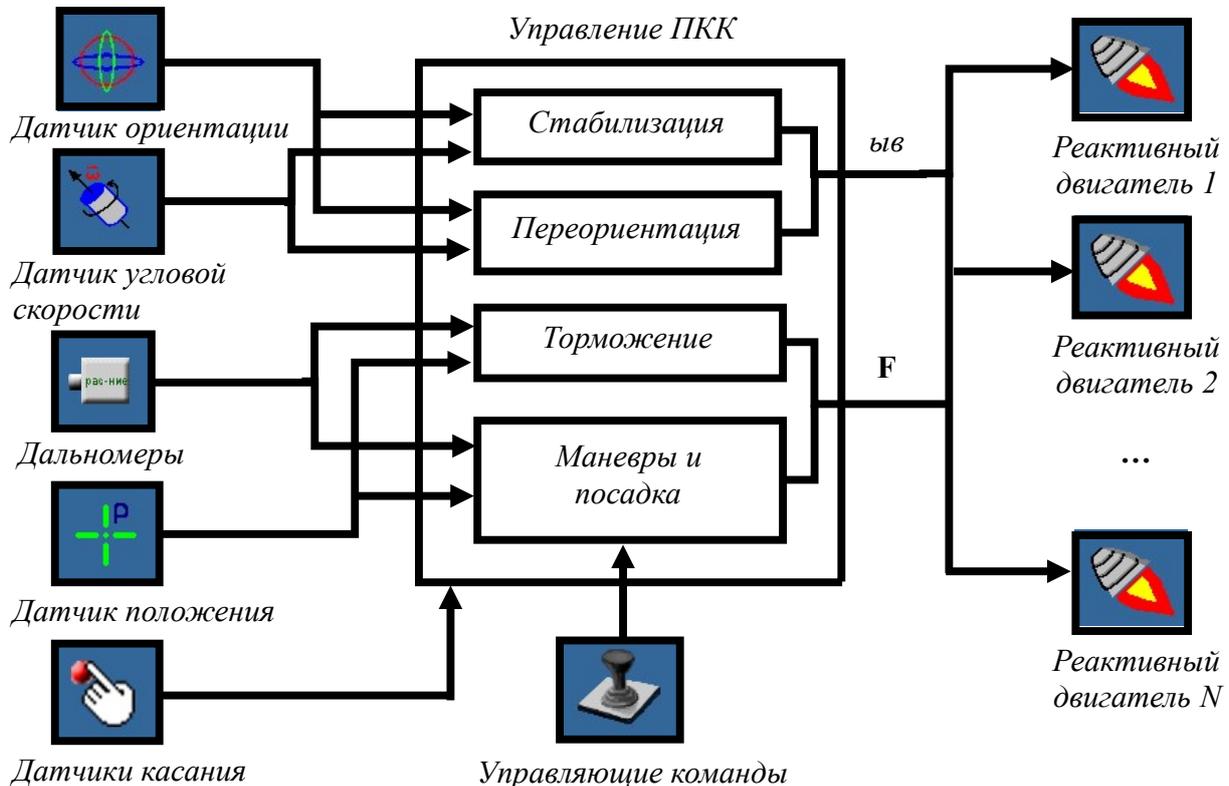


Рис. 3. Структура системы управления ПКК

Эти уравнения используются для вычисления новых координат модели ПКК (ее положения и ориентации). При этом положение модели ПКК задается относительно предполагаемого места посадки, а ориентация — тремя углами Эйлера. Для интегрирования дифференциальных уравнений движения ПКК используется полуневная схема Эйлера [10], в которой на каждом шаге моделирования сначала вычисляются скорости ПКК, а затем его координаты.

Управление ПКК в виртуальном окружении осуществляется с применением технологии создания и расчета функциональных схем [8]. Идея заключается в том, что алгоритм управления ПКК формируется в виде схемы, состоящей из набора связанных блоков, где входами являются показания виртуальных датчиков и управляющие команды, а на выходе вычисляются тяги реактивных двигателей. Предлагаемое решение для реализации посадки виртуальной модели ПКК на Луну основано на синтезе управления, оптимального по быстродействию при выполнении переориентации корабля и расходу топлива при его торможении. На рис. 3 приведена структура разработанной системы управления ПКК в виртуальном окружении, позволяющая реализовать стабилизацию, переориентацию, торможение, маневры и мягкую посадку ПКК на Луну в автоматическом и ручном режиме. Обратная связь в предлагаемой системе управления реализуется посредством виртуальных датчиков положения, ориентации, угловой скорости, касания и дальномеров, измеряющих высоту ПКК относительно модели поверхности Луны. В ручном режиме управление ПКК производится с помощью моделей виртуальных рук, которые воздействуют на объекты виртуального окружения внутри ПКК (кнопки пульта и джойстик). Изменение состояний этих объектов приводит к формированию управляющих команд, поступающих в систему управления. В зависимости от показаний датчиков и управляющих команд вычисляются тяга и момент, согласно которым осуществляется включение и выключение соответствующих реактивных двигателей ПКК.

Моделирование полуавтоматического управления посадкой ПКК в СиВО начинается примерно на высоте 2 км относительно поверхности Луны и состоит из нескольких этапов. Сначала выполняется стабилизация (гашение угловой скорости) и вертикализация ПКК в автоматическом режиме. После этого ПКК свободно падает с набором скорости до достижения высоты 700 м. Затем начинается этап прецизионного торможения ПКК, который заключается в обеспечении требуемых значений горизонтальной и вертикальной скорости ПКК. Торможение продолжается до высоты 100 м, после чего ПКК зависает относительно поверхности Луны. На этом этапе оператор в ручном режиме осуществляет управление горизонтальным движением ПКК для выбора подходящего места посадки. Как только такое место найдено, оператор нажатием на кнопку виртуального пульта задает команду для выполнения мягкой посадки ПКК на поверхность Луны. При соприкосновении опор ПКК с поверхностью Луны срабатывают датчики касания, и реактивные двигатели отключаются.

Моделирование лунной поверхности

С высоты 2 км разрешение наблюдаемой поверхности Луны будет составлять около 1 м/пиксел и возрастать при посадке до значений порядка 1 см/пиксел. Создание виртуальной модели Луны с таким разрешением в традиционных системах типа 3ds Max имеет ряд ограничений, не позволяющих полностью решить задачу. Во-первых, это связано с большими размерами/объемом детализированных текстур Луны (карт-мозаик [11], составленных из спутниковых снимков), которые выходят за рамки аппаратных возможностей современных видеокарт. Во-вторых, это огромное число (миллионы) треугольников, которое производят системы типа 3ds Max при построении триангуляции протяженной поверхности Луны со сложным рельефом (с кратерами, бороздами, грядами и т.д.). Отправка такой «тяжелой» модели Луны на визуализацию может привести к блокированию работы СиВО, что недопустимо в тренировочном процессе.

Для решения описанной проблемы была разработана комбинированная виртуальная модель Луны, которая включает модель контактной площадки (КП) — участка Луны (около 200x200 м), в пределах которого отрабатывается посадка ПКК, а также модель окружающей лунной поверхности (ЛП), которую оператор наблюдает на экранах виртуального пульта в процессе снижения и посадки.

Основой модели КП является разработанная полигональная (триангулированная) модель участка лунного рельефа, в которой реализован комплекс мультитекстур [12], имитирующих детальные визуальные свойства реголита (поверхностного слоя сыпучего лунного грунта). Модель КП, как и модели ПКК и виртуального наблюдателя, создана с помощью системы 3ds Max на этапе подготовки виртуальной сцены и загружается целиком в видеопамять перед началом работы СиВО.

Моделирование и визуализация окружающей ЛП выполняются в масштабе реального времени непосредственно в процессе работы СиВО с помощью созданного программного модуля, входящего в состав подсистемы визуализации. Данный модуль позволяет синтезировать изображения модели ЛП с разрешением порядка 1 м/пиксел [13] в области, примыкающей непосредственно к КП (около 50 % от всей площади наблюдаемой ЛП), а в периферийных областях — с разрешением около 100 м/пиксел [14].

Моделирование геометрических свойств ЛП осуществляется на основе разработанной технологии адаптивной триангуляции детализированной регулярной сетки высот [15]. Идея состоит в том, что в видеопамять исходно загружается грубая полигональная модель ЛП, а на этапе синтеза текущего кадра у этой модели повышается полигональная детализация лишь в тех участках, где рельеф различим наблюдателем на экране. Это позволяет сократить на порядок число треугольников, отправляемых на визуализацию, и избежать эффекта передетализации изображения (когда в один пиксел отображается несколько точек модели). В предлагаемом решении моделирование ЛП реализовано полностью на GPU с помощью программируемой тесселяции (разбиения на подтреугольники) исходной модели. Новизна решения состоит в разработанной схеме повышения уровня полигональной детализации (см. рис. 4), основанной на оригинальной модификации аппаратного тесселяционного шаблона. Разработанная схема обеспечивает формирование безразрывной триангуляции, выровненной по узлам сетки высот.

Для моделирования визуальных свойств ЛП в данной работе используются тайлы (участки одинакового размера) исходной сверхбольшой текстуры Луны и ее уменьшенных копий (более низких уровней детализации). На этапе формирования кадра выполняется отбор тайлов, необходимых для визуализации, их подкачка в видеопамять и покрытие модели ЛП. Новизна технологии состоит в том, что отбор тайлов (включая определение их номеров и уровней детализации) выполняется полностью на GPU на основе параллельной обработки пикселей отображения модели ЛП. Это позволяет существенно сократить время построения текстурного рисунка ЛП, а также синтезировать качественные изображения ЛП, разрешение которых близко к разрешению средства наблюдения (см. рис. 5).

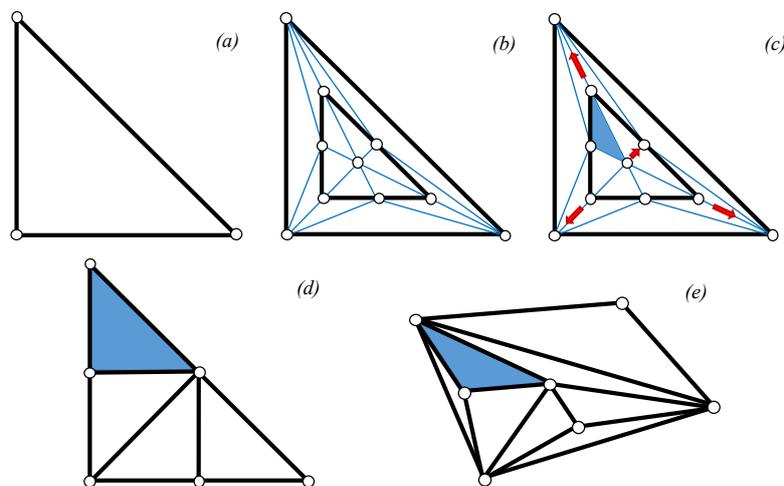


Рис. 4. Схема повышения уровня полигональной детализации: а) полигон i -го уровня детализации; б) тесселяционный шаблон; в) модификация шаблона; д) полигоны $(i+1)$ -го уровня детализации; е) стыковка полигонов i -го и $(i+1)$ -го уровней детализации

Заключение

В работе предложены методы и подходы для виртуального моделирования процесса управления космическим кораблем при выполнении пилотируемых миссий, предполагающих посадку на поверхность Луны. Использование VR-гарнитуры и контроллеров Oculus обеспечивает высокий уровень погружения оператора в виртуальную среду и тем самым повышает качество его обучения необходимым навыкам пилотирования ПКК. Успешная апробация полученных в статье решений в составе системы виртуального окружения VirSim показала возможность их применения при создании современных тренажерных комплексов подготовки космонавтов. На рисунке 6 продемонстрирована тренировка оператора управлению ПКК с применением описанных решений.

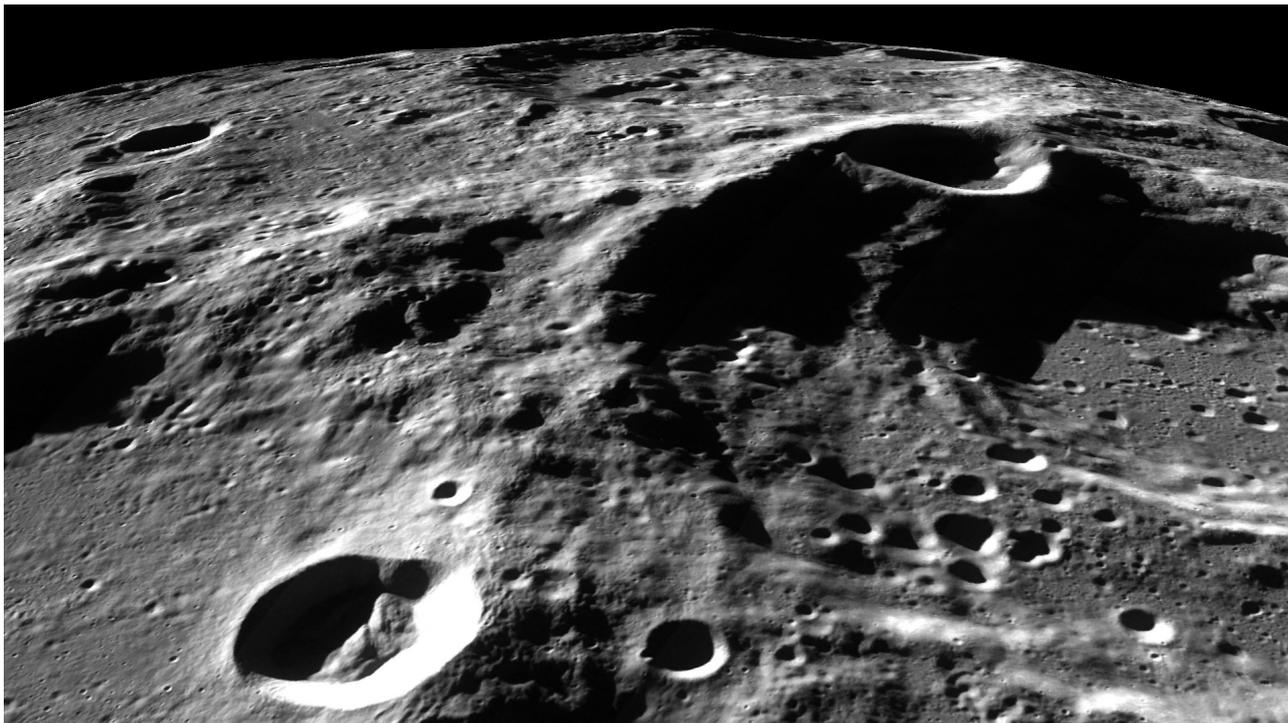


Рис. 5. Визуализация модели лунной поверхности



Рис. 6. Тренировка оператора с применением СиВО

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;1(4):1–17. DOI: 10.3390/mti1040024.
2. Селиванов В. В., Селиванова Л. Н. Виртуальная реальность как метод и средство обучения. *Образовательные технологии и общество*. 2014;17(3):378–391.
3. Алтунин А. А., Долгов П. П., Жамалетдинов Н. Р., Иродов Е. Ю., Коренной В. С. Направления применения технологий виртуальной реальности при подготовке космонавтов к внекорабельной деятельности. *Пилотируемые полеты в космос*. 2021;1(38):72–88. DOI: 10.34131/MSF.21.1.72-88.
4. Liu Yuqing and others. VR Simulation System for EVA Astronaut Training. *Proceedings of AIAA Space 2010 Conference & Exposition*. Anaheim California, 2010. DOI: 10.2514/6.2010–8696.
5. 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;4(2):103–109. DOI: 10.1162/pres.1995.4.2.103.
6. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training Astronauts Using Hardware-in-the-Loop Simulations and Virtual Reality. *AIAA SciTech Forum*. Orlando, FL, 2020. DOI: 10.2514/6.2020-0167.
7. 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;37(4):72–95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
8. Михайлюк М. В., Торгашев М. А. Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов. *Программные продукты и системы*. 2014;4:10–15.
9. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Mechanics*. 2nd edition. *Course of Theoretical Physics*. Vol. 1. Pergamon Press; 1969.
10. Catto E. Iterative Dynamics with Temporal Coherence. *In Game Developer Conference*. 2005;1–24.
11. Scholten F., Oberst J., Matz K. D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E. J., Robinson M. S. GLD100: The Near-Global Lunar 100 m Raster DTM from LROC WAC Stereo Image Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2012;117:1–12. DOI: 10.1029/2011JE003926.
12. Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Трушин А. М. Методы распределенной визуализации виртуальных объектов с использованием мультитекстурирования на основе смешивания материалов. *Вестник кибернетики*. 2018;29(1):110–115.
13. *Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. North of Boguslawsky Crater DTM*. Режим доступа: https://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_DTM_BOGSLWSKY1.
14. *Astropedia. Lunar and Planetary Cartographic Catalog. Moon LRO LROC WAC Global Morphology Mosaic 100m v3*. Режим доступа: https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Moon/LRO/LROC_WAC/Lunar_LRO_LROC-WAC_Mosaic_global_100m_June_2013.
15. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Y., Maltsev A. V. A Method of Earth Terrain Tessellation on the GPU for Space Simulators. *Programming and Computer Software*. 2017;43(4):243–249. DOI: 10.1134/S0361768817040065.