

МЕТОДЫ ИМИТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ВИРТУАЛЬНЫХ КАМЕР В ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕНАХ

А. В. Мальцев

*Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1776-814X>, ✉ avmaltcev@mail.ru*

Аннотация: в работе предлагаются методы и подходы для имитации оптических эффектов на изображениях от различных устройств наблюдения, моделируемых в трехмерной виртуальной среде. Это позволяет расширить возможности такого моделирования, обеспечив охват широкого спектра реальных устройств в качестве прототипов для создаваемых виртуальных аналогов. Рассматриваются оригинальные методы и алгоритмы двухэтапного синтеза изображений с реализацией дисторсии и хроматических аберраций. Апробация предлагаемых в статье решений проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim, разработанном в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, и показала их адекватность и эффективность.

Ключевые слова: визуализация, графический процессор, виртуальная камера, дисторсия, хроматическая аберрация.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Для цитирования: Мальцев А. В. Методы имитации оптических искажений в изображениях с виртуальных камер в трехмерных сценах. *Успехи кибернетики*. 2025;6(3):127–136.

Поступила в редакцию: 25.06.2025.

В окончательном варианте: 22.09.2025.

IMITATING OPTICAL DISTORTIONS IN 3D SCENE VIRTUAL CAMERA IMAGES

A. V. Maltsev

*Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russian Federation*

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

Abstract: we proposed methods for imitating optical effects in images from virtual cameras that simulate surveillance devices in a three-dimensional environment. This expands the possibilities of such simulations by enabling coverage of a wide range of real devices as references for their virtual counterparts. We developed original methods and algorithms for two-stage image synthesis that implement radial distortion and chromatic aberrations. We tested the proposed solutions in the VirSim virtual environment, developed at our institution, and demonstrated their validity and effectiveness.

Keywords: visualization, GPU, virtual camera, radial distortion, chromatic aberration.

Acknowledgements: This is a part of the FNEF-2024-0002 Simulation of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environments government contract granted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”.

Cite this article: Maltsev A. V. Imitating Optical Distortions in 3D Scene Virtual Camera Images. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(3):127–136.

Original article submitted: 25.06.2025.

Revision submitted: 22.09.2025.

Введение

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности используются элементы синтезируемого с помощью компьютера виртуального окружения и построенные на их базе тренажерные комплексы [1–5]. Данный подход предполагает полную или частичную замену объектов реальной жизни на их трехмерные виртуальные модели, создаваемые в таких системах моделирования, как 3ds

Max, Maya, Blender и т.п. В рамках обучения операторов управлению сложными техническими средствами такая замена обладает рядом преимуществ, среди которых отсутствие необходимости приобретения для учебных целей дорогостоящего оборудования и, соответственно, невозможность его поломки в случае ошибочных действий при тренировке, а также относительно легкая масштабируемость на различное число подготавливаемых людей.

Одним из важных элементов виртуальной среды являются устройства наблюдения [6–8], которые имитируют реальные приборы, размещенные на различных неподвижных (стены, столбы, колонны) и подвижных объектах (автомобили, роботы, летательные аппараты и т.д.). Поступающий от них видеосигнал обеспечивает оператору возможности обзора окружающей обстановки, принятия решений и визуального контроля результата управления какими-либо процессами, например, движением объектов. Эффективность обучения человека с помощью синтезируемой виртуальной среды, а также правильность прививаемых навыков в значительной степени зависят от сходства изображений с виртуальных устройств наблюдения и тех, которые он мог бы видеть с помощью реальных приборов.

Приборы наблюдения являются технически сложными устройствами, состоящими из большого числа электронных, механических и оптических элементов. Каждый из них может вносить в получаемое изображение эффекты и искажения различного типа. Это может быть обусловлено характеристиками и качеством используемых элементов, схемой их работы в виде единой системы, внешними помехами, поломкой оборудования и рядом других факторов. Поэтому, чтобы выработать у операторов, обучаемых с помощью тренажерных комплексов на основе трехмерной виртуальной среды, правильные навыки управления техническими средствами, при выполнении визуализации сцены посредством виртуальных устройств наблюдения целесообразно моделировать эффекты и искажения изображения, присущие их реальным прототипам.

В области развития подходов к моделированию средств видеонаблюдения в системах виртуального окружения, включая методы визуализации получаемых ими изображений с учетом физических характеристик и возможных искажений различной природы, ведутся активные исследования. Так, в работе [9] описывается модель виртуальной камеры с тонкой линзой, учитывающая такие физические параметры, как фокусное расстояние и диафрагменное число. Авторы публикации [10] предлагают решение для распределенной реализации эффекта глубины резкости на изображениях от виртуальных устройств наблюдения с использованием многоядерного графического процессора (GPU). Статьи [11, 12] посвящены задаче рендеринга трехмерных сцен в расширенном динамическом диапазоне яркостей (HDR) с последующим преобразованием к диапазону, который отображается устройствами вывода без поддержки технологии HDR. В работе [13] описываются методы и алгоритмы визуализации в масштабе реального времени (генерация одного кадра занимает не более 40 мс) изображений виртуальной среды с имитацией внешнего влияния на камеру, состоящего в попадании атмосферных осадков на стекло ее объектива. Публикация [14] посвящена подходам и методам для реализации таких искажений, как белый шум, срыв синхронизации, засветка и пересветка.

В данной работе предлагаются оригинальные методы и алгоритмы для моделирования в трехмерных сценах виртуальных прототипов реальных средств наблюдения с имитацией искажений видеосигнала, связанных с конструктивными особенностями оптических элементов и выражающихся в эффекте дисторсии и хроматической аберрации двух типов. Они основаны на применении распределенных вычислений с помощью многоядерных GPU. Новизной разработанных решений является оригинальный подход к реализации бочкообразной дисторсии на основе коррекции поля зрения виртуальной камеры, обеспечивающий полный и эффективный синтез изображения кадра, а также авторский метод моделирования хроматических аберраций на графическом процессоре в масштабе реального времени.

Подушкообразная и бочкообразная дисторсия

Одним из часто встречающихся типов искажений изображения в устройствах наблюдения является дисторсия. Такие искажения возникают в оптических системах объективов и выражаются в изменении коэффициента линейного увеличения по мере удаления отображаемых предметов от оптической оси. В результате нарушается геометрическое подобие между наблюдаемым объектом и его изображением. Эффект дисторсии превращает прямые линии объектов, не пересекающие оптическую ось, в дуги. Если они являются вогнутыми относительно центра изображения, то имеет место подушкообразная дисторсия, а если выпуклыми — бочкообразная. Рисунок 1 наглядно демонстрирует оба этих случая для изображения поверхности с текстурой шахматной доски.

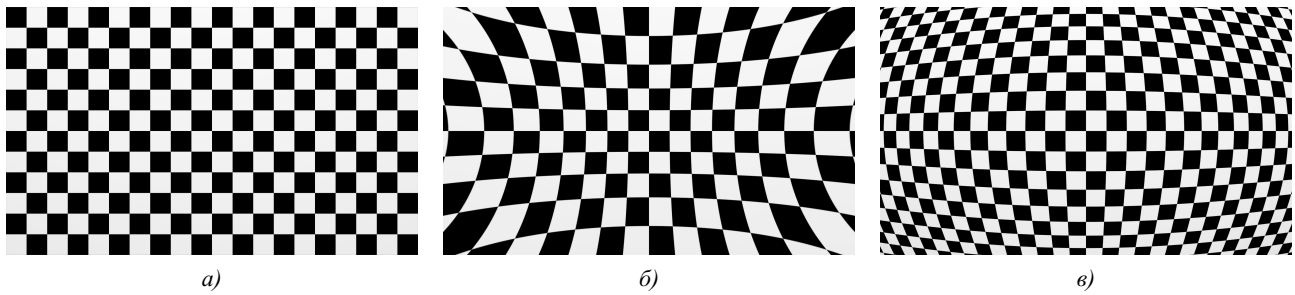


Рис. 1. Исходное изображение (а), подушкообразное (б) и бочкообразное (в) искажения

В настоящей работе реализация дисторсии изображений, получаемых с виртуальных устройств наблюдения, основывается на модели деления. Данная модель была впервые предложена Реймаром Ленцем в 1987 году, но обратила на себя большее внимание уже после исследований в работе [15]. Она формулируется следующим образом:

$$L(r) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n k_i r^{2i}}, \quad (1)$$

где k_i — коэффициенты радиального искажения, n — количество слагаемых в сумме, r — расстояние от точки искаженного изображения до его центра. Для достижения реалистичного результата вполне достаточно ограничиться $n = 2$, то есть использовать только параметры k_1 и k_2 . Пусть начала систем координат U_0V_0 и UV располагаются в центре неискаженного и искаженного изображений соответственно, оси U_0 и U направлены горизонтально вправо, оси V_0 и V — вертикально вверх, а значения координат задаются на отрезке $[-0.5, 0.5]$. Тогда в рамках модели (1) произвольной точке P с координатами (u, v) на искаженном изображении соответствует точка P_0 с координатами (u_0, v_0) на исходном, которая определяется как

$$P_0 = L(r) \cdot P = \frac{P}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4}, \quad r = \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (2)$$

Чтобы смоделировать дисторсию, используем подход на базе технологии постобработки визуализируемого кадра. Он включает два этапа. На первом из них выполняется рендеринг изображения от виртуального устройства наблюдения без учета искажений. Результат записывается в специальный внеэкранный буфер (FBO) с тем же разрешением, что и у текущего буфера кадра. На втором этапе шейдер постобработки выполняет на GPU распределенную закраску самого буфера кадра, используя созданный FBO-буфер в качестве входной текстуры T_0 , хранящей неискаженное изображение.

Суть работы шейдера состоит в следующем. Пусть размер кадра составляет $W \times H$ пикселей, а каждый закрасиваемый пиксель имеет целочисленные координаты $x \in [0, W - 1]$ и $y \in [0, H - 1]$ в системе XU с началом в левом нижнем углу этого кадра и направлением осей влево (X) и вверх (Y). Для пересчета x и y в упомянутую выше систему координат UV необходимо масштабировать оси и сдвинуть начало системы XU :

$$u = \frac{x}{W} - 0.5, \quad v = \frac{y}{H} - 0.5. \quad (3)$$

Далее по формуле (2) шейдер вычисляет соответствующие u и v координаты u_0 и v_0 на неискаженном изображении и преобразует их в координаты

$$s_0 = u_0 + 0.5, \quad t_0 = v_0 + 0.5$$

со значениями из отрезка $[0.0, 1.0]$ для доступа к текстуре T_0 и получения искомого цвета закрасиваемого пикселя (x, y) .

Данное решение хорошо подходит для реализации подушкообразной дисторсии, при которой коэффициент $k_1 > 0$ и значение функции $L(r) < 1$. В этом случае исходное изображение растягивается и видимое пространство «выталкивается» за рамки кадра, а для любой точки P внутри искаженного

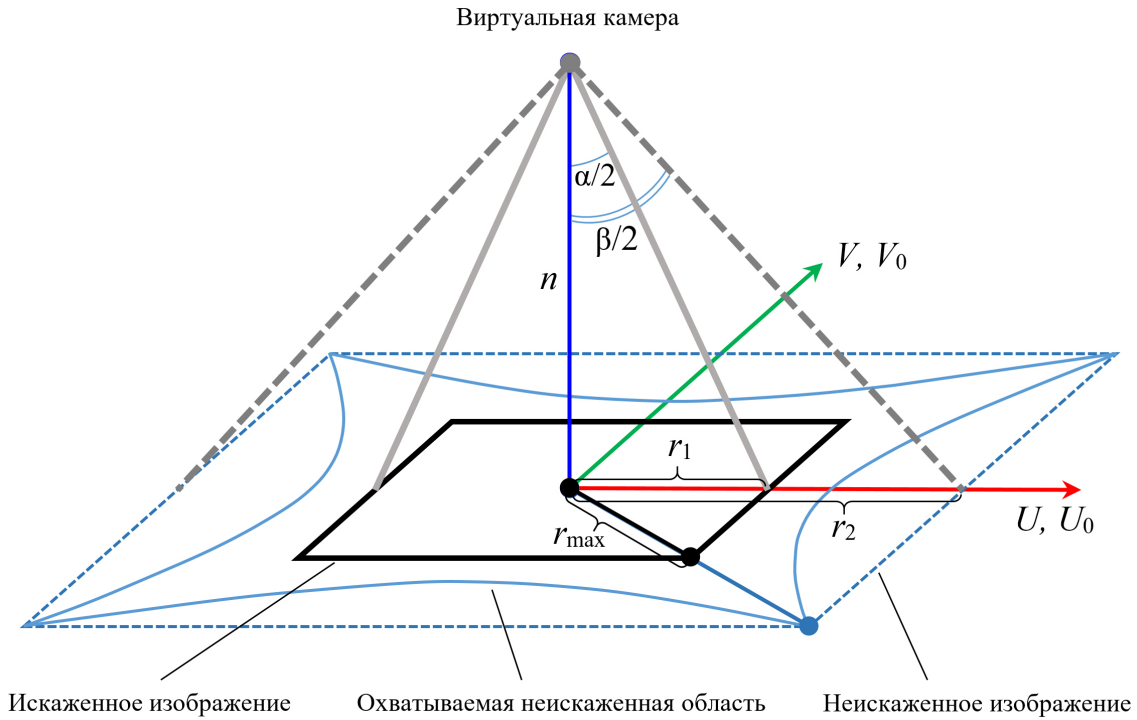


Рис. 2. Коррекция поля зрения виртуальной камеры

кадра существует соответствующая ей точка P_0 в текстуре T_0 . При бочкообразной дисторсии ($k_1 < 0$, $L(r) > 1$) наблюдается обратный эффект, при котором исходное изображение стягивается к центру кадра, а по его краям появляются участки пространства, ранее находившиеся вне рамок кадра. Проблема состоит в том, что какая-либо информация об этих участках отсутствует в исходном изображении и текстуре T_0 , а значит, шейдер не может рассчитать их цвет.

Для решения описанной проблемы в данной работе предлагается оригинальный подход, основанный на коррекции поля зрения виртуальной камеры на этапе визуализации неискаженного изображения, если коэффициент k_1 имеет отрицательное значение, с последующим масштабированием координат в системе UV на этапе постобработки. Рассмотрим этот подход подробнее. Пусть α — текущий угол горизонтального раствора используемой виртуальной камеры, β — искомый угол раствора, при котором визуализируемое неискаженное изображение будет содержать необходимую информацию для выполнения нашего шейдера постобработки, n — расстояние до ближней отсекающей плоскости камеры. На рисунке 2 представлено совмещение искаженного и неискаженного изображений относительно их систем координат UV и U_0V_0 , а также горизонтальные растворы виртуальной камеры с углами α и β . Тангенсы половин этих углов равны

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{r_1}{n}, \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{r_2}{n} = \frac{k \cdot r_1}{n} = k \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

где r_1, r_2 — расстояния по осям U и U_0 от центров изображений до их вертикальных границ, k — неизвестный коэффициент масштабирования. Чтобы вычислить k , вспомним, что при бочкообразной дисторсии значение коэффициента $k_1 < 0$ и согласно формуле 2 при переходе от искаженного изображения к неискаженному происходит радиальное растяжение, то есть расстояние r от произвольной точки до центра увеличивается в $L(r)$ раз. Максимальное увеличение происходит в точках $(-0.5, -0.5)$, $(-0.5, 0.5)$, $(0.5, 0.5)$, $(0.5, -0.5)$, соответствующих углам кадра и удаленных от его центра на расстояние r_{\max} (рис. 2). Таким образом, чтобы неискаженный кадр содержал все точки для формирования искаженного, коэффициент k должен быть вычислен как

$$k = L(r_{\max}), \quad r_{\max} \approx 0.7071.$$

Тогда искомый угол β горизонтального раствора камеры для этапа визуализации неискаженного изоб-

ражения определим по следующим формулам:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = L(r_{\max}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

$$\beta = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left(L(r_{\max}) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right).$$

Далее, устанавливая полученный угол β для соответствующей виртуальной камеры, выполняем рендеринг сцены в FBO-буфер (текстуру T_0), разрешение которого совпадает с размерами $W \times H$ кадра.

Учитывая выполненное увеличение поля зрения камеры, а также отсутствие изменения фактических размеров (в пикселях) FBO-буфера и текстуры T_0 , содержащей неискаженное изображение, на этапе постобработки необходимо масштабировать координаты точки P_0 , получаемые по формуле (2). Коэффициент такого масштабирования должен иметь значение $1/k$. Тогда

$$P_0 = \frac{1}{k} \cdot L(r) \cdot P = \frac{L(r)}{L(r_{\max})} \cdot P, \quad L(r) = \frac{1}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4}, \quad r = \sqrt{u^2 + v^2}.$$

Хроматические aberrации

Еще одним распространенным типом искажений в устройствах наблюдения является хроматическая aberrация. Причина ее появления заключается в том, что световые волны разной длины по-разному преломляются в линзах объектива и в результате этого фокусируются в разных точках. На изображении это выражается в виде цветных ореолов и окантовок, приводящих к потере четкости. Существуют два типа хроматических aberrаций: поперечные (хроматизм увеличения) и продольные (хроматизм положения). Они имеют разные характеристики, но могут происходить одновременно.

Поперечная хроматическая aberrация возникает при фокусировке световых волн различной длины в несовпадающих точках фокальной плоскости. Левая часть рисунка 3 демонстрирует эту ситуацию. Через r_R , r_G и r_B обозначены расстояния от точек, соответствующих волнам красного, зеленого и синего спектра, до оптической оси. При этом масштаб изображения отличается для разных цветовых каналов получаемого кадра. Данный тип искажения не зависит от используемого диафрагменного числа и фокусного расстояния. Продольная хроматическая aberrация происходит в том случае, если разные длины волн света фокусируются на разных расстояниях от линзы (рис. 3, справа). Поскольку многие камеры выполняют фокусировку с использованием зеленого цветового канала, то на получаемом изображении основная расфокусировка приходится на красный и синий каналы. Как правило, искажение перестает быть заметным при закрытии диафрагмы до $f/2.8$ – $f/4$.

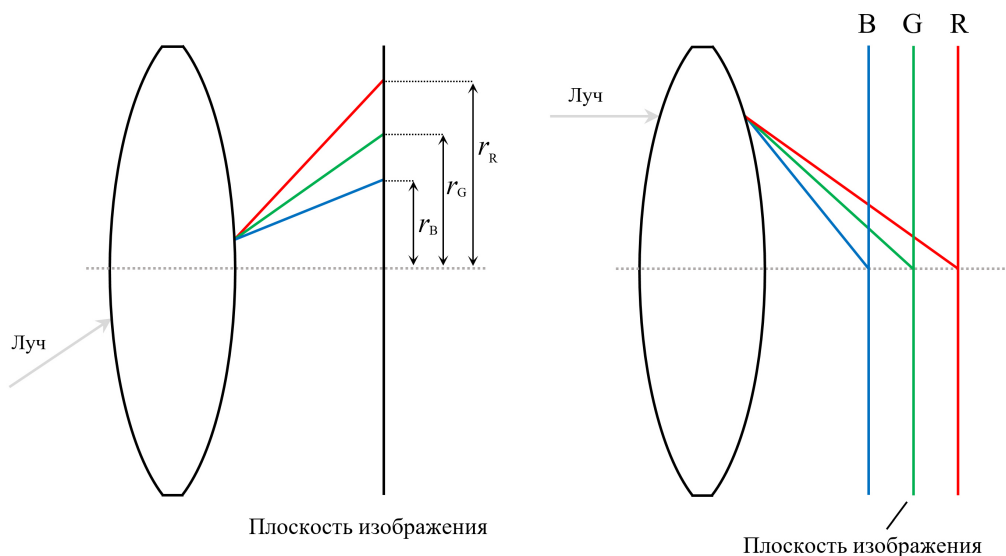


Рис. 3. Поперечная (слева) и продольная (справа) хроматические aberrации

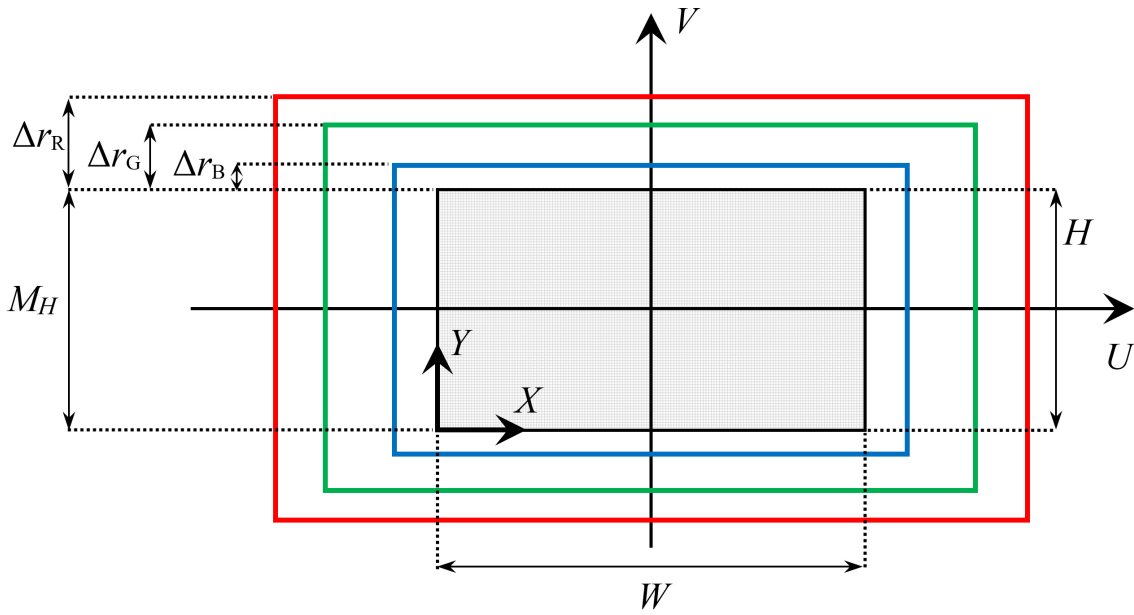


Рис. 4. Масштаб изображения относительно размера сенсора для цветных каналов R, G и B при поперечной хроматической аберрации

Предлагаемый в данной работе подход к моделированию хроматических аберраций, как и в случае дисторсии, содержит два этапа. Первый этап заключается в визуализации виртуальной сцены без аберраций в текстуру T_0 посредством FBO-буфера. На втором этапе выполняется распределенная постобработка полученного изображения с помощью специального фрагментного шейдера. Рассмотрим основные принципы реализации этого шейдера подробнее. Пусть размер формируемого изображения составляет $W \times H$ (в пикселях), а каждый закрашиваемый пиксель имеет координаты $x \in [0, W - 1]$ и $y \in [0, H - 1]$ в системе XY , расположенной в левом нижнем углу кадра. Поскольку, как было упомянуто ранее, при поперечной хроматической аберрации каждый из цветных каналов R, G и B изображения, получаемого реальной камерой, имеет некоторый собственный масштаб относительно размеров сенсора (электронной матрицы) устройства наблюдения, то для расчета цвета пикселя (x, y) необходимо найти соответствующие ему точки в каналах R, G и B текстуры T_0 . Отметим, что все цветные каналы текстуры T_0 изначально имеют одинаковый масштаб изображения. Поэтому для решения поставленной задачи нужно вычислить не коэффициенты перехода от исходных текстурных координат к масштабированным, а, наоборот, от масштабированных — к исходным.

Обозначим ширину и высоту сенсора моделируемого устройства наблюдения через M_W и M_H соответственно, а через Δr_R , Δr_G , Δr_B — расстояния между условными верхними границами масштабированных цветных каналов R, G, B изображения и верхней границей этого сенсора, заданные в миллиметрах (рис. 4). Тогда коэффициенты масштабирования k_R , k_G , k_B для красного, зеленого и синего каналов относительно заданного размера матрицы устройства вычисляются по формулам

$$k_R = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_R}{M_H}, \quad k_G = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_G}{M_H}, \quad k_B = \frac{M_H + 2 \cdot \Delta r_B}{M_H}.$$

Изменение размеров изображения в цветных каналах имеет радиальный тип. Поэтому шейдер вначале должен преобразовать имеющиеся координаты x и y пикселя в систему UV с началом в центре кадра, описанную в предыдущем разделе. Координаты u и v вычисляются по формулам (3). Точка (u, v) определяет положение в масштабированных каналах. Для перехода к точкам в исходном неискаженном изображении, сохраненном в текстуре T_0 , необходимо применить коэффициенты, обратные к k_R , k_G и k_B , и сместить начало системы координат в левый нижний угол. Тогда текстурные координаты для красного, синего и зеленого каналов текстуры T_0 будут определяться по формулам

$$(s_R, t_R) = \left(k_R^{-1}u + 0.5, k_R^{-1}v + 0.5 \right),$$

$$(s_G, t_G) = (k_G^{-1}u + 0.5, k_G^{-1}v + 0.5),$$

$$(s_B, t_B) = (k_B^{-1}u + 0.5, k_B^{-1}v + 0.5).$$

Производя отдельную выборку цвета каждого канала текстуры T_0 по вычисленным координатам, шейдер формирует цвет пикселя (x, y) в условиях поперечной хроматической аберрации.

Чтобы учесть также влияние продольной хроматической аберрации, необходимо при выборке из цветовых каналов R и B применить фильтр Гаусса, который будет моделировать расфокусировку этих каналов. Степень эффекта зависит от настраиваемого размера фильтра. Напомним, что канал G сохраняет четкость, поскольку в большинстве устройств используется как раз для выполнения фокусировки изображения.

Результаты апробации

Предложенные в статье методы и подходы для моделирования оптических искажений видеосигнала, получаемого с виртуальных устройств наблюдения, были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim [16], созданном в НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ. Тестирование разработанных решений проводилось с помощью компьютера на базе процессора Intel Core i9-10940X, графической карты NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti и монитора с разрешением 4K (3840x2160). В качестве тестовой сцены использовалась трехмерная сцена виртуального полигона, в которой была размещена модель робота с камерой (рис. 5), имеющей возможность регулировки физических параметров (включая коэффициенты дисторсии и хроматической аберрации, а также значения фокусного расстояния и диафрагмы объектива). Время, затраченное на синтез каждого кадра такой сцены из данной камеры без имитации оптических искажений, составило в среднем 25 мс при использовании указанной конфигурации оборудования. Результат этой «эталонной» визуализации представлен на рисунке 6.



Рис. 5. Сцена виртуального полигона с моделью гусеничного робота

На рисунке 7 показаны результаты рендеринга трехмерной сцены полигона из той же камеры робота, но с имитацией «бочкообразной» ($k_1 < 0$) и «подушкообразной» ($k_1 > 0$) дисторсии при различных значениях коэффициента k_1 . Рисунки 8 и 9 демонстрируют применение высоких коэффициентов хроматической аберрации двух типов: поперечной и продольной. При этом наблюдаются характерные для хроматизма увеличения красно-зеленые окантовки объектов, увеличивающиеся к краям изображения, и зелено-фиолетовые ореолы, свойственные хроматизму положения. Среднее время генерации каждого кадра при рендеринге виртуального полигона с включенными эффектами дисторсии и аберрации составило в среднем 26 мс, что всего на 1 мс больше описанного выше эталонного результата без оптических искажений и подтверждает выполнение предложенных в работе методов и подходов в масштабе реального времени, а также их пригодность для систем виртуального окружения и тренажерных комплексов.



Рис. 6. Неискаженное изображение с виртуальной камеры на работе

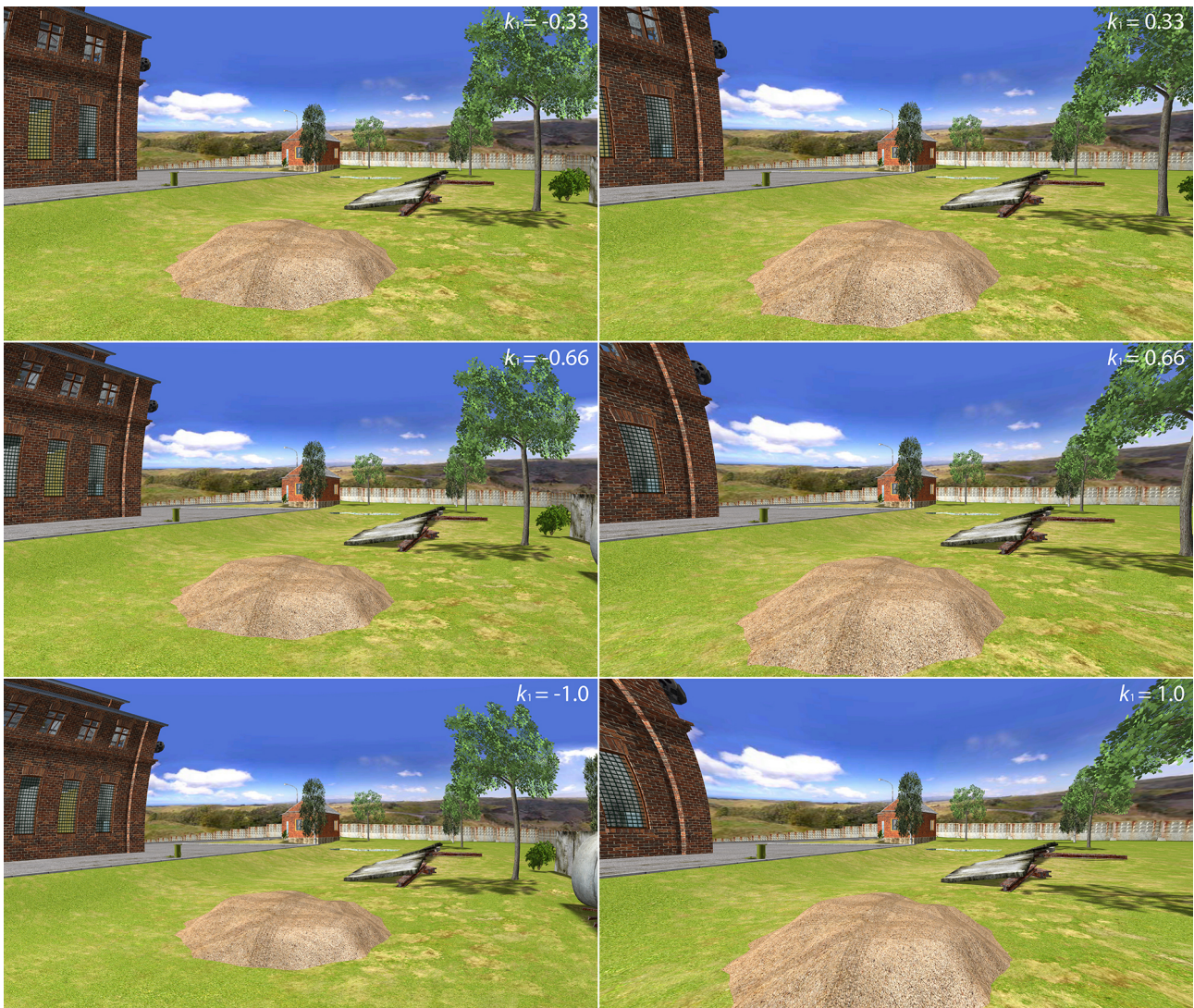


Рис. 7. Изображения с камеры робота при различных коэффициентах дисторсии

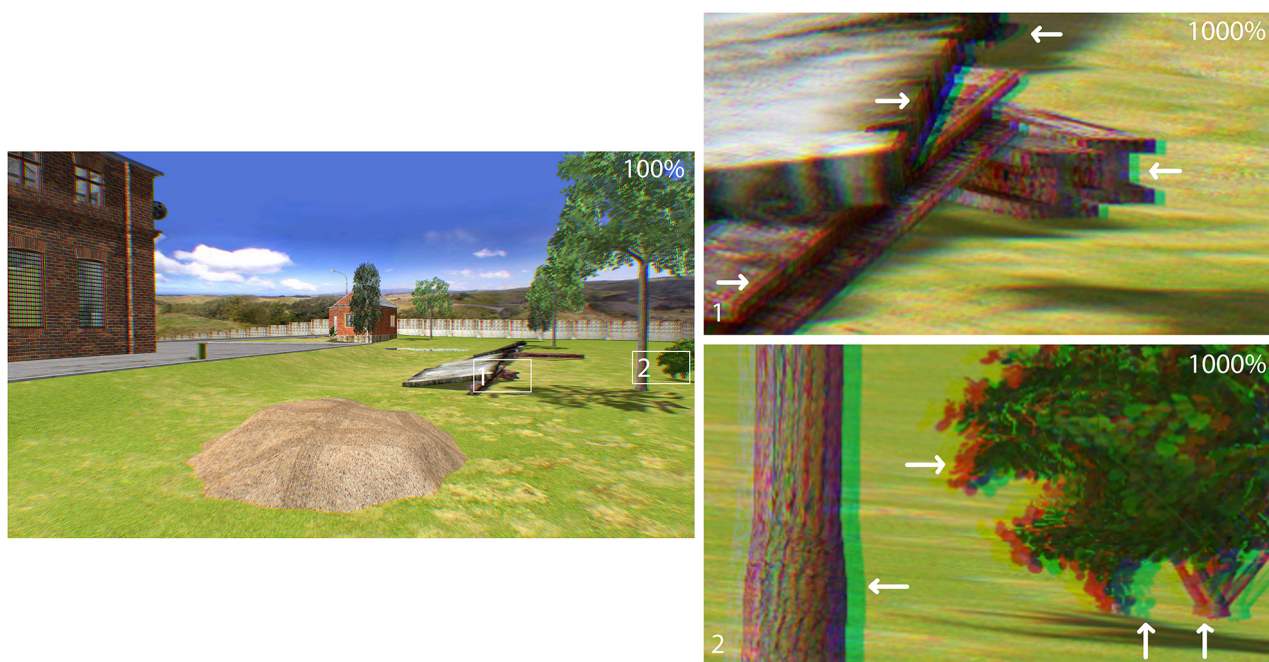


Рис. 8. Моделирование поперечной хроматической аберрации

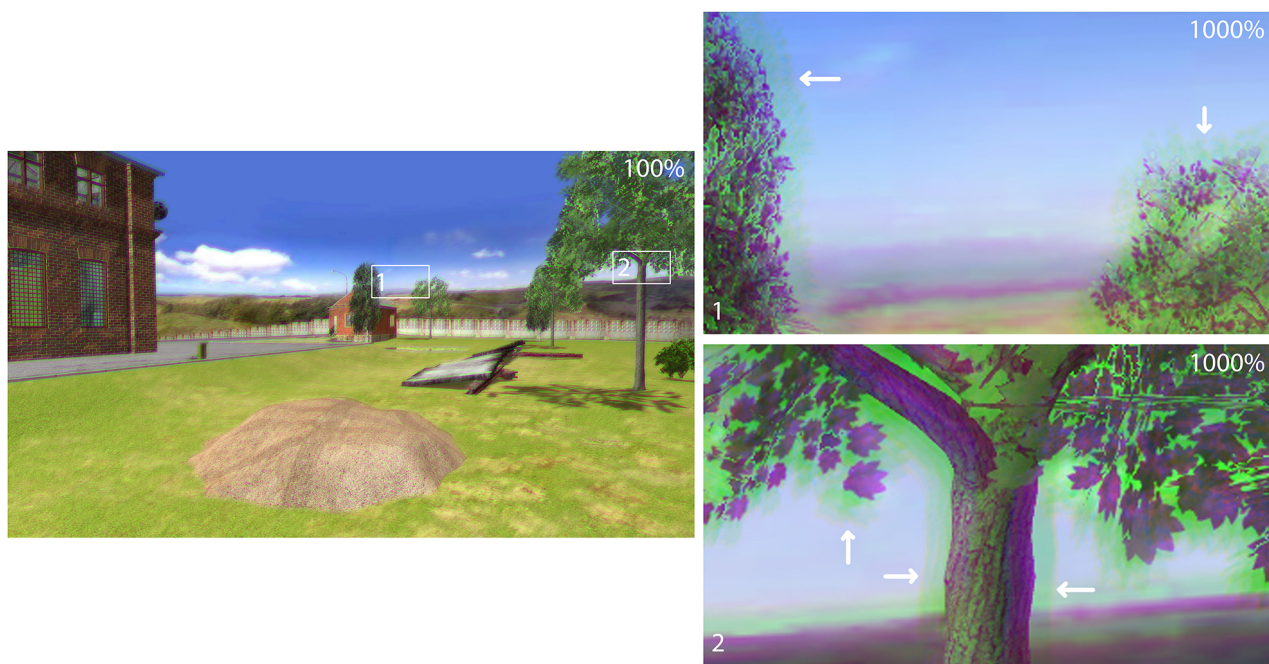


Рис. 9. Моделирование продольной хроматической аберрации

Заключение

В работе рассмотрена реализация эффектов оптических искажений изображения при моделировании в виртуальной среде реальных устройств наблюдения и визуализации получаемых с помощью этих моделей видеопотоков. Для этого предложены оригинальные методы и подходы к имитации дисторсии и хроматической аберрации. Разработанные решения основаны на применении распределенных вычислений с использованием современных многоядерных графических процессоров. Апробация предложенных методов и подходов продемонстрировала возможность их применения при реализации программного обеспечения тренажерных комплексов и систем виртуального окружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hülsmann F., Mattar N., Fröhlich J., Wachsmuth I. Simulating Wind and Warmth in Virtual Reality: Conception, Realization and Evaluation for a CAVE Environment. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*. 2014;11(10):1–21. DOI: 10.20385/1860-2037/11.2014.10.
2. 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*. 2019:1–10.
3. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Yu. Memory-Effective Methods and Algorithms of Shader Visualization of Digital Core Material Model. *Scientific Visualization*. 2019;11(5):1–11. DOI: 10.26583/sv.11.5.01.
4. Pezent E., Macklin A., Yau J. M., Colonnese N., O'Malley M. K. Multisensory Pseudo-Haptics for Rendering Manual Interactions with Virtual Objects. *Advanced Intelligent Systems*. 2023;5(5):1–13. DOI: 10.1002/aisy.202200303.
5. Garcia A. D., Schlueter J., Paddock E. Training Astronauts Using Hardware-in-the-loop Simulations and Virtual Reality. *AIAA SciTech Forum*. 2020:1–13. DOI: 10.2514/6.2020-0167.
6. Maltsev A. V. Computer Simulation of Video Surveillance Complexes in Virtual Environment Systems. *Scientific Visualization*. 2022;14(2):88–97. DOI: 10.26583/sv.14.2.08.
7. Qureshi F. Z., Terzopoulos D. Surveillance in Virtual Reality: System Design and Multi-Camera Control. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007:1–8. DOI: 10.1109/CVPR.2007.383071.
8. Bisagno N., Conci N. Virtual Camera Modeling for Multi-View Simulation of Surveillance Scenes. *26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2018:2170–2174. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2018.8553409.
9. 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*. 2003:246–255. DOI: 10.1007/3-540-44842-X_26.
10. Мальцев А. В., Торгашев М. А. Распределенное моделирование глубины резкости при визуализации трехмерных сцен на GPU. *Труды НИИСИ РАН*. 2019;9(5):100–104.
11. Тимохин П. Ю., Торгашев М. А. Визуализация космических сцен в расширенном диапазоне в режиме реального времени. *Информационные технологии*. 2014;12:53–60.
12. Mikhaylyuk M. V., Timokhin P. Y., Torgashev M. A. The Method of Real-Time Implementation of Tone Mapping and Bloom Effect. *Programming and Computer Software*. 2015;41(5):289–294.
13. Мальцев А. В. Синтез изображений трехмерных сцен с моделированием капель дождя на объективе виртуальной камеры. *Труды НИИСИ РАН*. 2021;11(3):36–40. DOI: 10.25682/NIISI.2021.3.0008.
14. Мальцев А. В. Методы моделирования световых эффектов и искажений видеосигнала в виртуальных средствах наблюдения. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2019;2:54–61. DOI: 10.14357/20718632190206.
15. Fitzgibbon A. W. Simultaneous Linear Estimation of Multiple View Geometry and Lens Distortion. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2001:125–132. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990465.
16. 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.