

Интерактивное моделирование автомобильных красок

А.Г. Волобой, С.В. Ершов, С.Г. Поздняков
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва

Аннотация

В работе описан подход к моделированию многослойных красок в интерактивном режиме. Была поставлена и решена задача генерации внешнего вида краски, исходя из ее внутренней структуры. Для достижения интерактивности были разработаны оригинальные подходы к решению задачи моделирования света в красящем слое, быстрой визуализации сцены, предложена архитектура программного комплекса. Также разработанные средства были успешно использованы для задачи автоматического подбора состава краски по ее внешнему виду.

Ключевые слова: реалистичная визуализация материалов, взаимодействие света с красящим слоем, физически корректное моделирование, ДФО, оптические свойства поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная графика изначально зародилась как эффективное и мощное средство связи между человеком и вычислительной машиной. С появлением методов синтеза реалистичных изображений, основанных на физически корректном моделировании распространения света, область применения компьютерной графики существенно расширилась. Созданные алгоритмы и программные средства стали представлять интерес для использования в архитектуре, проектировании систем освещения, в автомобильной промышленности и других областях.

Важным направлением, получившим развитие в последние годы, стало моделирование и визуализация новых оптически сложных материалов, таких как многослойные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик») в автомобильной промышленности. Разработанные программные средства позволяют моделировать и визуализировать краски, состоящие из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек.

На рис. 1 представлен автомобиль, окрашенный такой краской, при дневном освещении. Цвет этих красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов.



Рис. 1. Автомобильная краска при дневном освещении.

Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скалярными коэффициентами, а требуют более сложного описания с помощью двунаправленных функций отражения света. Другим аспектом визуального восприятия краски является различное освещение, она выглядит различно утром и в середине дня, при солнечной или пасмурной погоде. На рис. 1 освещение задано изображением с высоким диапазоном яркостей (HDRI – High Dynamic Range Image).

Гораздо дешевле смоделировать на компьютере внешний вид краски и исследовать ее при различных условиях освещения, чем произвести опытную партию краски и покрасить ею реальный автомобиль. В настоящее время такой подход к моделированию красок применяется не только в автомобильной промышленности, но и для окраски большого спектра других товаров (мобильные телефоны, персональные компьютеры, бытовая техника и пр.) Именно внешний вид изделия часто определяет его коммерческий успех. Используя средства компьютерной графики, можно понять, как будет выглядеть изделие уже на начальных стадиях его разработки.

Моделирование современных красок с металлическими и перламутровыми эффектами, чей внешний вид изменяется в зависимости от условий освещения и наблюдения, является нетривиальной задачей. Иногда краски разрабатываются непосредственно для данного изделия с учетом его формы и размеров. Чтобы разработка красок, базируясь на физических и химических свойствах их составляющих, была эффективной, моделирование внешнего вида должно выполняться с интерактивной скоростью.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРАСОК

Одни из подобных первых разработок были проведены для акварельных красок [1]. Авторы применяют широко известную модель Кубелка-Мунка, которая является упрощенным решением уравнения переноса излучения (света) [2]. В настоящее время, с развитием компьютеров и математических методов стал возможным непосредственный расчет распространения света в красящих слоях с использованием уравнения переноса.

В последние годы в литературе по компьютерной графике опубликовано достаточное число работ, относящихся к моделированию оптически сложных красок с перламутровым и металлическим эффектами. Большинство из них используют подходы, сильно отличающиеся от представленного ниже. Значительная их часть ориентирована лишь на объяснение и качественное воспроизведение какого-либо одного эффекта на предельно упрощенной модели. Например, интерференционные модели, разработанные для моделирования мыльных пузырей, масляных пятен [3], или жемчуга [4], которые описывают физические явления для непрерывных тонких пленок, мало пригодны для аккуратного расчета многократного рассеяния света на относительно небольших перламутровых чешуйках, расположенных в связующем веществе и окруженных зернами поглощающего пигмента и металлическими чешуйками.

По тем же самым причинам не могут быть применены методы, использующие множество упрощений таких как: изотропия пленок [5], однородное освещение внутри пленки [6], ограничивающиеся только случаем однослойной краски [5, 7] или фиксирующие ориентацию чешуек параллельно поверхности краски [8]. Существуют работы по вычислению характеристик краски для формально сколь угодно сложной (и потому реалистичной) внутренней структуры, но они вычислительно дороги и сложны в реализации [9].

Существуют работы, применяющие непосредственное моделирование распространения света внутри объема краски, описываемого на макроскопическом уровне. Используемые методы позволяют моделировать все важные для настоящего приложения оптические эффекты. Некоторые из таких подходов были специально разработаны для аккуратного расчета радужных и перламутровых эффектов [10, 11]. Однако, требуются весьма длительные вычисления, поскольку огромное число лучей должно быть протрассировано через объем краски, чтобы вычислить распределение отраженного света с малыми погрешностями. Те же из них, что используют явное моделирование внутренней структуры краски, еще менее пригодны, т.к. на стадии разработки неизбежно частое изменение внутренней структуры объема краски. Этот недостаток может быть частично преодолен с помощью неявного статистического описания структуры краски [12-14] (т.е. введения соответствующей длины свободного пробега, с помощью которой разыгрывается длина пробега света между событиями рассеяния на чешуйках). Все эти методы ресурсозатратны и без выполнения полных вычислений они не позволяют на качественном уровне оценить результирующую двунаправленную функцию отражения (ДФО), описывающую оптические свойства поверхности. Поэтому они непригодны для интерактивного программного комплекса.

Интерактивная скорость визуализации возможна для таких теоретических моделей отражения, как Cook-Torrance [15]. Они основаны на структурах, использующих микрофасетки, и весьма эффективны на вычислительном уровне и дают хорошие приближения ДФО для типичных материалов. Однако, некоторые параметры, используемые в этих моделях, не имеют простой физической интерпретации. Отсутствие простых соотношений между реальными физическими величинами и параметрами моделей сильно усложняют их применение для разработки красок с заданным внешним видом. Этот недостаток делает рассматриваемые методы неприемлемыми в нашем случае.

Таким образом, существующие подходы непригодны для нашей задачи либо из-за низкой вычислительной эффективности (методы прямой трассировки), или из-за слишком сильного упрощения реальной структуры краски (теоретические модели).

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ КРАСОК

Задача моделирования цвета краски может быть поставлена в формулировке: требуется вычислить распределение отраженного света (двунаправленную функцию отражения – ДФО), аккуратно учитывающее многократное рассеяние света в объеме краски и позволяющее изменять состав краски в рамках технологических возможностей. В этой формулировке освещение предполагается параллельным однородным некогерентным пучком, а наблюдение — в дальней зоне

(регистрируется только угловое распределение, а текстура, если она вообще наблюдаема, утрачивается). Так как часто краски бывают достаточно сложными, и имеют нетривиальную зависимость цвета от угла наблюдения и падения света, то возможно использовать только наиболее гибкое, табличное представление ДФО.

«Искристость», вообще говоря, может быть описана в похожих терминах. Это некая вторая ДФО для амплитуды флюктуаций плюс закон их распределения (в большинстве моделей достаточно тривиальный).

С другой стороны, модель краски также определяется входными данными моделирования. Говоря об оптической задаче, мы в качестве «входа» предполагаем готовую структуру высохшей краски¹. Она содержит «чешуйки», для которых мы используем распределение их по размерам, ориентации и положению (т.е. локальную концентрацию), а равно оптические свойства их поверхности (вычисляемой, скажем, как отражение интерференционного покрытия слюды слоем TiO_2). Форма чешуек не используется, ибо обычно она весьма изрезанна, и построение даже статистического описания такой фигуры — отдельная непростая задача. Помимо чешуек, есть ещё «обычные» (мелкие) пигменты. Они описываются просто объёмным поглощением и рассеянием (последнее часто очень незначительно и может быть заменено эмпирическим законом Хенри-Гринштейна). Все эти частицы считаются взвешенными в прозрачном лаке, так что «в среднем» геометрия изотропна, но не обязательно однородна т.к. концентрация может меняться по глубине.

В предлагаемом методе модель краски состоит из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных красящих частиц и интерференционных чешуек, ответственных за «искрение» (рис. 2).

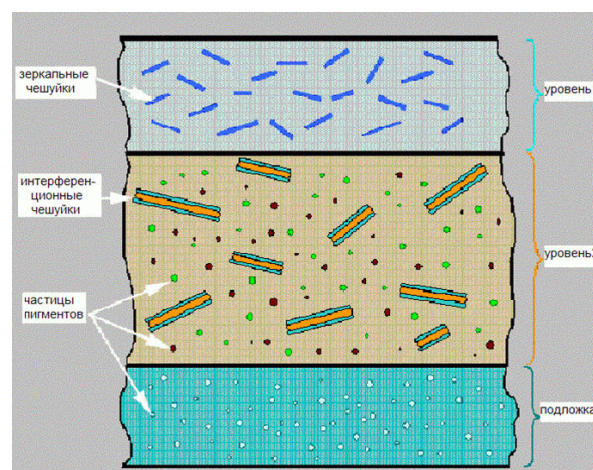


Рис. 2. Поперечное сечение используемой модели краски.

Каждый слой краски расщепляется на множество тонких субслоев таким образом, чтобы внутри каждого субслоя можно было бы пренебречь многократным рассеянием. Предполагается, что все события рассеяния света происходят в разных субслоях. Это позволяет описывать рассеяние в тонких субслоях в аналитическом виде. Такая модель рассеяния основана на статистическом подходе и аккуратно описывает взаимодействие света внутри

¹ Есть модели формирования краски (т.е. как капельки оной, разбрызгиваясь из пульверизатора, растекаются по поверхности и далее высыхают, лишаясь летучих компонент). Однако, это не оптическая задача.

краски, включая радужные и перламутровые эффекты. Рассеяние света каждым слоем краски вычисляется с помощью распределения рассеяния тонкими субслоями методом удвоения [16, 17].

Для расчета светоотражающей характеристики краски необходимо промоделировать движение света сквозь заданные слои ее структуры до отражения от подложки и движение его обратно. Рассеяние света всей краской вычисляется с помощью рассеяния на каждом слое методом сложения [16-18]. Стадия сложения дополняет стадию удвоения, которая вычисляет ДФО реального слоя, используя аналитические выражения для ДФО тонких вообразаемых слоев. Такой подход делает возможным аккуратный учет многократного рассеяния в сложных средах. Он позволяет сформулировать в аналитическом виде весьма точное приближение для ДФО красок с перламутровым и металлическим эффектами.

Методы сложения и удвоения, изначально разработанные для расчета рассеяния в атмосферах планет, применяются к уравнению переноса излучения, преобразованного к форме, удобной для таких задач. В этом смысле метод Hanrahan and Krueger [14] близок, поскольку использует ту же теорию переноса излучения. В работе [14] интегральное уравнение переноса решалось методом Монте-Карло, в предложенном же подходе применяется прямой сеточный метод, который значительно быстрее.

Границы между тонкими субслоями являются вообразаемыми – на них не происходит отражения и преломления света, в отличие от границ реальных слоев в многослойных красках. Кроме этого, оказывается, что с помощью дальнейших упрощений, модель может аккуратно учитывать рассеяние света на металлических чешуйках, при этом эффективная ДФО также может быть вычислена в аналитическом виде. Ошибки, вносимые такими упрощениями, пренебрежимо малы при тех слабых плотностях чешуек, которые применяются в реальных красках (объемная концентрация частиц PVC ~5-10%).

Данная аналитическая модель была специально разработана для описания рассеяния света на ансамблях гладких металлических или перламутровых пластинок, состоящих из слюдяных частиц, покрытых двуокисью титана (TiO₂) [19]. В зависимости от толщины покрытия слюды двуокисью титана перламутровая частица отражает свет различного цвета. Она весьма точна, когда пластинки расположены внутри почти прозрачного вещества с низкой концентрацией пигментов. Последнее условие выполняется в случае реальных красок, которые практически прозрачны для того чтобы подчеркнуть металлические эффекты, например, искрение (sparkles).

К недостаткам предложенного подхода, использующего приближение непрерывной среды, следует отнести:

- приближение независимости событий рассеяния, которое не всегда является достаточно точным. Например, свет, рассеянный одной чешуйкой, может быть отражен другой чешуйкой (или подложкой), а потом опять рассеяться на первой чешуйке. Однако стоит заметить, что вероятность таких событий мала;
- использование концентрации площади чешуек в единице объема вместо использования размеров и концентрации самих чешуек. В частности, ДФО для случая небольшой концентрации крупных чешуек и соответствующей концентрации мелких чешуек будут идентичны. Такое упрощение можно считать достаточно точным только при некоторых условиях,

налагаемых на максимальный размер чешуек и их концентрацию.

Так как существуют случаи, когда данные ограничения существенны, то была реализована также «полная» модель вычисления ДФО, свободная от этих недостатков. Она основана на Монте-Карло трассировке лучей в прозрачной среде лака с использованием явной геометрии. «Явность» тут применима только к крупным частицам (размеры которых \gg длины волны). Мелкие же пигменты (красители) описываются в терминах поглощения и рассеяния среды, потому как бессмысленно говорить о взаимодействии луча с частицей с размерами \ll длины волны. Мелкие пигменты, таким образом, описываются неявной геометрией. Этот подход является комбинацией классической прямой Монте-Карло трассировки лучей и уравнения переноса. Между частицами прохождение луча описывается уравнением переноса, которое решается методом Монте-Карло. Взаимодействие же луча с крупными частицами обрабатывается, как в классической трассировке, т.е. находится точка попадания, разыгрывается направление рассеяния и пр.

Было произведено сравнение между быстрой и «полной» моделями вычислений для различных концентраций, размеров и типов частиц. Для прозрачных диэлектрических частиц отличия невелики и редко превышают 10%. Для металлических чешуек отличия моделей при предельно высоких концентрациях крупных чешуек может достигать даже 50%, но типичная ошибка редко превосходит 15% - 20%. При этом более точная «полная» модель вычисляется за минуты, в то время как быстрая модель – практически в реальном времени (за доли секунды).

Другое явление, явно зависящее от размера чешуек, - это грануляция или флуктуации яркости [14]. По мере увеличения размера чешуек, отдельные чешуйки становятся различимы глазом и действуют как маленькие сияющие зеркала (эффект искрения). Искры могут быть описаны как специальная текстура, существенно зависящая от условий освещения и наблюдения. В дальнейшем текстура накладывается на поверхность окрашенного объекта, увеличивая правдоподобность визуализации краски «металлик».

Вычисление этого эффекта в первом приближении несложно. Основное приближение связано с тем, что «искрение» хорошо видно тогда, когда концентрация искорок невелика, иначе они сливаются и пропадают. При этом можно пренебречь многократными переотражениями. Точка на поверхности краски видна как искорка, если там есть чешуйка и если её нормаль направлена приблизительно по биссектрисе направления освещения и наблюдения (чтобы было зеркальное отражение). Допустимое отклонение направления нормали равно угловому разрешению глаза. Зная распределение частиц по направлению (обычно оно близко к гауссовому) и их концентрацию, мы можем вычислить вероятность того, что данная точка краски «искрит». В противном случае она чёрная. Таким образом и синтезируется случайная текстура.

В случае, когда есть прочие, не бликующие пигменты, полученную текстуру необходимо сложить с ДФО прочих пигментов.

4. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ КРАСОК

Модель краски является важной составляющей разработанного интерактивного программного комплекса

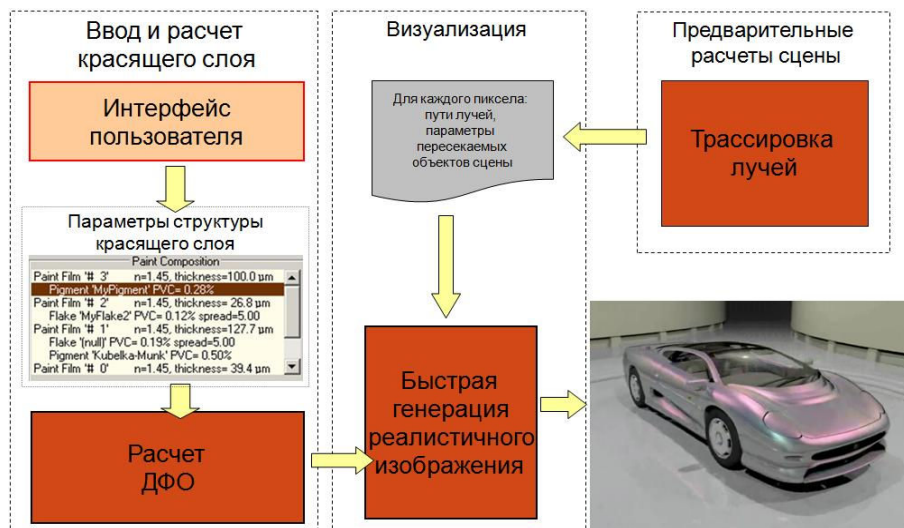


Рис. 3. Схема программного комплекса интерактивного моделирования многослойной краски.

моделирования внешнего вида красок, исходя из их состава. Структура комплекса представлена на рис. 3.

Интерфейсная часть программного комплекса позволяет полностью задать структуру моделируемой краски. Для каждого слоя прозрачного лака пользователь задает характеристика лака, виды содержащихся в слое поглощающих частиц и рассеивающих чешуек, которые могут быть либо зеркальными, либо интерференционными. Для каждого вида частиц или чешуек задается их концентрация в слое и размер. При задании зеркальных чешуек можно указать коэффициент отражения в виде спектрограммы. Для интерференционных чешуек необходимо специфицировать толщины слюдяного слоя и покрытия двуокисью титана. Также управляемым параметром является разброс значений нормалей к чешуйкам, позволяющий контролировать их ориентацию в слое. Параметры могут быть изменены в интерактивном режиме, естественно, в технологически допустимых пределах.

Используя эти параметры и структуру краски, вычисляется ДФО для описанной многослойной модели. Полученная ДФО поступает в модуль визуализации виртуальных сцен, содержащих объекты, окрашенные разрабатываемой краской. Оптическое моделирование с помощью трассировки лучей обычно требует значительного времени. Эта проблема особенно критична, когда результаты трассировки лучей зависят от параметров моделирования, например, положения или ориентации камеры.

Основная идея интерактивной визуализации состоит в сохранении всего массива трассируемых лучей в совокупности с необходимыми вспомогательными данными на стадии предварительного расчета освещенности сцены и его последующим использованием для быстрой визуализации. Количество трассируемых лучей в рассматриваемых задачах может достигать миллионов или даже миллиардов в зависимости от сложности визуализируемой сцены, размерности изображения и требований к устранению лестничного эффекта. Поэтому карты трассируемых лучей [20] сохраняются на диске в процессе предварительного расчета. Свойства всех поверхностей, за исключением

окрашенных разрабатываемой краской, также сохраняются.

На этапе интерактивной визуализации карты трассируемых лучей загружаются по мере необходимости, оптические свойства поверхностей, окрашенных краской, заменяются на рассчитанную ДФО, и формируется итоговое реалистичное изображение. Время визуализации постоянно, зависит только от разрешения изображения и не зависит от сложности геометрии сцены. Например, время, необходимое для полного вычисления ДФО двухслойной краски с перламутровым эффектом и визуализации изображения с разрешением 640×480 пикселей, составило всего около 0.14 секунды на компьютере с процессором Pentium III, 500 МГц. Для «полной» модели краски то же время составляет примерно 0.5–5 секунд в зависимости от параметра краски. Время счета увеличивается с усложнением структуры краски. Например, расчет «полной» модели для трехслойной краски, содержащей два вида чешуек и два вида пигментных зерен, требует от 1 до 9 секунд.

В итоге предлагаемый программный комплекс также является вполне пригодным для интерактивной разработки новых красок. В таком случае в качестве результата можно сохранить полученный состав краски в формате, пригодном для ее изготовления.

5. ПОДБОР СТРУКТУРЫ КРАСКИ ПО ЕЕ ВНЕШНЕМУ ВИДУ

Задача автоматического подбора состава краски, применимого для ее изготовления, по внешнему виду существующей краски является одной из востребованных в автомобильной промышленности. Современные краски имеют достаточно сложный внутренний состав, ингредиенты краски, их концентрации и процесс ее создания часто являются закрытой информацией. Но даже когда изначальный состав краски известен, это не гарантирует совпадение цвета при кузовном ремонте автомобиля потому, что краска меняет свой цвет под воздействием солнечного света, осадков и химических реагентов, применяемых в дорожных работах.

Подбор состава для достижения желаемого цвета — это классическая обратная задача. В первом приближении

можно построить даже аналитическое решение. Но точность его будет невысока, а ограничений — много. Поэтому применялся подход «минимизации ошибки». В процессе подбора выбирался некий «пробный» состав и вычислялась его ДФО. На основе сравнения вычисленной и желаемой ДФО строится вариация состава, уменьшающая ошибку. Процесс повторяется итеративно. На каждом шаге приходится, по меньшей мере, один раз находить целевую функцию, и, стало быть, вычислять ДФО. Поэтому здесь существенно применение быстрого метода.

Для проверки возможностей программного комплекса моделирования красок решать задачу подбора состава краски компанией Merck были предоставлены 4 образца реальных красок, созданных с помощью чешуек Iriodin: WF 67/99/250, WF 67/99/192, WF 9/00/78 и WF 9/00/27. ДФО этих образцов были измерены на измерительном комплексе [21]. После этого была предпринята попытка воссоздать состав этих красок в предположении, что реальная краска состоит из одного слоя.

Результат моделирования (рис. 4):

Удалось получить достаточно близкий цвет восстановленной краски, однако во всех случаях полное совпадение достигнуто не было. Данный эксперимент можно рассматривать, как первый шаг к решению задачи автоматического подбора состава краски, которая является весьма востребованной производителями автомобильных красок. На рисунках левая сторона каждой сферы окрашена измеренной ДФО реального образца, а правая сторона – ДФО, рассчитанной с помощью программного комплекса моделирования краски.

Первоначально было предположено, что краска однородна по толщине. Однако никакими вариациями состава не удавалось воспроизвести её ДФО. Для выяснения причин отклонения были произведены дополнительные измерения слоя краски на прозрачной подложке, и оказалось, что ДФО с разных сторон существенно отличается. Введение неоднородности по толщине позволило удовлетворительно воспроизвести ДФО с обеих сторон. В итоге была получена вполне удовлетворительная точность. Однако дальше улучшить её не удавалось.

Анализ показал, что для голубых красок одной из важнейших причин отклонения служит голубой краситель. Это вещество, в идеале, не должно бы вовсе иметь собственного рассеяния (а только поглощение). Поэтому рассеяние не паспортизируется и не

выдерживается изготовителем пигмента. Измерения двух образцов голубого красителя показали, что рассеяние пигмента в них отличается более чем вчетверо. Производитель краски подтвердил, что существенная часть ошибки связана с нестабильностью изготовления краски (как перемешали, сколько подождали до нанесения, при какой влажности сушили, и пр.) Эти факторы вообще не входят в оптическую модель, которая трактует образцы номинально одного состава как тождественные. На самом же деле они — разные.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании построенной модели многослойной краски были предложены алгоритмы расчета двунаправленной функции отражения света, в общем виде описывающей внешний вид краски с различных направлений и при различных условиях освещения. Был реализован программный комплекс, позволяющий моделировать ДФО краски и реалистично визуализировать ее в некоторой сцене с интерактивной скоростью.

Разработанное решение дает приемлемые результаты при визуализации сложных автомобильных красок при различных условиях освещения, а также показывает хорошее совпадение рассчитанных и измеренных ДФО красок.

Использование комплекса расчета краски в режиме интерактивной визуализации позволяет перейти к задачам моделирования новых красок. Разработанные подходы можно в дальнейшем использовать для решения наиболее востребованной задачи в области моделирования оптически сложных красок – задачи восстановления структуры и состава краски по ее внешнему виду, так называемая задача подгонки цвета.

Проведенные эксперименты с красками фирмы Merck показали хорошее соответствие предложенной модели с реальностью. Как основной цвет результирующей краски, так и цвета таких сложных зон, как блик и около бликовое яркое пятно, близки к цветам реального образца. Полученные в результате моделирования ДФО красок могут быть использованы для физически корректных расчетов освещенности в трехмерных сценах, содержащих окрашенные объекты. Например, они были использованы для анализа и выбора окраски автомобилей, мобильных телефонов и ноутбуков.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-01-00870, а также фирмой Integra Inc. (Япония).

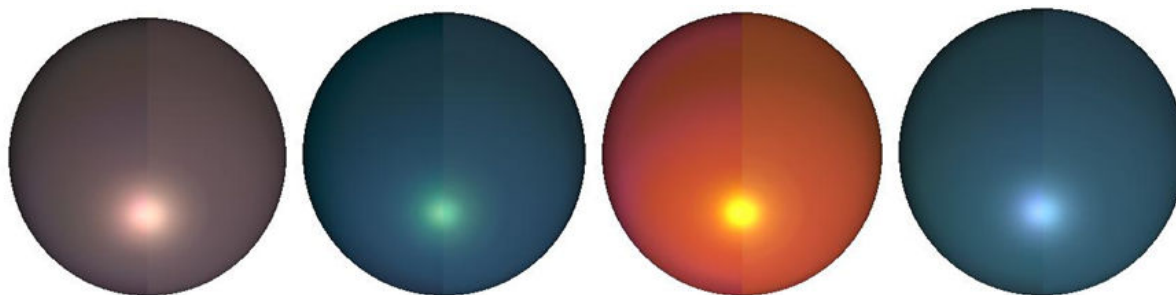


Рис. 4. Визуализация измеренной (левая половина сферы) и рассчитанной (правая половина) ДФО перламутровых красок.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] C.J. Curtis, S.E. Anderson, J.E. Seims, K.W. Fleischer and D.H. Salesin. Computer-generated watercolor. In Proceedings of the 24th Annual International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, pp. 421-430. DOI=<http://doi.acm.org/10.1145/258734.258896>.
- [2] И. Исимару, Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981.
- [3] B.E. Smits and G. Meyer. Newton's Colors: Simulating Interference Phenomena in Realistic Image Synthesis // 1st Eurographics Workshop on Photosimulation, Realism and Physics in Computer Graphics, 1990, pp. 185-194.
- [4] N. Nagata, T. Dobashi, Y. Manabe, T. Usami and S. Inokuchi. Modelling and Visualization for a Pearl-Quality Evaluation Simulator // IEEE Transactions on Visualization and Computer, Vol. 3, No. 4, 1997, pp. 307-315.
- [5] I. Icart and D. Arques. An Illumination Model for a System of Isotropic Substrate – Isotropic Thin Film with Identical Rough Boundaries // 10th Eurographics Rendering Workshop, 1999, pp. 260-272.
- [6] P. Kubelka and F. Munk. Zeits. Tech. Physik (1931), 12, 593.
- [7] P. Callet. Pertinent Data for Modelling Pigmented Materials in Realistic Rendering // Computer Graphics Forum, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 119-128.
- [8] P. Callet. Physically Based Rendering of Metallic Paints and Coated Pigments // Visualization and Modelling (ed. R. Earnshaw et al.), Academic Press, 1997, pp. 287-301.
- [9] Т.А. Сушкевич. Математические модели переноса излучения. Москва, 2004.
- [10] J.S. Gondek, G.W. Meyer and J.G. Newman. Wavelength Dependent Reflectance Functions // Proceedings of SIGGRAPH'94, 1994, pp. 213-220.
- [11] M. Schramm, J. Gondek and G. Meyer. Light Scattering Simulations using Complex Subsurface Models // Graphics Interface '97, 1997, pp. 56-67.
- [12] J. Dorsey and P. Hanrahan. Modelling and Rendering of Metallic Patinas // Proceedings of SIGGRAPH'96, 1996, pp. 387-396.
- [13] J. Dorsey, A. Edelman, J. Legakis, H. Wann Jensen and H.K. Pedersen. Modelling and Rendering of Weathered Stone // Proceedings of SIGGRAPH'99, 1999, pp. 225-234.
- [14] P. Hanrahan, W. Krueger. Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering // In SIGGRAPH' 93 Conference Proceedings, California, August 1993, pp. 165-174.
- [15] R.L. Cook, K.E. Torrance. A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Transaction on Graphics, Vol. 1, No. 1, 1982, pp 7-24.
- [16] J.E. Hansen. Radiative Transfer by Doubling Very Thin Layers // Astrophys. J., 155, 1969, pp. 565-574.
- [17] J.E. Hansen and L. Travis. Light Scattering in Planetary Atmospheres // Space Science Reviews, 16, 1974, pp. 527-610.
- [18] M. Pharr and P. Hanrahan. Monte Carlo Evaluation of Non-Linear Scattering Equations for Subsurface Reflection // In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 2000, pp. 75-84.
- [19] S. Ershov, K. Kolchin, K. Myszkowski, Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modeling. Computer Graphics Forum, Vol. 20, No 3, 2001, pp. 227-238.
- [20] Boris Barladyan, Lev Shapiro, Alexey Voloboy. Ray maps technique for effective interrogation of results of MCRT simulation // Conference proceedings of 21-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2011, Moscow, Russia, pp. 46-49.
- [21] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, А.А. Летунов, И.С. Потемин. Аппаратно-программный комплекс для измерения светорассеивающих свойств поверхностей // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 4, 2006, с. 24-39.

Abstract

The interactive lighting simulation of pearlescent paint basing on paint structure is described. The task of calculation of paint appearance from paint composition was formulated and solved. To provide interactive speed of simulation program the original approaches to calculation and fast rendering algorithms were elaborated. The simulation program structure is described in the paper. The example of program application to the color matching problem of automotive paint is presented.

Keywords: *realistic rendering, lighting simulation of paint, physically based lighting, BRDF, optical properties of surface.*

Authors:

Alexey G. Voloboy, PhD, senior researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (KIAM RAS). E-mail: voloboy@gin.keldysh.ru

Sergey V. Ershov, PhD, senior researcher, KIAM RAS. E-mail: sergey_65@mail.ru

Sergey G. Pozdnyakov, researcher, KIAM RAS. E-mail: mephi32@rambler.ru