

## Восстановление положения источника света по HDRI в задачах дополненной реальности\*

Xu-Yang Wang<sup>1</sup>, Д.Д. Жданов<sup>2,3,4</sup>, И.С. Потемин<sup>2,3</sup>, Ying Wang<sup>1</sup>  
294880557@qq.com | ddzhdanov@mail.ru | ipotemin@yandex.ru | 1334772745@qq.com

<sup>1</sup>Changchun University of Science and Technology;

Санкт-Петербург, Россия, <sup>2</sup>Университет ИТМО;

Москва, Россия, <sup>3</sup>Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН;

Санкт-Петербург, Россия, <sup>4</sup>ОАО «Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова»

Одной из наиболее сложных задач дополненной реальности является максимально «бесшовное» совмещение объектов реального и виртуального миров. Одним из таких объектов, требующим аккуратного совмещения, является источник света. В работе предлагаются алгоритмы и компьютерные модели восстановления координат источника света по цифровым фотографиям диффузной поверхности, освещенной источником света малого размера с равномерной или ламбертовой диаграммой излучения. Для аккуратного восстановления координат источника света был разработан специальный алгоритм, позволяющий устранить постоянную компоненту яркости вторичного освещения. Работа иллюстрируется рядом примеров восстановления координат источника по изображениям синтезированных сцен и цифровым фотографиям диффузной поверхности, освещенной точечным источником света.

**Ключевые слова:** HDRI, дополненная реальность, восстановление параметров освещения, первичная яркость, вторичная яркость, точечный источник света.

## Reconstruction of light source position from HDRI in the task of augmented reality \*

Xu-Yang Wang<sup>1</sup>, D.D. Zhdanov<sup>2,3,4</sup>, I.S. Potyemin<sup>2,3</sup>, Ying Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun University of Science and Technology;

<sup>2</sup>ITMO University, Saint Petersburg, Russia;

<sup>3</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia;

<sup>4</sup>Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation "Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, Russia

This paper proposes an efficient and terse measurement model for single light source position from HDRI (High-Dynamic Range Image) of real scene. Spatial geometry structure, based on the rendering equation, in AR (Augmented Reality) system's luminance condition reconstruction is applied. Simulation experiments and application in real scene show its effectiveness.

**Keywords:** HDRI, augmented reality, luminance condition reconstruction, primary luminance, secondary luminance, point light source.

### Введение

Восстановление яркостных характеристик сцены является одним из ключевых параметров, позволяющих решить задачу «бесшовного» взаимодействия между виртуальным и реальным мирами, и служит основным средством улучшения качества восприятия системы дополненной реальности. Одной из основных характеристик, необходимых для физически корректного восстановления распределения яркости на поверхностях сцены, является положение источников света. Для восстановления координат источника света был предложен ряд алгоритмов. Первый алгоритм восстановления положения источника света предложил Zheng в 1991 го-

ду [1]. Для того, чтобы восстановить азимутальный угол и высоту источника света, этот алгоритм анализировал изображение, содержащее специальный маркер, и по ориентации и размеру тени данного маркера осуществлялось восстановление азимутального угла и высоты источника света над некоторой базовой плоскостью.

В настоящее время было разработано большое количество алгоритмов, позволяющих восстановить яркостные характеристики источников света, например, получение яркостных характеристик сцены из видеопотока [2], получение и обработка стереопанорамных изображений с помощью пары объективов типа рыбий глаз [3], более того, алгоритмы классификации и сегментирования сложных сцен с помощью облака точек данных [4]. Также существуют алгоритмы определения положения источника света по его изображению, зеркально отраженного от стенок куба [5] или пары сфер [6].

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантом РФФИ № 16-01-00552. Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-20482.

Как было отмечено [7], для восстановления яркостных характеристик сцены наиболее существенным компонентом ее модели являются интенсивность, координаты и ориентация источника света. Поэтому для восстановления параметров источника света можно использовать не один, а несколько алгоритмов, наиболее подходящих для конкретных условий наблюдения и освещения сцены. В данной работе предлагается новый алгоритм, позволяющий по распределению яркости диффузной поверхности, создаваемой источником света малой размерности, восстановить координаты положения источника света в пространстве сцены. Данный метод базируется на предположении, что ориентация и положение освещаемой поверхности могут быть вычислены по анализу изображения специально подготовленного объекта сцены [8]

### Модель трех сфер

HDRI – это изображение сцены в единицах реальной яркости, и независимо от того, как это изображение было получено (реальная фотография или синтезированное изображение), распределение яркости в этом изображении подчиняется закону, определяемому уравнением рендеринга [9], которое определяет яркость цветовой компоненты объекта  $c$  в точке поверхности  $\vec{p}$ , с локальной нормалью  $\vec{n}$  и в направлении  $\vec{v}$ . Для статических сцен уравнение рендеринга можно записать следующим образом:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left( L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega \right), \quad (1)$$

где:  $L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – собственная яркость объекта в точке наблюдения,  $\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения,  $\frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega$  – яркость, сформированная первичным и вторичным освещением наблюдаемого объекта, где:  $BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$  – коэффициент яркости поверхности (или двунаправленная функция рассеивания (ДФР)) от источника освещения  $\vec{v}'$  в направлении  $\vec{v}'$  на наблюдателя,  $L(\vec{p}, \vec{v}', c)$  – яркость внешнего освещения в телесном угле  $d\omega$  по направлению  $\vec{v}'$  на точку наблюдения  $\vec{p}$ .

Уравнение рендеринга (1) состоит из четырех основных компонент – это яркость прямого видения источника света, прямая, каустическая и вторичная яркости. В нашей задаче мы хотим восстановить положение источника света по яркости освещаемой диффузной поверхности, поэтому в изображении отсутствует яркость прямого видения. Кроме того, мы ограничим нашу задачу определением

положения одного источника света малого размера, близкого к точечному. В результате, яркость прямого освещения, создаваемая точечным источником, может быть вычислена по формуле:

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{I(\vec{p}, \vec{v}') BRDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}')}{\pi \cdot d^2} (\vec{n} \cdot \vec{v}'), \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние от освещаемой поверхности до источника света.

Поскольку направления освещения и наблюдения изменяются для каждой точки исследуемой поверхности, то видимая яркость поверхности зависит от свойств поверхности ( $BRDF$ ). Для численного определения координат источника света удобно использовать поверхности со свойствами, близкими к ламбертовскому. Для таких поверхностей  $BRDF$  является постоянной величиной  $K_d$  – коэффициентом яркости. В результате, выражение (2) приобретает вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{I(\vec{p}, \vec{v}') K_d}{\pi \cdot d^2} (\vec{n} \cdot \vec{v}'). \quad (3)$$

Кроме того, если предположить, что интенсивность источника света постоянна по всем направлениям, то выражение (3) существенно упрощается и приобретает вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{F \cdot K_d}{4\pi^2 \cdot d^2} (\vec{n} \cdot \vec{v}'), \quad (4)$$

где  $F$  – поток, испускаемый точечным источником света.

Если источник света является ламбертовским излучателем, например, светодиодом, расположенным параллельно освещаемой плоскости, то яркость освещаемой поверхности может быть вычислена по формуле:

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{F \cdot K_d}{\pi^2 \cdot d^2} (\vec{n} \cdot \vec{v}')^2, \quad (5)$$

Принимая во внимание, что

$$(\vec{n} \cdot \vec{v}') = \frac{h}{d}, \quad (6)$$

где  $h$  – высота источника света над освещаемой поверхностью, выражения (4) и (6) могут быть представлены в виде:

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{F \cdot K_d \cdot h}{\pi^2 \cdot d^3}, \quad (7)$$

$$L(\vec{p}, \vec{v}) = \frac{F \cdot K_d \cdot h}{\pi^2 \cdot d^4}. \quad (8)$$

В результате, для источников света малого размера с равномерным или косинусным распределением интенсивности излучения яркость прямого освещения ламбертовской поверхности зависит только от расстояния между источником света и точкой на освещаемой поверхности. Поэтому, если мы

выберем четыре точки на освещаемой поверхности ( $A, B, C, D$ ), то:

$$\frac{d_B^3}{d_A^3} = \frac{L(A, \vec{v}_A)}{L(B, \vec{v}_B)}; \frac{d_C^3}{d_B^3} = \frac{L(B, \vec{v}_B)}{L(C, \vec{v}_C)}; \frac{d_D^3}{d_C^3} = \frac{L(C, \vec{v}_C)}{L(D, \vec{v}_D)} \quad (9)$$

для источника света постоянной интенсивности, и:

$$\frac{d_B^4}{d_A^4} = \frac{L(A, \vec{v}_A)}{L(B, \vec{v}_B)}; \frac{d_C^4}{d_B^4} = \frac{L(B, \vec{v}_B)}{L(C, \vec{v}_C)}; \frac{d_D^4}{d_C^4} = \frac{L(C, \vec{v}_C)}{L(D, \vec{v}_D)} \quad (10)$$

для источника света с ламбертовским законом излучения. Использование метода, предложенного George Vogiatzis [8] для извлечения координат и ориентации поверхности со специальным образом нанесенным рисунком по его изображению в сцене (рис. 1), позволяет определить координаты точек ( $A, B, C, D$ ).

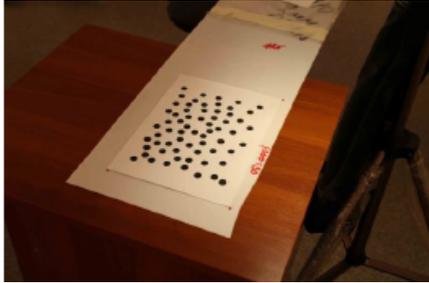


Рис. 1: Методика восстановления координат и ориентации освещаемой поверхности

В результате, выражения (9) и (10) зависят только от координат источника света и могут быть сведены к системе трех уравнений с тремя неизвестными. Графически данное решение есть результат пересечения трех сфер (рис. 2).

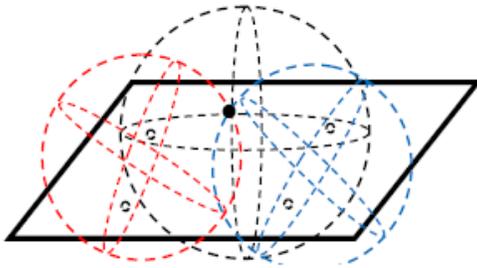


Рис. 2: Графическое представление решения уравнений (9) и (10)

Поскольку HDRi не содержит физически точных значений яркостей на исследуемой поверхности, то имеет смысл не ограничивать количество точек четырьмя. Для восстановления координат источника света можно использовать десятки точек и усреднять полученные координаты. Такой подход поз-

волит значительно повысить точность восстановления координат источника света.

### Учет яркости вторичного освещения

Метод восстановления координат источника света, описанный в предыдущей главе, основан на предположении отсутствия вторичного освещения. Такое допущение возможно, если съемка выполняется в специальном темном помещении с неотражающими стенами, полом и потолком. В большинстве случаев выполнить такие условия практически невозможно, и компонента яркости вторичного освещения присутствует в изображении исследуемой поверхности. Однако, если компонента каустического освещения отсутствует (в рамках ограничений текущей задачи мы можем исключить влияние данной компоненты), то яркость вторичного освещения имеет слабый градиент, и можно считать, что она постоянна на исследуемой поверхности. Поэтому задача состоит в том, чтобы найти постоянную составляющую яркости  $L_i$ , которая обеспечит решение уравнений (9) и (10).

$$\frac{d_B^3}{d_A^3} = \frac{L(A, \vec{v}_A) - L_i}{L(B, \vec{v}_B) - L_i}; \frac{d_C^3}{d_B^3} = \frac{L(B, \vec{v}_B) - L_i}{L(C, \vec{v}_C) - L_i}; \quad (11)$$

$$\frac{d_D^3}{d_C^3} = \frac{L(C, \vec{v}_C) - L_i}{L(D, \vec{v}_D) - L_i},$$

$$\frac{d_B^4}{d_A^4} = \frac{L(A, \vec{v}_A) - L_i}{L(B, \vec{v}_B) - L_i}; \frac{d_C^4}{d_B^4} = \frac{L(B, \vec{v}_B) - L_i}{L(C, \vec{v}_C) - L_i}; \quad (12)$$

$$\frac{d_D^4}{d_C^4} = \frac{L(C, \vec{v}_C) - L_i}{L(D, \vec{v}_D) - L_i}.$$

Для нахождения компоненты  $L_i$  было предложено решение, основанное на минимизации ошибки вычисления координат источника света. Как было показано выше, положение источника света может быть восстановлено по значениям яркости в четырех точках исследуемой поверхности. Если яркость поверхности содержит компоненту вторичного освещения  $L_i$ , то координаты точек будут восстановлены некорректно. Однако, если мы возьмем другие четыре точки на поверхности, то, хотя координаты будут восстановлены неверно, они будут отличаться от полученных по первой группе точек. Очевидно, что координаты будут совпадать только тогда, когда мы вычтем из значения яркости компоненту, соответствующую вторичной яркости. Формально это можно записать как:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^n l_{ij}^2}{C_n^2} = F(L_i), \quad (13)$$

где:  $n$  – количество групп точек, используемых для восстановления координат источника света,  $l_{ij}$  –

расстояние между положениями источника света, полученными после обработки  $i$ -ой и  $j$ -ой точек на исследуемой поверхности. Значение  $L_i$  будет соответствовать минимуму данной функции:

$$\frac{dF(L_i)}{dL_i} = 0. \quad (14)$$

Численное решение уравнения (14) позволяет найти значение вторичной яркости и восстановить координаты источника света по компоненте первичной яркости.

Необходимо отметить, что данное решение позволяет исключить компоненту освещения, которая является вторичным по отношению к исследуемому источнику света. Т.е. сцена может содержать ряд источников света и, если все источники света, за исключением исследуемого, достаточно удалены от освещаемой поверхности (компоненты их первичной и вторичной яркости практически постоянны на данной поверхности), то решение уравнения (14) позволяет вычислить суммарную компоненту освещения, вторичного по отношению к исследуемому источнику, и корректно восстановить его положение.

## Результаты экспериментов

Для проверки корректности разработанной модели был произведен ряд экспериментов по восстановлению координат источника света по HDRI фотографий. В одном из экспериментов в качестве источника света использовался светодиод с Ламбертовской диаграммой излучения. Диод находился в положении 5.5 мм 255 мм, 435 мм относительно системы координат диффузной поверхности (молочного стекла). Система координат поверхности была восстановлена с помощью метода, представленного в [8], по изображению, представленному на рисунке 1. Распределение яркости получено с помощью цифровой камеры Canon EOS 600D.

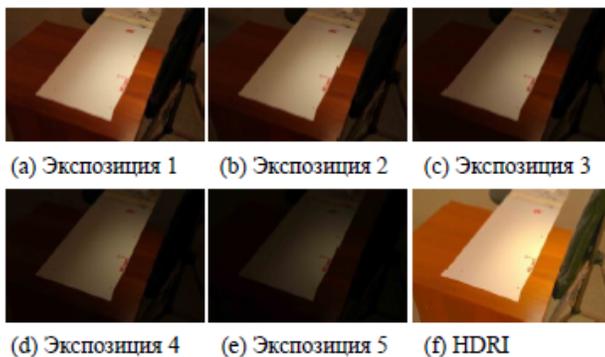


Рис. 3: Фотографии и HDRI, используемые для восстановления координат источника света

Было сделано 5 фотографий освещенной поверхности с различными временами экспозиции (рисунок

3) и получено финальное HDRI в единицах абсолютной яркости. (а) Экспозиция 1 (б) Экспозиция 2 (с) Экспозиция 3 (д) Экспозиция 4 (е) Экспозиция 5 (ф) HDRI.

Для восстановления яркости были использованы 5 точек на изображении. Координаты и значения яркостей этих точек приведены в таблице 1.

Точки	Координаты изображения (pix)	Координаты сцены (mm)	HDRI (cd/m <sup>2</sup> )
A	(2054,1961)	(-50,-45,0)	8917.282
B	(2052,2337)	(-120,10,0)	9183.418
C	(3411,1991)	(0,90,0)	9931.217
D	(3522,1612)	(75,45,0)	9550.430
E	(2809,1158)	(130,-90,0)	8327.977

Таблица 1: Координаты и яркости исследуемых точек

Используя полученные выражения яркости, была произведена оценка яркости вторичного освещения (14), которая получилась равной 1020 cd/m<sup>2</sup>. График зависимости функции  $F(L_i)$  (13) от значений вторичной яркости  $L_i$  представлен на рис. 4.

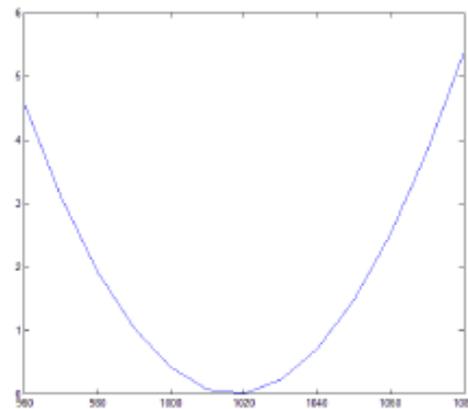


Рис. 4: График зависимости функции  $F(L_i)$  от значений вторичной яркости  $L_i$

Затем, после компенсации значения вторичной яркости, численного решения системы уравнений (10) и усреднения координат по пяти исследуемым точкам, были получены координаты источника света, равные (-2.6127 мм, 252.6758 мм, 446.5228 мм).

Если оценить ошибку восстановления координат источника света по отношению к расстоянию от источника света до освещаемой поверхности, то ошибка находится в пределах 4%, что достаточно точно для непрофессиональных измерений.

## Заключение

В работе было продемонстрировано, что разработанная методика определения координат источника света на основе анализа HDRI может обеспечить

высокую точность восстановления координат даже в случае использования непрофессиональной камеры. Кроме того, оригинальная методика оценки яркости вторичного освещения позволяет осуществлять восстановление координат источника света даже при наличии первичного освещения от ряда дополнительных источников света. Ряд экспериментов, проведенных с источниками света, чья диаграмма излучения отличается от равномерной или ламбертовской, и поверхностями, отличными от идеального диффузора, показал низкую чувствительность разработанных моделей к незначительным отклонениям параметров источников света и свойств поверхностей от идеальных значений.

### Литература

- [1] Zheng Q, Chellappa R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading // *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1991. Proceedings CVPR '91., IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 1991:540 - 545.
- [2] Yue Dong, Guojun Chen, Pieter Peers, Jiawan Zhang, Xin Tong. Appearance-from-Motion: Recovering Spatially Varying Surface Reflectance / *ACM*. November, 2014
- [3] Claus B Madsen, Rune Laursen. A scalable GPU-based approach to shading and shadowing for photorealistic real-time augmented reality // *International Conference on Graphics Theory and Applications*, 2007: 252-261.
- [4] Liangliang Nan, Ke Xie, Andrei Sharf. A Search-Classify Approach for Cluttered Indoor Scene Understanding / *ACM*. 2014
- [5] Zhou Ya, YAN Lei, ZHAO Hu. Study on the Lighting Model of the Real World in Augmented Reality // *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(8):968-971.
- [6] Feng Yan. Research on Seamless Fusion of Real and Virtual Scenes in Augmented Reality System // *Shanghai University*, 2007.
- [7] Wang Ke. Research on Virtual-real Illumination Consistency in Augment Reality Scene // *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(6):6-12.
- [8] George Vogiatzis, Carlos Hernández. Video-based, real-time multi-view stereo // *Image & Vision Computing*, 2011, 29(7):434-441.
- [9] J. T. Kajiya. The rendering equation // *Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings)*, 1986, vol. 20, p.143-150.