

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ BDF НА ОСНОВЕ ПЗС-КАМЕРЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ.

Летунов А.А., Барладян Б.Х., Зуева Е.Ю., Вежневцев В.П., Солдатов С.А.

Москва

Представлен прибор для измерения спектрального и пространственного распределения света, рассеиваемого поверхностями. Для одновременного измерения рассеяния в различных направлениях используются световоды. Угловое распределение рассеяния вблизи направления зеркального отражения преобразуется в пространственное с помощью линзы, что обеспечивает высокую точность измерений в этой критической области. В качестве приемника используется ПЗС камера. Результаты измерения предназначены для использования в компьютерной графике для отображения оптических свойств поверхностей.

1. Введение

Для создания средствами компьютерной графики физически адекватных изображений необходима детальная информация о светорассеивающих свойствах изображаемых поверхностей. Существующие математические модели рассеяния света поверхностями во многих важных случаях не обеспечивают получения достаточно реалистичных изображений при оптическом моделировании в системах компьютерной графики. В связи с этим возникает необходимость экспериментального измерения требуемых характеристик рассеяния. Задача измерения рассеяния света поверхностью является по ряду причин достаточно сложной; ей посвящено значительное число работ и созданы лаборатории в различных исследовательских центрах [1-5].

Общепринятой формой представления информации о светорассеивающих свойствах являются так называемые BRDF для описания характеристик отражения и BTDF для описания характеристик пропускания полупрозрачных объектов - обобщенно, BDF (Bidirectional Distribution Function). Для изотропных поверхностей это функция от четырех переменных - трех пространственных и одной спектральной (угол падения луча, два угла, описывающие направление рассеяния, и длина волны). При этом, как с точки зрения получения этой информации, так и с точки зрения ее использования в компьютерной графике, важным лимитирующим фактором является чрезвычайно большой ее объем. В простейшем случае однородной изотропной плоской поверхности (краска) для одного угла падения (не равного 0), при однородном угловом разрешении 1 градус требуется около 8-ми тысяч пространственных точек. При спектральном разрешении 10нм это дает для видимого диапазона цифру 240 тысяч. Учет

необходимого числа углов падения, а в случае анизотропной поверхности (ткань) и числа углов ориентации образца в его собственной плоскости по отношению к плоскости падения приводит в результате к выводу о нерациональности непосредственного использования такого BDF файла для решения задач компьютерной графики. Объем BDF файла можно сократить за счет выделения областей с разной плотностью исходных точек и использования в графических пакетах процедур интерполяции для дополнения сильно разреженных сеток исходных данных. Кроме того, следует отметить, что многие поверхности имеют выделенную область вблизи направления зеркального отражения или прямого прохождения (с большим градиентом изменения BDF), что требует большего числа точек в этой области для адекватного задания. Современные программы оптического моделирования [ТВТ] позволяют использовать BDF заданные на сетках с переменным шагом. Учитывая это, при разработке прибора использовался подход, позволяющий проводить измерения именно на таких сетках, что позволяет существенно уменьшить объем измерений, сократить время, и в конечном счете делает задачу разрешимой с помощью относительно несложных средств.

Отметим, что даже сильно разреженные сетки при условии сохранения визуального соответствия изображения объекту содержат столь много элементов, что представляют чрезвычайно большие трудности для последовательного измерения. Все применяемые здесь приемы фактически сводятся к достижению максимального уровня параллелизма при измерениях.

Из всего разнообразия работ в этой области работы [3-5] отражают достаточно полно характерные черты и различия сложившихся к настоящему времени подходов и тенденций в области измерений BRDF.

В приборе фирмы Мураками GCMS-4 [5] измерения проводятся следующим образом. Источник - галогеновая лампа - и приемник вращаются вокруг вертикальной оси, проходящей через центр образца, при этом приемник состоит из спектрального прибора и детектора в виде диодной линейки (не ПЗС). Образец может вращаться вокруг горизонтальной оси. В результате при фиксированном положении источника, приемника и образца одновременно регистрируются все спектральные компоненты (35 точек от 390 до 730 нм через 10 нм) BRDF для одного набора геометрических переменных. Три указанных выше

вращения позволяют получить любой набор углов, характеризующих пространственную BRDF точку (для изотропного образца). Сканирование углов производится в определенном порядке, заложенном в управляющей программе прибора.

В работе [4] описан способ измерения BRDF с помощью точечного источника и ПЗС камеры. Образец представляет из себя полуплоскость; вторая половина плоскости должна быть занята эталоном. Линия разграничения, источник и приемник лежат в одной плоскости, перпендикулярной к плоскости образца и эталона. За счет одномерного движения источника или приемника в этой плоскости можно реализовать (для разных точек образца) в принципе все наборы пространственных координат BRDF. Спектральную зависимость при этом можно получать за счет RGB ПЗС камеры (или, гипотетически, меняя цвет точечного источника).

Наиболее близкий к данной работе подход описан в работе [3]. Здесь образец и объектив ПЗС-камеры (рыбий глаз) помещены в центр зеркальной полупрозрачной сферы. Через поверхность сферы образец освещается коллимированным пучком от источника, перемещающегося по дуге для изменения угла падения. Рассеянный образцом свет, отражаясь от полупрозрачной сферы, попадает в объектив камеры. В результате на ПЗС-матрице фокусируется изображение, отображающее всю пространственную картину BRDF для данного угла падения. Спектральная зависимость обеспечивается за счет RGB или, если этого недостаточно, путем использования монохромного пучка.

Измерительная система описываемого в данной работе прибора основана на ПЗС камере, дополненной световодами и традиционной оптикой. Прибор одновременно регистрирует все определяемые компоненты BRDF или BTDF для заданной длины волны и угла падения в одном кадре. При фиксированном угле падения производится последовательное сканирование всей спектральной области измерения при помощи монохроматора, управляемого компьютером. Указанные действия составляют основу измерительного цикла для заданного угла падения, производящегося полностью в автоматическом режиме. Действия, обеспечивающие изменение угла падения, производятся вручную. Особенностью оптической схемы является то, что при всех углах падения направление зеркального отражения от образца совпадает с осью приемной системы (кроме нулевого угла). Для основной части телесного угла, в который рассеивается образцом падающее излучение, регистрация ведется через световоды, входные концы которых установлены в узлах сетки, а выходные собраны в пакет, в области, на которую фокусируется объектив ПЗС-камеры. Небольшая часть вблизи направления отраженного от образца луча в виде конуса с полууглом при вершине около 10 градусов передается при помощи линзы в виде изображения.

Из этого изображения области, соответствующие узлам решетки, в этом районе наиболее частой, вырезаются программным образом в процессе обработки регистрируемой информации.

Прибор был сконструирован таким образом, что приемная система неподвижна, а изменение угла падения достигается для BTDF поворотом образца, а для BRDF еще и синхронным с ним изменением траектории падающего луча. Это позволило получать результаты измерения BRDF в системе координат, связанной с направлением зеркально отраженного луча, что наиболее естественно для образцов, имеющих зеркальную компоненту. BTDF измеряется в системе координат, связанной с падающим лучом и его продолжением.

В сравнении с прибором [5] (единственным среди рассматриваемых предназначенным для массовых измерений), параллельность регистрации пространственной, а не спектральной информации обеспечивает неизменность времени измерения при увеличении числа измеряемых пространственных точек для данного угла падения. Кроме того, этот подход обеспечивает легкость изменения спектральных характеристик на программном уровне. Кроме того, чрезвычайно важным преимуществом представляемого прибора является наличие области изображения с повышенным угловым разрешением.

Прибор [3] обладает как некоторыми важными достоинствами, так и рядом существенных недостатков. С одной стороны, вся область измерений дана здесь как изображение. Как следствие, все изменения сетки могут быть сделаны на уровне программной обработки. Однако при сравнимых размерах наш прибор выигрывает в пространственном разрешении за счет использования линзы в области максимального градиента BDF. Возможность непрерывного изменения угла падения в [3] одновременно затрудняет реализацию полноценных спектральных измерений. Кроме того, примененную схему трудно использовать для измерений BTDF. Существенным конструктивным недостатком приборов такого типа является большое паразитное рассеяние света, ведущее к резкому снижению точности для направлений с низкой интенсивностью рассеяния на образце.

Подход, предложенный и реализованный в работе [4], более всего пригоден, по нашему мнению, не для лабораторных измерений образцов, а для крупномасштабных объектов – стен зданий, дорожных покрытий, газонов.

2. Общая схема прибора.

На рис.1 представлена принципиальная оптическая схема прибора.

Прибор состоит из схемы формирования падающего луча, подвижной опоры для закрепления

образца, оптической системы сбора света, системы регистрации и обработки данных.

Входные концы световодов и линза закрепляются на сферической опоре, в центре которой помещается измеряемый образец. Сферическая опора представляет собой сектор полусферы с азимутальным углом около 240 градусов

и внутренним радиусом 200 мм. Падающий пучок проникает внутрь сферы через отверстия со световым диаметром около 20 мм. Для уменьшения паразитного рассеяния в приборе поверхности сферической опоры и других конструктивных элементов прибора зачернены.

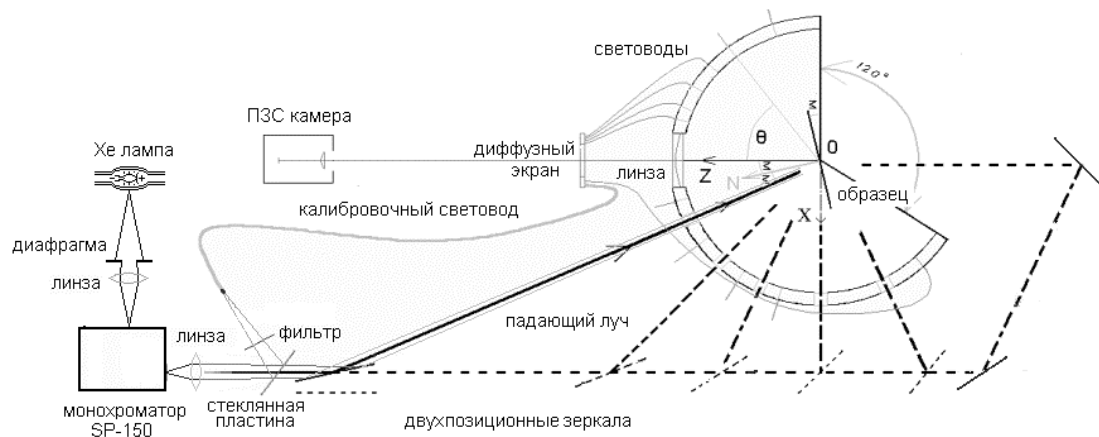


Рис.1. Общая схема прибора.

На сферической опоре имеются около 500 отверстий для закрепления световодов, так чтобы их торцы были направлены на центр сферы. Эти отверстия позволяют выбрать количество и расположение световодов в соответствии с конкретной задачей.

Противоположные концы световодов собираются на экране - прямоугольном участке другой сферической поверхности, в центре кривизны которой находится объектив видеокамеры. В центре этого экрана находится круглое отверстие, в которое вставлено матовое стекло. На этом экране фокусируется видеокамера, и выбранный кадр вводится в компьютер через плату захвата.

Введем правую декартову систему координат, связанную со сферической опорой (рис.1). Начало координат O совпадает с центром сферы. Ось Y направлена вертикально вверх. Оси Z и X находятся в горизонтальной плоскости, соответствующей плоскости рисунка. Ось Z совпадает с направлением отраженного луча (и с оптической осью системы).

Приемная система закреплена неподвижно. Плоскость образца расположена вертикально, и его центр находится в начале координат O . Центр освещенной области на поверхности образца совпадает с центром сферической опоры O . Образец имеет две степени свободы: вращение относительно оси Y и вращение относительно оси, перпендикулярной поверхности образца и проходящей через начало O .

Падающий луч лежит в горизонтальной плоскости. При измерении BRDF для реализации различных углов падения на образец луч может проходить через одно из пяти отверстий в сфере. Это обеспечивается системой зеркал, часть из которых являются откидными. Рабочее положение каждого зеркала фиксируется с достаточной точностью воспроизведения ($<0,1$ град.). В случае измерения BTDF луч направляется на образец с противоположной от линзы стороны сферы вдоль оси Z .

При измерении BRDF случай нулевого угла падения является особым. Направлять падающий луч через линзу достаточно трудно. Нами рассматривался вариант с полупрозрачной делительной пластинкой. Однако, учитывая то, что прибор ориентирован преимущественно на измерение изотропных поверхностей, для которых при нулевом угле падения достаточно измерений в одной, перпендикулярной к образцу плоскости, учитывая также сложность технической реализации варианта с делителем, от него пока отказались. Вместо этого использовано освещение по пути, применяемому для угла 45 градусов, а соответствующие световоды установлены в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси линзы, начиная с угла 5 градусов от горизонтали.

3. Схема формирования падающего луча.

Источником света является ксеноновая дуговая лампа ДКсШИЛ 150 (в безозоновом

исполнении) с эффективным размером дуги 1 x 0.3 мм и цветовой температурой около 6000К.

Изображение центральной части дуги лампы проектируется с двукратным увеличением входным коллиматором в виде линзы с ирисовой диафрагмой на входную щель монохроматора SP-150, управляемого компьютером[6]. Диафрагма позволяет регулировать угловые размеры направляемого на образец пучка.

При работе прибора монохроматор сканирует видимую область спектра, разбивая ее на 30 каналов с интервалом 10нм, в диапазоне от 400нм до 690нм. Спектральная ширина каналов может регулироваться при помощи щелей монохроматора. При измерениях были использованы два режима, с шириной 10нм и 15нм.

В качестве выходного коллиматора использовалась линза с фокусным расстоянием F=150мм, фокусирующая изображение выходной щели монохроматора на плоскость, близкую к плоскости образца, с увеличением ≈ 10 . После линзы стоит наклонная плоскопараллельная стеклянная пластинка, отвлекаящая около 8% светового потока в опорный канал. Далее по ходу луча установлено управляемое компьютером колесо с набором нейтральных фильтров, служащее для расширения динамического диапазона прибора.

4. Получение изображения. Световоды, линза, диффузный экран.

В конкретной реализации при размещении световодов использовалась неравномерная сетка, обеспечивающая получение реалистичных изображений. BRDF зависит от трех угловых переменных (один угол характеризует направление падающего луча и два - направление на наблюдателя.)

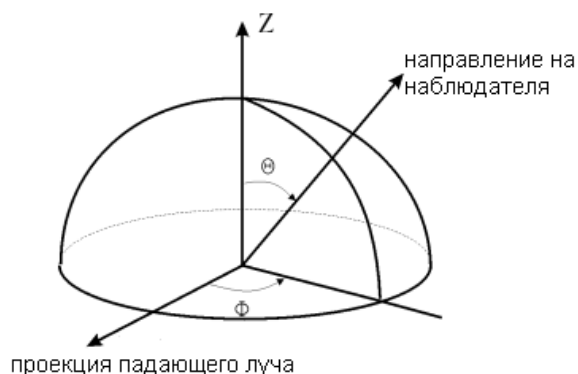


Рис.2. Углы, определяющие направление на наблюдателя.

Мы используем следующие углы: σ - угол между падающим лучом и нормалью к поверхности; φ , θ - соответственно, азимутальный и радиальный углы, задающие направление наблюдения в системе координат, связанной с

отраженным лучом (в случае BTDF с продолжением падающего луча), см. рис.2.

На рис. 3 представлено расположение световодов, линзы и отверстий на сферическом элементе. Для удобства изображения, в плоскости рисунка использовалась полярная система координат, с азимутальным углом равным углу φ и радиусом равным углу θ .

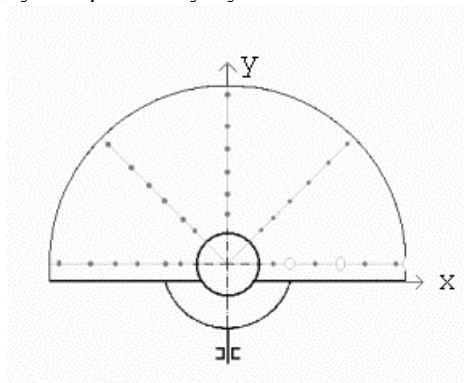


Рис.3 Положение световодов, отверстий и линзы на сферическом элементе.

Пять радиальных линий составлены из торцов световодов со световым диаметром 2мм, расположенных в узлах

$$\varphi (0, 45, 90, 135, 180)$$

$$\theta (15, 20, 30, 40, 50, 70, 90)$$

Для угла падения $\sigma=0$ достаточно произвести измерения вдоль одного направления:

На рис.4 представлена общая схема прямоугольного экрана, на котором закреплены противоположные от образца торцы световодов. Размер экрана 60мм x 80мм. Центр освещенной области образца, ось линзы, центр экрана и ось камеры коллинеарны.

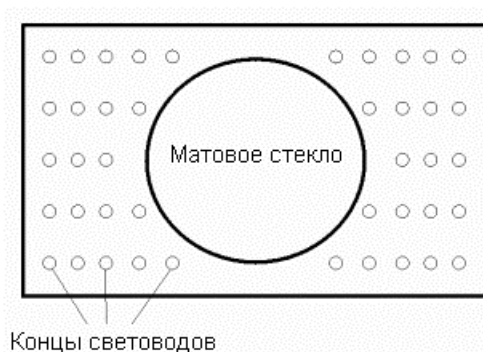


Рис.4 Схема прямоугольного экрана с диффузной полупрозрачной центральной областью.

На рисунке выделена центральная часть прямоугольного экрана, изготовленная в виде стеклянного диска толщиной 1,2мм и диаметром 55мм, сторона которого, обращенная к линзе,

матирована. На этой центральной части фокусируется световой поток, проходящий через линзу. Здесь используется так называемая фокусировка на бесконечность, переводящая угловое распределение падающего на линзу света в пространственное распределение света в фокальной плоскости линзы. Это позволяет существенно повысить угловое разрешение в области вблизи зеркального отражения, где для многих образцов функция углового распределения меняется быстрее всего.

Линза с диаметром 80мм и фокусным расстоянием 150мм укреплена на сферической опоре на расстоянии 200мм от ее центра O . Эта линза фокусирует пучки параллельных лучей от всей освещенной поверхности образца на полупрозрачном матовом диске. При отсутствии этого диска изображение поверхности образца фокусируется на расстоянии 600мм (450мм от экрана) и имеет размер 30мм. Здесь пучок света, идущего через линзу, имеет минимальный диаметр. В этом месте расположен объектив видеокамеры.

Используемая камера TR 3300E имеет ПЗС матрицу с размером диагонали 6,35мм и максимальную апертуру 1:1.6. Тогда угол между оптической осью и образующей конуса лучей, сфокусированных в некоторой точке ПЗС матрицы объективом камеры, будет примерно равен 17 градусам. Эти параметры не позволяют собрать весь свет, отраженный всей освещенной областью образца, внутри телесного угла с плоским углом 20 град. при вершине, что ухудшает представительность измерений. Используемая камера не обеспечивает полного сбора света при непосредственном проектировании изображения. Диффузная пластинка используется для того, чтобы снять это ограничение. Увеличивая угловой размер прошедшего через нее параллельного пучка до 8-12 градусов, пластинка перемешивает лучи, приходящие от разных точек образца. Поэтому приблизительно равные порции света, приходящие от каждой освещенной точки пластинки, достигают объектива камеры и фокусируются на ПЗС-матрице в качестве изображения ее поверхности.

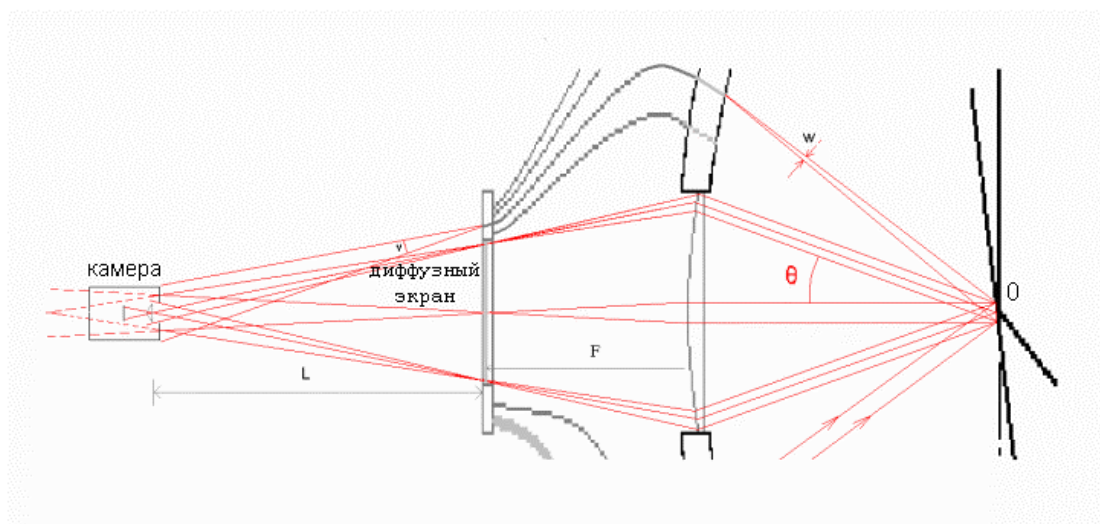


Рис.5. Схема механизма взаимодействия лучей с диффузной пластинкой.

5. Регистрация и обработка данных

Для регистрации входных данных использовались видеокамера SONY TR 3100E [7] с поргом чувствительности 0.1 Lux, плата захвата кадра (фрейм грабер) FLY VIDEO EZ и персональный компьютер.

В приборе реализованы различные методы повышения точности: усреднение данных по кадрам, расширение динамического диапазона с помощью сменных фильтров, использование калибрационного световода, коррекция нелинейных искажений, вводимых платой захвата и видеокамерой. Чтобы исключить влияние нестабильности падающего светового потока и чувствительности ПЗС-камеры, в системе имеется

специальный дополнительный световод, на который ответвляется некоторая часть падающего светового потока до его прохождения через сменяемый фильтр. Сигнал, регистрируемый через калибровочный световод, служит для нормировки всех данных из данного кадра, как при рабочих измерениях, так и при измерениях эталона.

Предварительная амплитудная калибровка прибора проводится с использованием белого диффузного эталона. В качестве такого эталона используется паспортизованный образец из молочного стекла БС-10 в виде диска диаметром 60 мм и толщиной 10 мм. Данный образец паспортизован для нормального падения, во всем видимом диапазоне (390-730нм) с шагом 10нм, при углах наблюдения от 10 до 85 град с шагом 5 град,

на основании чего в линейном приближении вычисляются данные для всех необходимых углов наблюдения. Для проведения калибровки эталон ставится по нормали к падающему лучу, поскольку только для такого расположения у нас имеются паспортные данные. В таком положении проводится полный измерительный цикл по всем длинам волн. Результаты его запоминаются и используются для нормировки при всех рабочих измерениях.

6. Управление прибором.

Для управления устройствами, входящими в состав прибора, и обработки данных используется специальная программа. В ее функции входит обработка информации, получаемой с видеокamеры и управление внешними устройствами - монохроматором и колесом с фильтрами. Программа работает под операционной системой Windows 98 и использует Video for Windows 1.0.

Управление внешними устройствами осуществляется через последовательные порты полностью автоматически и участия оператора не требует.

Перед началом измерений необходимо произвести некоторые подготовительные действия. Это объясняется тем, что параметры измерительной установки могут измениться, и программа должна иметь возможность подстраиваться под изменившиеся характеристики системы. В частности, программа автоматически определяет области изображения, соответствующие отдельным световодам. Периодически следует производить измерения эталонного образца, так как характеристики приборов, входящих в установку, могут изменяться (например, параметры лампы).

Автоматический цикл измерений соответствует заданному углу падения. По окончании цикла оператор может поменять угол падения луча, задать нужную ему последовательность углов или повторно провести измерения для некоторых углов. Результат измерений выводится в файл соответствующего формата, для дальнейшего использования в системе компьютерной графики.

7. Заключение.

Изготовленный прибор тестировался с помощью эталонных образцов и использовался для практических измерений. Среднее время полного измерения BRDF образца, включая ручные действия, оказалось равным 2.5 часам, угловое разрешение в центральной области - 1 градусу. Заметим, что благодаря конструктивным особенностям прибора время измерений практически не зависит (в широких пределах) от

числа используемых световодов (количество измеряемых точек при заданном угле падения). Параметры прибора позволяют использовать его для получения исходных данных для систем компьютерной графики. Кроме того, прибор может быть использован как оперативное средство для измерения светорассеивающих свойств поверхностей в процессе конструирования и предварительного моделирования осветительных оптических устройств. Точность измерения BDF находится в прямой зависимости от качества используемой ПЗС камеры. Использование более чувствительной камеры может позволить увеличить и пространственное разрешение в области изображения (в пределах механической точности системы - $20'$). Время измерения также может быть уменьшено за счет использования более качественной камеры, управляемой компьютером, (в этом случае можно отказаться от колеса со сменными фильтрами).

Одновременное использование световодов и области изображения, где в качестве пространственных координат выступают непосредственно углы, полностью себя оправдало. Такой подход позволил сочетать высокое пространственное разрешение в области больших градиентов BDF с достаточно полным охватом всего телесного угла, в который происходит рассеяние света.

Работа была поддержана INTEGRA Inc. (Tokyo, Japan), Отделом компьютерной графики Института прикладной математики им. Келдыша РАН и Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 99-01-01027).

Литература.

- [1]. Murray-Coleman J.F., Smith A.M., "The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modelling." *Jornal of the Illuminating Engineering Society*, Winter 1990.
- [2]. Pattanaik S.N., Ferwerda J.A., Torrance K.E., Greenberg D. "Validation of Global Illumination Simulations through CCD Camera Measurements." *Cornel University, Ithaca, NY-14853, USA*
<http://www.graphics.cornell.edu/research/measure/>
- [3]. Ward G.J. "Measuring and Modelling Anisotropic Reflection". *Computer Graphics*, Volume 26, Number 2, July 1992.
- [4]. Karner K.F., Mayer H., Gervautz M., "An Image based Measurement System for

Anisotropic Reflection." EG'96, CGF, 15(3), 119-128.

- [5]. MURACAMI, Operation Manual. GCMS-4. No. 8951-9.
- [6]. SpectraPro Series. Automated Scanning Monochromators and Flat Field Imaging Spectrographs. Acton Research Corporation ARC.
- [7]. SONY. Technical Specification '96/97.
- [8]. LABSPHERE, Inc. Catalogue.

E-MAIL

Letunovy@chat.ru
(Letunov Alexandr)

Obb@gin.keldysh.ru
(Barladian Boris)

CCD-BASED DEVICE FOR BDF MEASUREMENTS IN COMPUTER GRAPHICS

Letunov A.A., Barladian B.H., Zueva E.Yu.,
Veshnevets V.P., Soldatov S.A.

Moscow, Russia

Abstract

A new CCD-based computer controlled device for measuring the spectral and spatial scattering distribution of surfaces is described. This device uses both light guides and direct imaging techniques. This approach allows to process all directions of reflection inside the entire hemisphere simultaneously, to speed up the data gathering process. From the other hand, the device provides high space resolution in the most critical region – highlight area. The last is essential for usage the measured BDF in optic simulation programs.

Keywords

Computer graphics, physically realistic image, BRDF, optical measurements, light scattering, CCD-camera, fiber optics, non-uniform grid, highlighted zone.

Авторы

Летунов Александр Алексеевич, ИОФАН РАН, ст. научн. сотр.

Барладян Борис Хаимович, НТВЦ ИПМ РАН, ст. научн. сотр.

Зуева Елена Юрьевна, ИПМ РАН, ст. научн. сотр.

Вежневцев Владимир Петрович, ВМК МГУ, студент

Солдатов Станислав Александрович, ВМК МГУ, студент

АДРЕС:

Россия, Москва, Миусская пл.,4
ИПМ им. Келдыша РАН, Зуевой Е.Ю.

POST ADDRESS

Zueva E.Yu., Keldysh Institute RAS,
4, Miusskaya sq., Moscow, Russia