

Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

Аннотация

В работе рассматриваются вопросы использования изображений с большим динамическим диапазоном в качестве источника естественного дневного освещения для виртуальных сцен, содержащих материалы со сложными оптическими свойствами. В работе описаны физически обоснованные алгоритмы расчета яркости точки, распознавания солнца, генерации теней. Проведен анализ корректности существующих изображений с большим динамическим диапазоном, показаны их недостатки. Разработаны модификации алгоритмов, позволяющие скорректировать эти недостатки при моделировании освещенности на базе моделей неба, принятых Международной комиссией по освещенности. Описанные алгоритмы используются в системах компьютерной графики для генерации высокореалистичных изображений.

Ключевые слова: HDRI, изображение с большим динамическим диапазоном, естественное дневное освещение, трассировка лучей, глобальная освещенность, моделирование освещенности, BDF поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Большой динамический диапазон яркостей без труда воспринимается человеческим глазом. Чувствительность зрительной системы человека охватывает диапазон от 10^{-6} до 10^8 cd/m². Отношение этих предельных значений составляет 10^{14} . Правда глаз не может видеть свет из всего этого диапазона одновременно, вся доступная глазу одновременно гамма цветов составляет приблизительно 10^8 оттенков. Приспособление зрения к более широкому диапазону освещенности осуществляется посредством механизма, известного как адаптация, и требует времени даже для столь совершенного механизма, каким является человеческое зрение. Естественно такой диапазон яркостей не может быть отображен на современных графических дисплеях, чей динамический диапазон мал – соотношение самой яркой области с самой темной не превышает у них сотен раз.

Современное развитие компьютерной графики все больше внимания уделяет изображениям с большим динамическим диапазоном, предложенным впервые Грегом Вардом [1]. В англоязычной литературе они носят название HDRI – High Dynamic Range Images. В изображениях с большим динамическим диапазоном (назовем их для краткости «БДДИ») значения яркости для каждой точки выражаются реальными физическими величинами. Они позволяют передать интенсивности окружающей среды, даже за пределами чувствительности человеческого глаза.

Первоначально изображения с большим динамическим диапазоном являлись результатом исключительно моделирования освещенности сцен. Для вывода итогового изображения на экран его необходимо было преобразовать в динамический диапазон графического дисплея [2]. В

настоящее время изображения реальных объектов с большим динамическим диапазоном яркостей могут быть получены путем обработки последовательности фотографий с различной экспозицией [3] или специальным панорамным сканированием [4]. Именно получение фотографических изображений объектов и пейзажей с сохранением яркости и цвета реального мира и открыло широкие возможности для использования БДДИ в компьютерной графике.

Наиболее интенсивно развивающимся применением БДДИ является технология освещения, задаваемого изображением (IBL – Image-Based Lighting) [5]. Моделирование распространения света в различных средах лежит в основе большинства алгоритмов генерации реалистичных изображений. Технология освещения изображением – это когда источником света для моделирования является изображение. Можно задать в качестве источника света сфотографированное небо или выставочный зал и смоделировать, как будет освещен тот или другой объект в этих условиях. Надо отметить, что задание таких условий освещения другими способами может оказаться весьма трудоемким и дорогостоящим процессом. Одновременно с заданием освещения БДДИ решает также проблему задания окружения (фона) моделируемой сцены.

Многие существующие системы моделирования и визуализации, такие как 3dMax (Mental ray, VRay, brazil r/s), Softimage, Maya и др., используют БДДИ в качестве фоновых панорам, что существенно увеличивает правдоподобность получаемых итоговых изображений. Однако, не все системы рассчитывают освещение сцены, анализируя изображение с большим динамическим диапазоном. В случае расчета освещения от БДДИ используются алгоритмы, как правило, хорошо применимы для случая протяженных и площадных источников света, таких как, например, облачное небо. Такие источники дают мягкие тени с неясным направлением на источник света. Ни одна из известных нам систем не умеет правильно моделировать освещенность, задаваемую БДДИ с безоблачным небом и прямо видимым солнцем.

LightWave 3D [6] является примером программной системы визуализации, использующей БДДИ и в качестве фонового изображения, и для расчета освещения сцены. Для расчета глобального освещения в LightWave 3D применяется метод radiosity. Этот метод хорошо работает с протяженным источником света, и позволяет получить качественные мягкие тени. Однако при работе с БДДИ, содержащими солнце, система не может воспроизвести четкие тени автоматически. В качестве решения проблемы пользователю LightWave 3D предлагается вручную установить дополнительный источник света по направлению солнца с соответствующим уменьшением яркостей БДДИ.

Этот же прием – установку дополнительного точечного или параллельного источника света для получения резких теней – используют и ряд других систем визуализации. Фирмы, занимающиеся коммерческим производством и поставкой библиотек БДДИ на рынок, стараются не изменять

положения солнца на небосводе во всей серии изображений. Для подобных систем визуализации это обеспечивает взаимозаменяемость БДДИ панорам при компоновке сцены и задании свойств материалов без изменения ручных настроек.

2. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ СЦЕНЫ, ОСВЕЩЕННОЙ БДДИ

Нашей задачей было смоделировать объекты с достаточно сложными свойствами поверхности, такие как многослойные краски. В общем случае оптические свойства описываются двунаправленной функцией отражения (ДФО или BRDF – Bidirectional Reflection Distribution Function) [7]. ДФО, заданная в некоторой точке поверхности, определяет какая часть энергии, принятая с направления w_{in} будет рассеяна поверхностью в направлении w_{out} .

2.1. Определение яркости точки поверхности

Яркость точки поверхности, заданной с помощью ДФО (BRDF), вычисляется с помощью следующего интеграла:

$$L = \frac{1}{\pi} \int_{(\bar{n} \cdot \bar{\omega}) \geq 0} BRDF(\sigma(\bar{n}, \bar{\omega}, \bar{v}), \vartheta(\bar{n}, \bar{\omega}, \bar{v}), \varphi(\bar{n}, \bar{\omega}, \bar{v}))(\bar{n} \cdot \bar{\omega}) I(\bar{\omega}) d^2\omega$$

где $\bar{\omega}$ – направление освещения точки,

\bar{v} – направление наблюдения,

\bar{n} – вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке,

I – интенсивность освещения,

$I(\bar{\omega})d^2\omega$ – интенсивность освещения, испускаемая всеми точками БДДИ, принадлежащими телесному углу $d^2\omega$, σ , ϑ , φ – угловые координаты двунаправленной функции отражения ДФО: σ - угол между нормалью и направлением зеркального отражения, ϑ - между направлением зеркального отражения и направлением наблюдения, φ - поворот направления наблюдения вокруг зеркального отражения.

Метод Монте-Карло обратной трассировки лучей позволяет вычислить такой интеграл достаточно эффективно для большинства видов ДФО. Для расчета глобальной освещенности необходимо также учитывать свет, отраженный от других диффузных поверхностей сцены. В описываемом алгоритме для расчета этой компоненты использовался метод Монте-Карло прямой трассировки лучей. Подробно методы Монте-Карло прямой и обратной трассировки лучей, вопросы их сходимости и точности вычислений рассмотрены в работе [8].

2.2. Получение теней

При генерации реалистичного изображения необходимо поместить виртуальный объект (например, цифровую модель автомобиля) непосредственно в окружение, задаваемое БДДИ. В этом случае автомобиль должен отбрасывать тень на дорогу (как это показано на рис. 2), которая присутствует в изображении, но которой нет в описании сцены.

Для решения этой задачи в сцену вводится полностью прозрачная виртуальная плоскость, расположенная перпендикулярно к направлению зенита. На этой плоскости как бы стоит модель автомобиля. Тени от объектов сцены на виртуальной плоскости вычисляются с помощью метода Монте-Карло обратной трассировки лучей. Если луч, проходящий через точку экрана, пересекает виртуальную плоскость и попадает на фон, заданный БДДИ, то для вычисления теней используется фактор затенения, определяемый для точки пересечения с виртуальной

плоскостью. В точке пересечения вычисляется освещенность диффузной поверхности с учетом возможного затенения и без него. Отношение этих величин и есть фактор затенения умножаемый на видимая яркость фона (БДДИ).

2.3. Распознавание солнца и ярких источников света

Для эффективного расчета глобальной освещенности необходимо выделить из изображения с большим динамическим диапазоном области с большими яркостями и заменить их традиционными источниками света. БДДИ панорама считается расположенной на бесконечно удаленной сфере. Поэтому логично заменить выделенные области параллельными источниками света.

Выделение областей с большой яркостью и замена их на параллельные источники света решает также задачу построения четких теней от солнца или другого яркого источника освещения. Как уже упоминалось ранее, существующие программные системы предлагают пользователю вручную устанавливать дополнительный источник света, отбрасывающий четкую тень. Распознавание и выделение источников света позволило впервые автоматически промоделировать освещенность для БДДИ с видимым солнцем.

Для выделения источников света были введены три коэффициента, регулирующих процесс распознавания областей с большой яркостью и расчета мощности источника. Первый коэффициент используется для определения направления на источник света и задает порог яркости точки БДДИ, определяющий является ли она источником света. Второй и третий коэффициенты используются для определения всей области с большой яркостью и в конечном итоге для вычисления яркости источника света. Второй коэффициент задает максимальный радиус яркой области. Точки, яркость которых превышает заданный порог, но найденные за пределами этого радиуса будут рассматриваться как другие источники света. Третий коэффициент задает минимальную яркость точки БДДИ, которая будет рассматриваться как составляющая источника света. Таким образом, при выделении источника света используются все точки, лежащие ближе указанного радиуса от наиболее яркой точки, с яркостью выше минимальной.

Для автоматического выделения источников света все изображение с большим динамическим диапазоном делится на сегменты, соответствующие пирамиде зрения $45^\circ \times 45^\circ$. Сегменты рассматриваются только для верхней полусферы, как это показано на рис. 1.

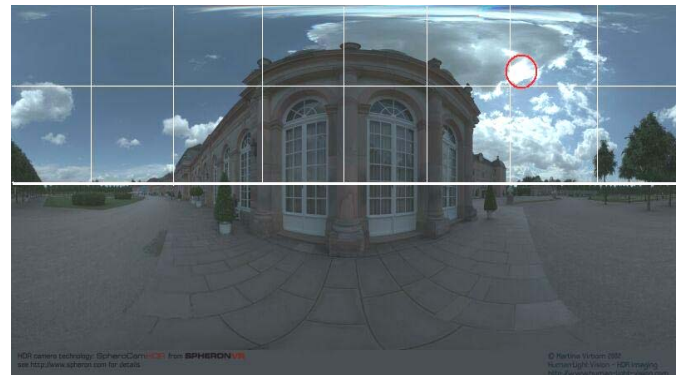


Рис. 1. Разбиение БДДИ для автоматического выделения источника света. Кругом показан найденный источник

Значения яркостей всех БДДИ точек, использованных при выделении источника света и задании его мощности, обрезаются. В результате для дальнейших расчетов освещенности мы имеем достаточно гладкую функцию освещения, задаваемую обрезанным БДДИ, и набор ярких параллельных источников света.

Значения коэффициентов для порога яркости, определяющего направление на источник света, и минимальной яркости, определяющей составляющие источника света, рассчитываются по эмпирической формуле и зависят от средней яркости сегмента изображения. Оптимальное значение максимального радиуса яркой области также определялось на основе экспериментов.

3. АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Оказалось, что описанный в предыдущей главе, довольно мощный механизм использования БДДИ еще не гарантирует получение реалистичных изображений фотографического качества. Алгоритмы, разработанные авторами для построения изображения, освещаемого БДДИ, являются физически обоснованными, и ожидалось, что они должны генерировать корректное изображение. Однако это верно только, если входные данные, т.е. сами БДДИ, являются физически корректными. Поэтому следующим этапом нашей работы стал анализ БДДИ. Наиболее важными являются три характеристики БДДИ:

- динамический диапазон,
- правильность представления солнца,
- пространственное разрешение.

Все исследованные БДДИ были сделаны на устройствах компании SpheronVR [9] как самой компанией, так и фирмой Dosch Design [10], использующей приборы Spheron.

3.1. Динамический диапазон БДДИ

Для получения правильного, реалистичного изображения входные данные, т.е. БДДИ панорама, должны максимально правильно передавать условия реальности, существовавшие во время процесса фотографирования. Это означает, что если в реальности диапазон яркостей (например, соотношение яркости солнца к яркости предмета внутри помещения) был достаточно велик, то и БДДИ должно содержать динамический диапазон такого же порядка.

Основные проблемы встретились при использовании БДДИ с непосредственно видимым солнцем. Для анализа этих БДДИ за основу были взяты стандартные модели ясного полуденного неба (clear sky model) и модель частично облачного неба (party cloudy model) Международной комиссии по освещению CIE и Северо-Американской ассоциации по освещению IESNA [11]. Для модели ясного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 23737.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^4 . Для модели частично облачного неба соотношение максимальной яркости солнечного неба к минимальной составляет 4722.4, т.е. динамический диапазон неба должен быть порядка 10^3 . Выделение всех точек БДДИ, принадлежащих небу, является в общем случае непростой задачей. Гораздо легче вычислить полный динамический диапазон БДДИ, включающий также точки, принадлежащие нижней полусфере панорамы с изображением домов, почвы и т.д. По нашей оценке нижняя полусфера добавляет пару порядков к диапазону БДДИ.

Поэтому приблизительная оценка динамического диапазона всего БДДИ с солнцем должна быть не менее 10^6 , а частично облачного – 10^5 . Если БДДИ не содержит такого диапазона величин, то оно не отражает реальность, и это приводит к неправильным результатам моделирования освещенности.

Нижняя граница яркости может принимать очень маленькие, ненулевые значения (например, 10^{-15} , 10^{-8} или 10^{-3}). Для человеческого восприятия эти величины представляют собой очень темные области неразличимые глазом, они являются просто «шумом» элементов цифровой камеры в процессе фотографирования. Для того чтобы иметь возможность отбросить такие малые величины, все значения яркостей были переведены в единицы измерения nit или кандела на метр квадратный (cd/m^2). Представление яркостей в nit единицах используется в частности для замера яркостей мониторов. При этом известно, что максимальные яркости ЭЛТ-монитора имеют значения 250-300 nit. Поэтому можно заменить все значения менее 1 nit на единицу, так как для человеческого глаза эти величины неразличимы.

В табл. 1 приведены значения динамического диапазона для БДДИ, содержащих небо и созданных фирмой Dosch.

Динамический диапазон	Наименование БДДИ
114.5	DH222SX.hdr
483.2	DH223SX.hdr
596.9	DH221SX.hdr
744.7	DH211SX.hdr
2047.8	DH210SX.hdr
2762.0	DH203SX.hdr
2780.8	DH216SX.hdr
2856.2	DH201SX.hdr
3241.1	DH204SX.hdr
3961.0	DH215SX.hdr

Табл. 1. Динамический диапазон БДДИ фирмы Dosch.

Как хорошо видно из табл. 1, ни одно из исследованных БДДИ, созданных фирмой Dosch, не содержит достаточно большого динамического диапазона. Максимальный диапазон составил всего $4.0 \cdot 10^3$, что на два-три порядка ниже ожидаемого. Некоторые БДДИ содержат диапазон порядка 10^2 , что соответствует обыкновенным фотографиям. Моделирование освещенности, заданное такими БДДИ, не может быть корректным, и реалистичные изображения будут содержать недостатки, о которых уже говорилось ранее: мягкие тени от солнца, недостаточное освещение объектов сцены и т.д.

Динамический диапазон	Наименование БДДИ
2308	Ludwigshoehe.hdr
2956	North_Circlehouse.hdr
3116	SpheronVR CarPark.hdr
8951	CarParkWFB.hdr
55727	a52_Lagerschuppen.hdr
60583	alster.hdr
627979	Hill HDR Sphere.hdr
638362	Direct sun roof 003.hdr

Табл. 2. Динамический диапазон БДДИ, фирмы Spheron

Значения динамического диапазона для БДДИ, созданных фирмой Spheron, представлены в табл. 2. Как

видно из таблицы изображения с большим динамическим диапазоном, созданные фирмой Spheron, содержат величины яркостей с гораздо лучшим диапазоном. Два последних БДДИ имеют приемлемый диапазон яркостей ($6 \cdot 10^5$). Диапазон двух предпоследних также близок к приемлемому.



Рис. 2. Изображение, построенное на базе БДДИ «Direct sun roof 003.hdr» (динамический диапазон – $6,4 \cdot 10^5$)

На рис. 2 представлен результат моделирования освещенности, заданной БДДИ «Direct sun roof 003.hdr», и генерации реалистичного изображения автомобиля. Хорошо видны четкие тени, созданные солнечным светом. Внешний вид краски автомобиля показывает, что он правильно освещен.

Однако при восприятии изображения, приведенного на рис. 2, создается впечатление, что солнце недостаточно яркое. Это видно по тени, которая выглядит светлее, чем ожидается. Солнечный блик на корпусе автомобиля размыт, что характерно для слабых источников света. Поэтому дальнейший анализ БДДИ касался правильности представления солнца.

3.2. Правильность представления солнца

Как и в предыдущем случае, для проверки правильности задания солнца были также использованы стандарты CIE и IESNA. Освещенность горизонтальной поверхности для модели ясного неба складывается из освещения, порождаемого солнцем, и освещения, созданного небесной полусферой за исключением солнца. Согласно стандарту CIE соотношение освещенностей, порождаемых этими частями, приблизительно равно 4:1, т.е. солнце создает в четыре раза большее освещение горизонтальной поверхности, чем вся остальная небесная полусфера.

Было вычислено соотношение освещения горизонтальной поверхности зоной солнца и всего остального неба для БДДИ «Direct sun roof 003.hdr» и a52_Lagerschuppen.hdr. Соотношение освещения, задаваемого первым БДДИ, оказалось 1:1, т.е. освещение, порождаемое солнцем, равно освещению, создаваемому небом. Соотношение освещения, задаваемого вторым БДДИ, оказалось 1:5, т.е. освещение, создаваемое солнцем, оказалось в пять раз меньше, чем освещение, создаваемое небом. При этом оба БДДИ представляют ясное небо с хорошо видимым солнцем, находящимся достаточно высоко над горизонтом. Это показывает, что представление солнца в

БДДИ некорректно. Яркость солнца является сильно недооцененной.

В действительности невозможно получить корректные значения яркости в области солнца с помощью фотографирования без специальных фильтров. Ни одна камера не способна корректно воспринять и оцифровать такие большие яркости. Работа с фильтрами существенно усложняет процесс создания БДДИ. Поэтому ошибки в изображении солнца будут присутствовать практически всегда. Алгоритмы моделирования освещенности должны учитывать и компенсировать эти дефекты и ошибки БДДИ.

3.3. Пространственное разрешение БДДИ

Важным фактором реалистичности сгенерированного изображения является согласованность изображений фона, полученного в результате фотографирования, и смоделированных объектов сцены.

Для получения высококачественного итогового изображения разрешение фона, который является фрагментом БДДИ панорамы, должно быть приблизительно 2000 на 1500 точек. Предполагая, что горизонтальный угол зрения при генерации изображения равен 60° , а вертикальный – 45° , получаем размер БДДИ панорамы порядка 12000 на 6000 точек. Согласно спецификациям устройства SpheroCam (Spheron) [9] оно может создавать БДДИ панорамы с максимальным размером 10600 на 5300 точек. Этот размер близок к требуемому, однако, в действительности ни Spheron, ни Dosch не производят БДДИ панорамы с таким разрешением. Dosch предлагает БДДИ с «экстремально большим разрешением» 6248 на 3124 точек, что приблизительно в четыре раза меньше как наших требований, так и спецификаций прибора.

3.4. Время фотографирования БДДИ

Время фотографирования БДДИ является одним из главных факторов, влияющих на их качество. Из общих соображений время фотографирования БДДИ должно быть максимально коротким. В противном случае в процессе фотографирования будет изменяться снимаемое окружение и условия освещения: солнце опустится по отношению к линии горизонта с соответствующим изменением его яркости, оно может зайти за облако или объект окружения (здание, дерево). Все это приведет к тому, что часть БДДИ, отснятая сначала, не будет соответствовать его окончательной части.

Технологически БДДИ не может быть отснято за пренебрежимо малое время. Для получения действительно большого диапазона яркостей необходимо сделать порядка 25-30 снимков в одном направлении, отличающихся только различными экспозициями. Для получения достаточного пространственного разрешения необходимо отснять больше десятка таких направлений. Цифровым камерам требуется время для сохранения изображений с большим разрешением в памяти или для пересылки их в управляющий компьютер. Также камере необходимо время на позиционирование, установку очередной экспозиции, восстановление после серии кадров и т.д. По нашим оценкам при управлении с компьютера камерой и ее позиционированием съемка качественного БДДИ требует около полутора часов. Понятно, что это значительное время, которое вряд ли можно позволить при съемке БДДИ снаружи помещений.

Создание же БДДИ с небольшим динамическим диапазоном или небольшим пространственным разрешением требует нескольких минут. В то же время большинство

существующих систем компьютерной графики используют БДДИ только в качестве фона, и не нуждаются в правильном представлении яркостей. Для этих целей даже БДДИ, созданные фирмой Dosch и имеющие очень слабые характеристики, являются вполне приемлемыми.

Таким образом, процесс создания качественного БДДИ достаточно трудоемок, требует хорошо отлаженной технологии, и должен быть выполнен с особой тщательностью.

4. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ НЕКОРРЕКТНОСТЕЙ БДДИ

После анализа БДДИ стало понятно, что алгоритмы моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений должны быть модифицированы таким образом, чтобы скомпенсировать недостатки этих БДДИ. Одной из главных проблем является *недооценка яркости солнца*, которая всегда будет присутствовать даже в БДДИ с приемлемым динамическим диапазоном.



Рис. 3. Применение компенсации некорректности задания солнца. Верхнее изображение было построено без компенсации, нижнее – с компенсацией

Компенсировать недооценку солнца можно, взяв за основу стандартные модели неба, принятые Международной комиссией по освещению (CIE). При выделении источников света производится расчет освещенности горизонтальной поверхности от выделенного источника (т.е. солнца) и от модифицированной верхней полусферы БДДИ панорамы (т.е. неба за исключением солнца). Далее яркость выделенного

источника света масштабируется таким образом, чтобы освещенность от него была в 4 раза выше, чем от остального неба. Изменять яркость неба было бы некорректно, так как именно яркость солнца является недооцененной. Производители аппаратуры для создания БДДИ утверждают, что яркости, представляющие в БДДИ все окружение за исключением солнца, измеряются с высокой точностью.

На рис. 3 представлен результат работы этого алгоритма. На первом рисунке приведено изображение автомобиля, помещенного в БДДИ с видимым солнцем a52_Lagerschuppen.hdr (динамический диапазон – $5.6 \cdot 10^4$, соотношение освещенности горизонтальной поверхности от солнца/неба – 1:5, т.е. небо в пять раз ярче солнца). Видно, что автомобиль недостаточно освещен для солнечного дня, тени от солнца бледные. На втором рисунке представлено изображение, полученное с компенсацией неправильности задания солнца. Освещенность автомобиля стала удовлетворительной, под автомобилем видна четкая тень, соответствующая яркому, солнечному дню.

Проблема недостаточного пространственного разрешения БДДИ может быть решена с помощью следующей технологии «двойного кадра». Будем разделять использование фонового изображения для представления фона в итоговом изображении и для построения отражений от объектов сцены. При построении отражений использование БДДИ увеличивает реалистичность изображения, но не требует большого пространственного разрешения. В то же время при представлении фона в итоговом изображении необходимо иметь достаточное пространственное разрешение, а большой динамический диапазон здесь не важен, так как в итоге изображение будет приведено к динамическому диапазону монитора. Поэтому в последнем случае для фона можно использовать простое изображение, полученное с помощью обычной цифровой камеры с разрешением от 4 мегапикселей и выше. Необходимо только, чтобы это изображение было сделано с той же позиции, что и все БДДИ.

Эта технология требует дополнительного пользовательского интерфейса для задания соответствия направлений БДДИ («первый кадр») и простого фонового изображения («второй кадр»). На рис. 4 показано изображение, сгенерированное с использованием технологии «двойного кадра», дающей хорошую степень реалистичности.



Рис. 4. Использование технологии «двойного кадра» для представления реалистичного фона для изображения компьютерной модели автомобиля

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически каждый из аспектов моделирования освещенности дневным светом, заданным изображением с большим динамическим диапазоном, таких как освещенность точки, построение теней, выделение солнца как источника света и другие, – потребовал разработки отдельных алгоритмов. Эти алгоритмы являются физически обоснованными. Реализованная возможность вычислять яркости точки поверхности, заданной двунаправленной функцией отражения (ДФО), позволяет визуализировать при естественном дневном освещении материалы со сложными оптическими свойствами, такие как ткани, одежда, многослойные автомобильные краски.

Анализ нескольких десятков изображений с большим динамическим диапазоном, содержащих небо, показал, что физически корректных БДДИ практически не существует. Все БДДИ имеют недостатки в области представления солнца. Это связано с невозможностью напрямую измерить его яркость. Кроме этого, как видно из анализа, иногда БДДИ не содержат реального диапазона яркостей, а являются просто обычными фотографиями, сохраненными в формате БДДИ. Очевидно, что такие БДДИ не могут корректно задать освещение сцены, и они не могут быть использованы при синтезе реалистичных изображений. Количество же корректных БДДИ с достаточным динамическим диапазоном, которые задают освещение сцены, близкое к действительному, невелико.

В связи с этим были разработаны модификации алгоритмов, учитывающие и компенсирующие известные недостатки БДДИ. Модификации позволили повысить реалистичность генерируемых изображений. В итоге реализованные алгоритмы позволяют получить более корректный результат, являются автоматическими и устойчивыми к различным ошибкам БДДИ. Это расширило число приемлемых БДДИ, которые можно использовать для синтеза реалистичных изображений. Описанные алгоритмы используются в нескольких разработанных системах компьютерной графики [8, 12–14]. Все рисунки, приведенные в статье, были сгенерированы авторами.

Работа поддержана грантом «Ведущие научные школы» РФ, НШ-383.2006.9, а также компанией Integra Inc. (Япония).

Версия статьи с цветными иллюстрациями размещена по адресу
http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm.

6. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Ward G. Real Pixels. Graphics Gems II. 1991, pp.80-83.
- [2] Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А., Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей. "Программирование", № 5, 2004, с.35-42.
- [3] Debevec P., Malik J. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. Computer Graphics (Proc. Siggraph 97), 1997, pp. 369-378.
- [4] Aggarwal M., Ahuja N. High dynamic range panoramic imaging. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, vol. 1, 2001, pp. 2–9.
- [5] Debevec P. Image-Based Lighting. Siggraph 2002 Tutorial. pp. 26-34.
- [6] LightWave 3D. <http://www.newtek.com/lightwave/>
<http://www.hyperfocaldesign.com/tutorials/hdri-lightwave-tutorial.html>

[7] Horn B.K.P. "Robot Vision", MIT Press, 1986.

[8] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Дмитриев К.А., Копылов Э.А., Двунаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. "Программирование", № 5, 2004, с. 25-34.

[9] SpheronVR AG. <http://www.spheron.com>

[10] Dosch Design GmbH. <http://www.doschdesign.com>

[11] IESNA Lighting Handbook, 8th ed., New York, 1993.

[12] Ignatenko A., Barladian B., Dmitriev K., Ershov S., Galaktionov V., Valiev I., Voloboy A., A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting. The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Moscow, 2004, pp. 159-162.

[13] Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Дерябин Н.Б., Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных изображений с использованием Интернет технологий. "Программирование", № 5, 2005, с. 66-80.

[14] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования.

«Информационные технологии в проектировании и производстве», № 1, 2006, с. 64-73.

HDRI based sunlight simulation

Abstract

The paper discusses the HDRI usage as sunlight light source and background for rendering of scenes containing complex optical materials (cloth, pearlescent paint). Physically correct simulation algorithms for calculation of pixel intensity, sun recognition and shadow generation are described. Available HDRI are analyzed, their drawbacks are described. Modifications of lighting simulation algorithm for HDRI drawbacks compensation are proposed. They are based on standard sky models elaborated by International Illumination Committee (CIE). Modified algorithms produce more correct results. Algorithms are used in several rendering systems for generation of photorealistic images.

Keywords: HDRI, ray tracing, accurate lighting simulation, sunlight, skylight, global illumination, BRDF.

About Authors

Alexey G. Voloboy, PhD, senior researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.

E-mail: voloboy@gin.keldysh.ru

Vladimir A. Galaktionov, PhD, head of department of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.

E-mail: vgal@gin.keldysh.ru

Edward A. Kopylov, researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.

Lev Z. Shapiro, PhD, senior researcher of the Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS.