

Калибровка источника света в сцене с прозрачным объектом по фотографиям

В.В. Афанасьев, А.В. Игнатенко, И.О. Тисевич

ИПМ РАН им. М.В. Келдыша,

Лаборатория Компьютерной Графики и Мультимедиа

Факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова

vafanasjev@graphics.cs.msu.ru ignatenko@graphics.cs.msu.ru itisevich@graphics.cs.msu.ru

Аннотация

В работе предлагается решение задачи калибровки освещения для сцены с прозрачным объектом, который освещается рассеянным светом диффузора со светодиодной подсветкой. Вычислено распределение яркости по диффузору, имеется возможность подобрать виртуальную экспозицию для заданной фотографии. Калибровка позволяет добиться большего фотореализма при визуализации сцены.

1. Введение

Задача синтеза фотореалистичных изображений требует точного задания всех параметров сцены для достижения лучшего результата. Важнейшую роль играет освещение (здесь и далее под освещением понимается совокупность источников света в сцене). От того, насколько соответствует освещение виртуальной сцены освещению реальной сцены, напрямую зависят правильность цветов и яркости синтезированного изображения. Освещение сцены, как правило, сложно напрямую измерить, и оно может меняться в зависимости от условий съёмки фотографий.

Реконструкция полного освещения сцены по фотографиям в общем виде очень сложна, в данной работе эта задача решается в частном случае для специального вида сцены и освещения, встречающихся, например, при сканировании драгоценных камней в ювелирной промышленности.

2. Обзор

Задача восстановления освещения решается при различных допущениях, позволяющих вычислить освещение в рамках принятой модели.

В работе [1] для построения изображений широкого динамического диапазона восстанавливается яркость видимой части сцены по набору изображений с разной экспозицией. Учитываются преобразования, которые претерпевает исходная яркость сцены в оптической системе камеры. Источники света, находящиеся вне кадра, не строятся.

Авторы [2] предлагают метод восстановления видимого и невидимого освещения снятого кадра для одного источника света. Предполагается, что поверхности сцены диффузные. Незвестное положение источника света авторы предлагают оценить с помощью теней от объектов. Реконструированное освещение применяется для реалистичного внедрения виртуального объекта в фотографию.

Способ представления освещения сцены в виде бесконечно удалённой сферической панорамы предложен в [3]. Освещение восстанавливается вместе с формой объекта интереса. Во многих исследованиях принята такая модель освещения сцены, она позволяет существенно снизить

сложность задачи и не даёт погрешностей, если настоящие источники света не расположены близко к освещаемому объекту.

В работе [4] освещение сцены представлено вейвлет-разложением кубической карты, что является комбинацией подхода с бесконечно удалённой панорамой и реконструкцией набора точечных источников света. Поддерживаются модели освещения Ламберта и Фонга, что даёт возможность использовать диффузные и бликующие поверхности.

В рассмотренных исследованиях восстановление освещения сцены основано на отражении света от объектов и восстановлении только отражательных свойств. В данной работе объект интереса прозрачен и находится сравнительно близко к источнику освещения.

3. Задача

Сцена состоит из:

- Первичных источников света (набора светодиодов)
- Матового рассеивателя (диффузора)
- Прозрачного объекта, освещённого рассеянным светом диффузора
- Камеры, снимающей прозрачный объект и, возможно, часть диффузора

Известные параметры (входные данные):

- Форма диффузора
- Положение и направление светодиодов подсветки
- Угол половинной яркости светодиодов
- Модель прозрачного объекта, материал (известны показатель преломления n , возможно, показатель поглощения k)
- Фотографии фона без прозрачного объекта
- Экспозиция фотографий фона в градациях серого
- Фотографии прозрачного объекта в градациях серого

Неизвестные параметры (выходные данные):

- Виртуальная экспозиция (или коэффициент яркости) L
- Полная диаграмма направленности светодиодов $D(\vec{r}_i)$
- ДФО краски, которой покрыт диффузор $F(\vec{r}, \vec{r}_i)$
- Как следствие, неизвестно освещение прозрачного объекта диффузором

Цель – построить модель освещения прозрачного объекта в заданной сцене по его фотографиям таким образом, чтобы оно как можно точнее соответствовало настоящему освещению для прозрачного объекта. То есть нужно найти такие $F(\vec{r}, \vec{r}_i)$, $D(\vec{r}_i)$, L , k , чтобы минимизировать среднее по кадру отклонение результата визуализации от фотографии.

4. Распространение света в сцене

Сцена построена так, чтобы в камеру попадал в основном вторичный свет, отражённый диффузором, и светодиоды не освещали объект напрямую.

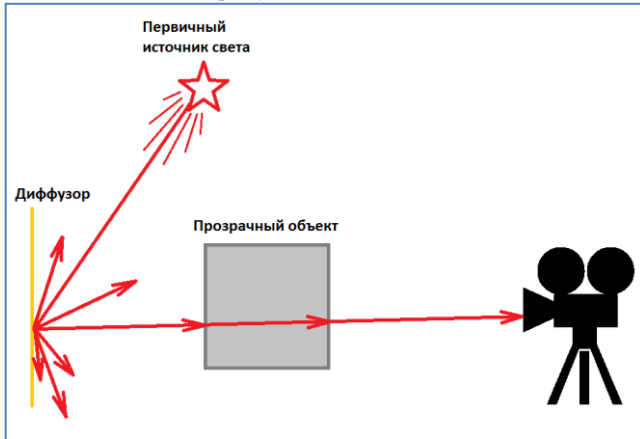


Рис. 1. Схема сцены

Кадр, снятый с камеры сканера, захватывает только часть диффузора. Оставшаяся часть также участвует в освещении, но её вклад напрямую не наблюдается и выражен только в яркости некоторых областей объекта. Фотография фона без объекта, на которой фон не пересвечен, даёт точное распределение освещённости по видимой части диффузора.

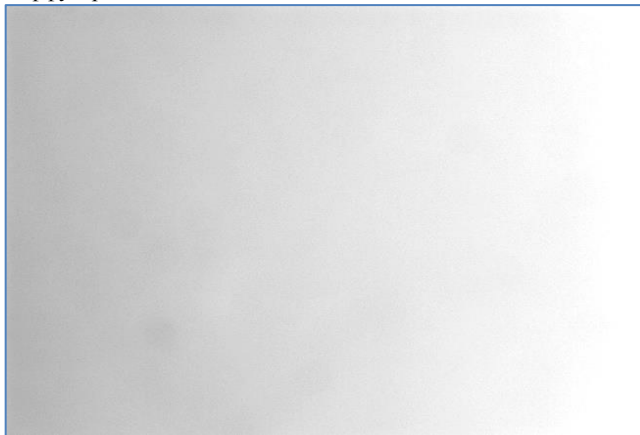


Рис. 2. Пример фотографии фона

Простейший подход – экстраполировать освещённость на невидимую часть и при визуализации использовать карту освещённости модели диффузора, либо сферическую панораму. Однако это не всегда можно сделать из-за следующих факторов:

- Будет получена освещённость, видимая из камеры, т.е. излучение в направлении камеры. Но направления падения света с диффузора на объект могут существенно отличаться от направления на камеру, т.к. объект и диффузор имеют сопоставимые размеры, находятся на небольшом расстоянии друг от друга.
- Экстраполяция возможна только при малых размерах невидимой части диффузора, иначе возникнет значительная погрешность при удалении от границ видимой части.

Поэтому выбран другой подход. Освещённость диффузора во всех точках предлагается рассматривать не как одну неизвестную величину, а как комбинацию нескольких известных и неизвестных величин. Далее, используя фотографии, подобрать неизвестные величины, опираясь на известные.

Так, яркость фона без объекта может быть представлена в виде $I_0(\vec{r}) = L * D(\vec{r}_l) * F(\vec{r}, \vec{r}_l)$, где:

- \vec{r} – направление излучения диффузора
- L – коэффициент яркости светодиода
- D – диаграмма направленности светодиода
- F – ДФО поверхности диффузора
- \vec{r}_l – направление из точки диффузора на светодиод

Соответственно, яркость точки изображения $I = I_0 * A$, где A – коэффициент поглощения света в прозрачном материале для данной траектории, задаётся законом Бугера-Ламберта-Бера в зависимости от показателя поглощения и длины пути света в среде. Отклик камеры принят за линейный и не рассматривается, хотя может быть добавлен в модель.

Калибровка яркости освещения для заданной сцены проводится в 2 этапа:

1. Определение неизвестных значений ДФО диффузора и диаграммы направленности светодиодов по фотографии фона.
2. Определение коэффициента яркости и уточнение показателя поглощения по фотографиям прозрачного объекта.

5. Вычисление диаграммы направленности светодиодов

Зону диффузора, видимую в кадре, освещают лучи света, пришедшие из светодиодов с углами из достаточно ограниченного диапазона. Теоретически существует возможность точно вычислить диаграмму направленности только в этом диапазоне углов. Чему она равна во всех остальных точках (кроме угла половинной яркости), неизвестно. Поэтому выбран достаточно простой вид диаграммы направленности. Она представлена кусочно-линейной функцией, значения которой в наборе ключевых точек определяются параметром t .

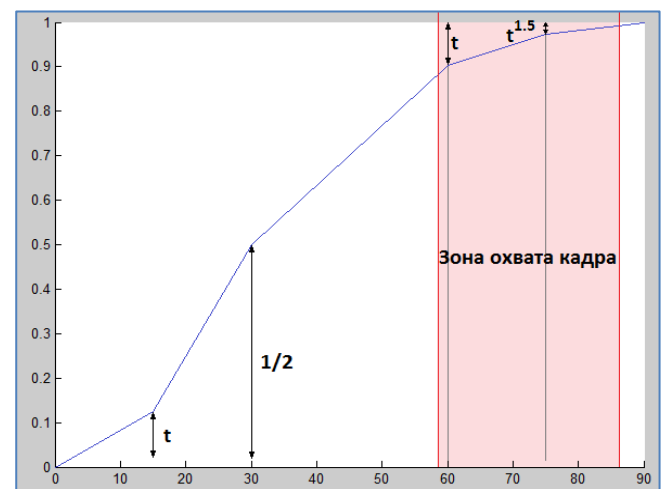


Рис. 3. Параметрическая функция для диаграммы направленности светодиода

Фотографии фона позволяют варьировать диаграмму направленности, подбирая распределение яркости по кадру и минимизируя абсолютную разность между фотографией фона и результатом визуализации фона. При этом ДФО диффузора либо явно задаётся (например, измеряется), либо параметризуется и подбирается вместе с диаграммой направленности.

Таким образом, полученные диаграмма направленности светодиодов подсветки и ДФО диффузора задают параметры распространения света при неизменной геометрии и материалах сцены. Если известны эти две функции, то синтезированное изображение фона можно сравнивать с фотографией фона с точностью до коэффициента яркости L , который зависит от яркости светодиодов в момент съёмки и времени экспозиции. Его нужно подбирать при каждом изменении яркости подсветки или времени экспозиции.

6. Вычисление коэффициента яркости

Коэффициент яркости L нужно определить для каждого снятого набора кадров по фотографиям, где есть не только фон, но и прозрачный объект. Фона может вообще не быть в кадре. Фон может быть пересвечен, или иметь нормальную яркость.



Рис. 4. Пример фотографии куба из стекла с пересвеченным фоном

Коэффициент яркости вычисляется путём минимизации средней абсолютной разности между фотографией и результатом визуализации по параметрам L (коэффициент яркости) и k (показатель поглощения). Исследование этой функции при вычислении яркости по одному кадру показало некоторые особенности. Для примеров с кубом, повернутым гранью на камеру, функция невязки выглядит следующим образом:

- В случае наличия в кадре фона нормальной яркости функция невязки имеет чётко выраженный минимум.

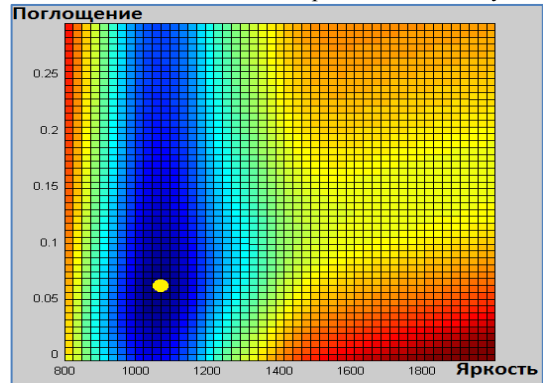


Рис. 5. Функция невязки для фона нормальной яркости

- В случае пересвеченного фона минимальное значение функции распределено вдоль криволинейного «луча», т.е. имеется нижний предел яркости, определяемый минимально необходимым значением яркости для пересвечивания фона. Для большей яркости находится такое значение показателя поглощения, которое минимизирует функцию при любой яркости.

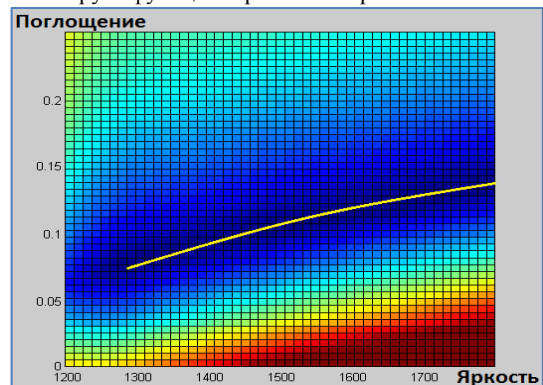


Рис. 6. Функция невязки для пересвеченного фона

- При отсутствии фона в кадре наблюдаем такой же эффект, но теперь оптимальные значения параметров находятся вдоль некоторой линии без ограничений с обеих сторон.

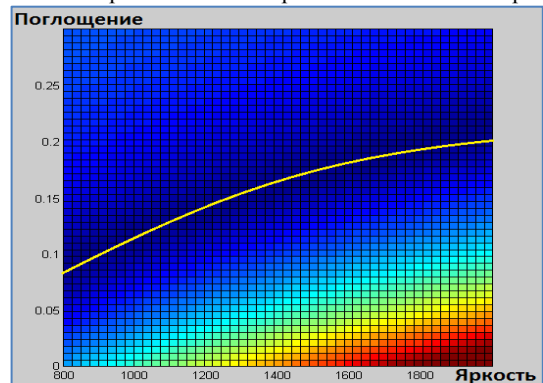


Рис. 7. Функция невязки при отсутствии фона в кадре

В двух последних случаях неоднозначность возникает из-за того, что фон полностью или частично перестаёт давать информацию о яркости. Компенсировать это должен прозрачный объект, но, хотя он и не пересвечен, в

рассмотренных примерах (куб, повернутый гранью в сторону камеры) поглощение света оказалось распределено по объекту равномерно. Это позволяет всем пикселям объекта в визуализации пропорционально изменять яркость при изменении коэффициента яркости освещения. Поэтому все пиксели объекта могут одновременно приблизиться по яркости к пикселям на фотографии. Исправить это можно несколькими способами. Принципиально нужно добиться неравномерного распределения поглощения по объекту.

- Взять для вычисления яркости такой кадр, где объект имеет разную толщину в разных точках. Например, куб может быть повернут под углом. Для объектов более сложной формы подходят почти все ракурсы.
- Использовать не один кадр, а несколько для разных положений объекта, среди которых также должны найтись кадры с разной видимой толщиной.
- Если по каким-то причинам выполнить такую съёмку нельзя, нужно зафиксировать значение коэффициента поглощения, измерив его другим способом. Тогда яркость будет вычислена однозначно.

Функция невязки может иметь несколько локальных минимумов, например, из-за загрязнения внутри прозрачного объекта. Для нахождения истинных значений яркости и показателя поглощения необходимы методы глобальной оптимизации.

7. Результаты

Разработанный метод был применён при калибровке освещения в сканере для съёмки драгоценных камней.

Сканер имеет светодиодную подсветку и матовый отражающий диффузор с неизвестной ДФО.

ДФО была задана простой функцией с 1 параметром, задающим силу рассеивания света. Далее проведена совместная оптимизация по параметру ДФО и параметру диаграммы направленности, в результате чего максимальное отклонение яркости фона на визуализированном кадре от фона на фотографии составило менее 1%.

Драгоценный камень, залитый в иммерсионное стекло, имеет низкий показатель поглощения, по сравнению со стеклом, что обеспечивает разную видимую толщину стекла в пределах одного кадра, и функция невязки имеет чёткий минимум даже при отсутствии фона в кадре. Это позволяет однозначно вычислить значения показателя поглощения стекла и коэффициента яркости.

Полученное освещение было использовано для фотореалистичной визуализации. Синтезированные изображения отличаются по яркости от фотографии в среднем по кадру на значения от 1% до 5%, в зависимости от снимаемого объекта.

8. Ссылки

- [1] Paul E. Debevec, Jitendra Malik, Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. Proc. 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p.369-378, August 1997.
- [2] T. Grosch, S. Mueller, and W. Kresse. Goniometric light reconstruction for augmented reality image synthesis. Graphiktag im Rahmen der GI Jahrestagung, Frankfurt am Main, 2003.

- [3] D. Hough and N. Ahuja. Estimation of the Light Source Distribution and Its Use in Integrated Shape Recovery from Stereo and Shading, Proc. IEEE Fourth Int'l Conf. Computer Vision, pp. 148-155, 1993.
- [4] C. Upright, D. Cobzas, M. Jagersand. Wavelet-based Light Reconstruction from a Single Image. Computer and Robot Vision, pp. 305 – 312, 2007.