

О некоторых фундаментальных проблемах компьютерной (машинной) графики

Ю.М. Баяковский, В.А. Галактионов

Аннотация

С самого начала формирования компьютерной (машинной) графики как самостоятельного научного направления Институт Прикладной Математики (ИПМ) им. М.В.Келдыша РАН являлся одним из ведущих научных центров в стране в этой области. В статье дается обзор основных работ по машинной графике и некоторых связанных с ней областей, проведенных в Институте почти за сорокалетний период.

1. Ранний этап

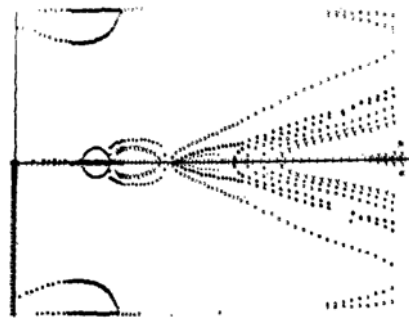
Первые признаки появления нового научного направления относятся к началу 60-х годов прошлого столетия. Знаковым событием считают диссертацию Айвена Сазерленда (1963 г.), в которой были продемонстрированы новые возможности графического интерфейса с машиной в интерактивном режиме [1]. В ИПМ примерно в то же время (1964 г.) был продемонстрирован первый опыт практического применения машинной графики при выводе на характрон последовательности кадров, образующих короткий фильм с визуализацией обтекания цилиндра плазмой (Ю.М.Баяковский, Т.А.Сушкевич) (Рис.1.1).¹

Новый этап в развитии исследований в области машинной графики связан с появлением в ИПМ (1967 г.) графопостроителя CalComp и векторного дисплея. В 1970 г. был выпущен первый обзор по машинной графике, представленный затем как доклад на Вторую Всесоюзную конференцию по программированию (ВКП-2) [2]. По-видимому, это первая публикация на русском языке, в которой появилось словосочетание (термин) *машинная графика*.

К 1971 г. в ИПМ для машины SDS-910 был разработан набор подпрограмм, позволяющих снимать кинофильмы [3], установлена камера для покадровой фиксации изображений, выводимых на экран дисплея. С помощью этой системы осуществлялась

Рис. 1.1. Визуализация на характроне процесса обтекания цилиндра плазмой.

¹ Этот факт был признан Американской ассоциацией по компьютерной графике (ACM SIGGRAPH). В 1990 г. Ю.М.Баяковский был принят в члены Клуба Пионеров компьютерной графики ACM SIGGRAPH.



визуализация поведения шагающего робота (рис. 1.2) [4], а также моделирование гравитационного взаимодействия галактик (рис. 1.3) [5].

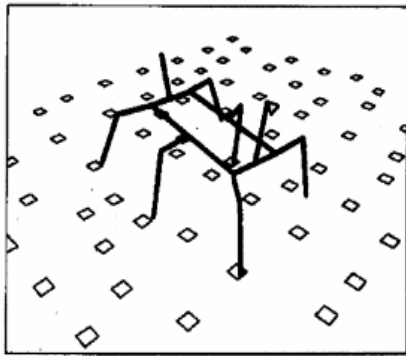


Рис. 1.2. Моделирование походки робота.

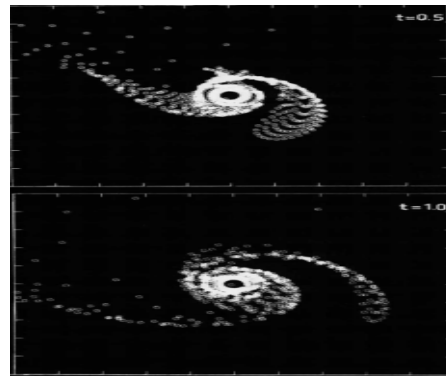


Рис. 1.3. Визуализация процесса приливного взаимодействия галактик.

1.1. Эпоха Графора

Тогда же, в конце 60-х, началась разработка библиотеки графических программ на Фортране. Первая публикация относится к 1972 г. Тогда библиотека позволяла выводить на графопостроитель, а затем и на дисплей, графические примитивы (отрезок прямой, дуга окружности, алфавитно-цифровые символы) и на их базе строить графики функций. В дальнейшем библиотека пополнилась программами аффинных преобразований, штриховки, экранирования, аппроксимации и сплайн-интерполяции, программами визуализации двумерных функций (поверхности и карты изолиний), программами геометрических построений (рис. 1.4). *Графор* был реализован на большинстве существующих в то время в Советском Союзе ЭВМ и операционных систем с выводом практически на все имеющиеся графопостроители и графические дисплеи. Этап создания классической графической библиотеки на Фортране завершился в 1985 г. изданием книги [6], которая подводила итог 15-летней работы.

После этого развитие Графора продолжалось еще несколько лет. На персональных компьютерах были реализованы средства ввода с клавиатуры и мышки, соответствующие международному стандарту GKS, был обеспечен вывод информации в форматах TIFF, PCX и метафайла CGM. Завершилось развитие Графора

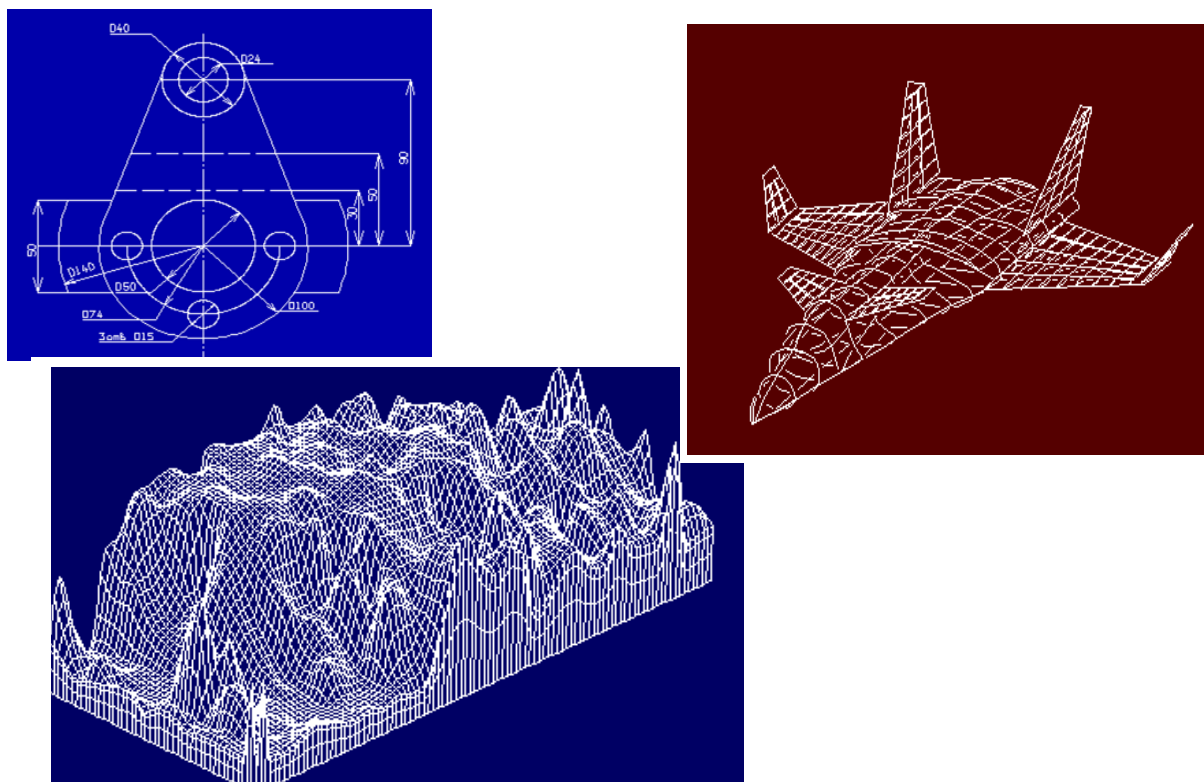


Рис. 1.4. Примеры изображений, построенных с помощью Графורה.

разработкой программ визуализации скалярных и векторных полей на растровых цветных устройствах (1990 г.). Однако спустя десятилетие застоя в научно-технических областях, вызванного развалом СССР и сменой социально-экономической формации, интерес к Графору появился вновь. Ренессанс библиотеки в наши дни связан с ее переносом в среду Windows и Unix [7].

1.2. *ГрафиКон: начало международного сотрудничества*

На границе 80-х и 90-х годов произошли драматические изменения. Спрос на исследования и разработки на внутри-российском рынке упал практически до нуля, и вместе с тем исчезли традиционные (советские) возможности финансирования. Зато открылись возможности международного сотрудничества. Но это привело к кардинальному изменению тематики и условий работы, а также требований к научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам (НИОКР).

Как раз в 1990-м году совместно с американской ассоциацией ACM SIGGRAPH при активном участии ИПМ (С.П.Курдюмов, Ю.Ф.Голубев, Ю.М.Баяковский, В.А.Галактионов) началась подготовка международной конференции по компьютерной графике *ГрафиКон*. Конференция прошла в феврале 1991 года с большим успехом. В ней принял участие целый ряд крупнейших ученых и специалистов в этой области из США и других стран. Среди них Д.Гринберг, А.Ван Дам, Э.Кэтмул, М.Бейли и другие.

Конференция стала ежегодной [8] и позволила многим российским специалистам установить контакты со специалистами США, Англии, Франции, Германии, Японии, Кореи, Китая и многих других стран.

Благодаря контактам, установленным на Графиконе в 1992 году, началось международное научное сотрудничество отдела машинной графики Института с японской фирмой ИНТЕГРА [9] в области компьютерной графики и оптического моделирования, которое продолжается уже более десяти лет. Это сотрудничество позволило оснастить отдел современной техникой и программным обеспечением, сохранить и приумножить квалифицированный кадровый состав, что привело к получению результатов конкурентоспособных на мировом научном рынке.

2. Задача глобальной освещенности: построение фотореалистичных изображений

Магистральным направлением развития компьютерной графики в Институте стало физически аккуратное моделирование распространения света в различных средах. Эта задача сводится к решению задачи *глобальной освещенности*, когда учитывается не только прямая освещенность поверхностей сцены лучами, идущими непосредственно от источников света, но и вторичная освещенность, создаваемая лучами, отраженными или преломленными другими поверхностями. Все физически обоснованные методы расчета глобальной освещенности являются приближенными решениями интегрального уравнения рендеринга [10]. Трудность решения этого уравнения определяется его рекурсивным характером и сложностью области интегрирования, поэтому на практике применяются приближенные методы численного решения.

2.1. Прямая и обратная трассировка лучей

Для численного решения уравнения рендеринга была построена технология на основе *методов Монте-Карло и трассировки лучей*, позволяющая с высокой точностью рассчитывать освещенность реальных сцен и строить высокореалистичные изображения фотографического качества [11-12]. Идея метода Монте-Карло *прямой трассировки лучей* состоит в статистическом воспроизведении механизма распространения света путем моделировании всевозможных траекторий лучей. Траектории световых частиц (фотонов) прослеживаются на всех этапах существования, от момента их генерации источниками света до поглощения или выхода из сцены.

Направление, в котором испускается фотон и стартовая позиция на источнике света определяются стохастически согласно фотометрическому распределению энергии источника и его геометрической форме. Траектория фотона трассируется до пересечения с поверхностью.

При взаимодействии фотона с поверхностью, он может быть поглощен, диффузно отражен (преломлен) с равномерной плотностью распределения по полусфере, отражен (преломлен) в зеркальном направлении, или отражен (преломлен) согласно заданной плотности распределения. При выборе дальнейшего поведения фотона согласно свойствам поверхности (например, диффузного или зеркального отражения) используется принцип рулетки.

Метод не зависит от положения глаза наблюдателя и не осуществляет непосредственного вывода изображения на экран, а лишь предоставляет данные об освещенности для алгоритмов закраски изображений, т.е. строит так называемую карту освещенности, которая является решением задачи глобальной освещенности. Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая произвольные сочетания диффузных и зеркальных свойств как при отражении света от поверхностей, так и при его пропускании через прозрачные и полупрозрачные материалы. Для задания нетривиальных оптических свойств поверхности может использоваться двунаправленная функция, описывающая плотность распределения отражений и преломлений (BRDF/BTDF) (см. разд. 5.1).

После того как глобальная освещенность сцены рассчитана методом Монте-Карло, ее фотореалистичное изображение можно построить с помощью детерминистического алгоритма *обратной трассировки лучей*. Алгоритм состоит в испускании в сцену через пиксели экрана одного или нескольких (первичных) лучей (рис. 2.1). Если найдено пересечение луча с объектом сцены, то из точки пересечения в направлении каждого источника света испускаются лучи, отслеживающие затенение. Для незатененной области рассчитывается суммарный коэффициент поглощения света при взаимодействии с встречаемыми на его пути до источника поверхностями и средами. Полученное трассировкой первичных лучей изображение дополняется “зеркальными” отражениями, а также видом через прозрачные поверхности. Для этого алгоритм трассировки применяется к каждому отраженному или преломленному лучу.

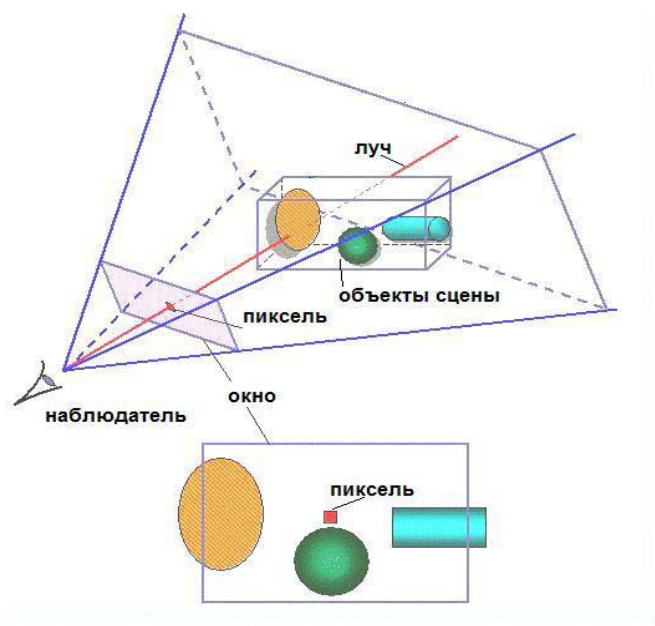


Рис. 2.1. Обратная трассировка лучей через глаз наблюдателя и пиксель на изображении.

Созданный на основе этой технологии программный комплекс нашел применение в сфере архитектурного проектирования, дизайна интерьеров, проектирования систем освещения зданий и других объектов городского строительства. Графическая система позволяет при разработке архитектурных и светотехнических решений увидеть, как будет выглядеть интерьер, здание или комплекс архитектурных (инженерных, скульптурных) сооружений в существующем ландшафте при различных условиях естественного или искусственного освещения до начала их реального воплощения. Она позволяет промоделировать, например, несколько вариантов искусственного освещения и/или подбора отделочных материалов для интерьера или здания и выбрать оптимальный. На рис. 2.2 приведены примеры изображений интерьера и внешнего вида здания, являющиеся результатами компьютерного моделирования.



Рис. 2.2. Примеры фотореалистичных изображений, построенных с использованием алгоритмов моделирования глобальной освещенности.

2.2. Модель освещения: искусственный и естественный свет

В графической системе используется *физически корректная модель освещения*. Параметры освещенности и интенсивности источников света задаются в физических (фотометрических) единицах. Поддерживаются разнообразные типы источников света, включая протяженные источники, условия естественного освещения, а также источником света может быть объявлен любой объект сцены («самосветящиеся» объекты). Для точечных и протяженных источников могут быть назначены гониометрические диаграммы, описывающие угловое распределение излучаемой световой энергии. Система содержит библиотеку предопределенных диаграмм различного характера (рис. 2.3) и позволяет импортировать диаграммы из стандартных форматов IESNA [13].

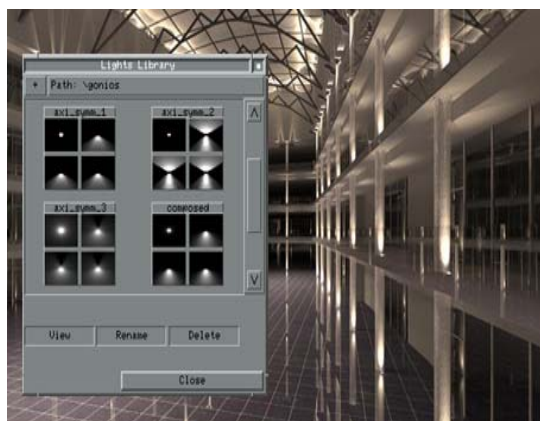


Рис. 2.3. Библиотека источников света и гониометрических диаграмм.

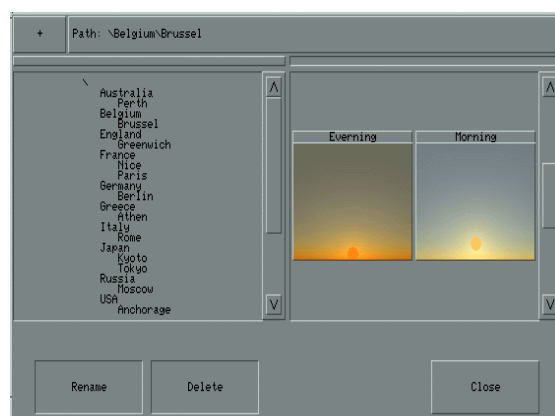


Рис. 2.4. Библиотека параметров солнечного и дневного света. Показаны два режима отображения содержимого библиотеки: слева - в виде списка элементов, справа - в виде окна с графическими иконками.

Для задания *естественного освещения* можно выбрать подходящий элемент из библиотеки дневного (небесного) и солнечного света (рис. 2.4). Библиотека содержит predetermined параметры для различных географических регионов (городов) в разное время суток, например, можно выбрать режим освещения, соответствующий естественному дневному свету в Риме, Италия, в 3 часа дня. Можно также с помощью редактора параметров солнечного и дневного освещения задать его в терминах географических координат, даты (времени года) и времени суток, либо в терминах положения солнца (высота над горизонтом и азимут) и освещенности в горизонтальной плоскости. В редакторе также задается степень облачности. Моделирование небесного освещения для случаев 100% облачности и ее отсутствия соответствует стандарту Международной комиссии по освещению CIE [14]. Небесное освещение с неполной облачностью моделируется с использованием интерполяции.

На рис. 2.5 показан пример изображения, на котором воспроизведены условия естественного дневного освещения, а также хорошо видны эффекты отражения/пропускания света стеклянными окнами согласно закону Френеля преломления/отражения света: лучи, падающие на стекло полого, в основном отражаются, а лучи, падающие почти отвесно, в основном проходят сквозь стекло.



Рис. 2.5. Воспроизведение условий естественного дневного освещения и оптических свойств стекла (отражение и преломление света зависят от угла падения).



Рис. 2.6. Фрагмент изображения, на котором воспроизведены явления преломления, зеркального отражения и каустики.

Как подчеркивалось выше, применяемая технология трассировки лучей по методу Монте-Карло позволяет получать высококачественные реалистичные изображения. На рис. 2.6 виден *эффект каустики* [15] – яркие пятна или полосы, образующиеся в результате многократного преломления и отражения света от криволинейных поверхностей прозрачных объектов.

Каустики являются тонким оптическим эффектом, реалистичная передача которого подтверждает высокий уровень интеллектуальности алгоритмов и программных решений, заложенных в графической системе. Стоит отметить, что каустики нельзя смоделировать с помощью подхода, построенного на методе излучательности (radiosity) [11].

2.3. Освещение, основанное на изображении: HDR изображения

Другим, современным, методом задания естественного освещения могут служить *изображения с широким динамическим диапазоном яркостей (High Dynamic Range Images - HDR изображения)* реальных сцен [16, 17]. HDR изображение представляет собой сферический, бесконечно удаленный, источник света, который с высокой точностью описывает освещенность реальной сцены. Такие изображения могут быть получены путем специальной обработки нескольких цифровых фотографий с различной экспозицией или результатов панорамного видеосканирования. HDR изображения позволяют использовать ранее зафиксированное освещение реальной сцены (в виде изображения с широким динамическим диапазоном яркостей) в качестве источника света для моделируемой сцены. В результате появляется возможность интегрировать моделируемые объекты с реальным окружением. На рис. 2.7 показана модель автомобиля, «встроенная» в реальный природный ландшафт. Хорошо заметны отражения окружающих деревьев на лобовом стекле, капоте и фарах автомобиля.



Рис. 2.7. Иллюстрация использования изображения с широким динамическим диапазоном яркостей в качестве источника освещения для модели автомобиля.



Рис. 2.8. Пример изображения с широким динамическим диапазоном, полученного с использованием разработанного оператора сжатия.

При этом, однако, возникают проблемы, связанные с отображением изображений с широким динамическим диапазоном яркостей в диапазон яркостей, который может быть воспроизведен на стандартных мониторах и принтерах. Динамический диапазон таких устройств существенно уже (иногда на несколько порядков), чем диапазон яркостей реального мира. Для отображения изображений с широким динамическим диапазоном на стандартных устройствах этот диапазон должен быть сжат до уровня, который может быть воспроизведен на реальных мониторах и принтерах. С этой целью был разработан специальный *оператор сжатия* (Tone Mapping Operator) [17], который позволяет эффективным образом выполнять такое отображение без потери детальности изображения, с сохранением локального контраста и в отсутствие артефактов. На рис. 2.8 приведен пример изображения с динамическим диапазоном, превышающим 500 000:1, которое было получено с использованием этого оператора.

2.4. Учет специфики фотографических изображений и зрительного восприятия человека

Одним из важных способов повышения реалистичности изображений является учет *специфики фотографических изображений и зрительного восприятия человека*. Графическая система позволяет воспроизводить некоторые его особенности, в частности, эффект ореолов вокруг ярких источников света — фонарей, ярких бликов на глянцевых поверхностях и пр. (рис. 2.9). Поддерживается также ряд других *эффектов фотографических изображений*, таких как корона вокруг ярких источников

света, дефокусировка изображений, эффект экспозиции при изображении водных поверхностей.

Ореол вокруг ярких источников света. Пример изображения, на котором воспроизведен этот эффект, показан на рис. 2.10. Можно видеть, что ореол формируется не только вокруг первичного источника (фонаря), но и вокруг вторичных источников — бликов на глянцевой поверхности воды. Это относится и к ореолам, видимым человеческим глазом.

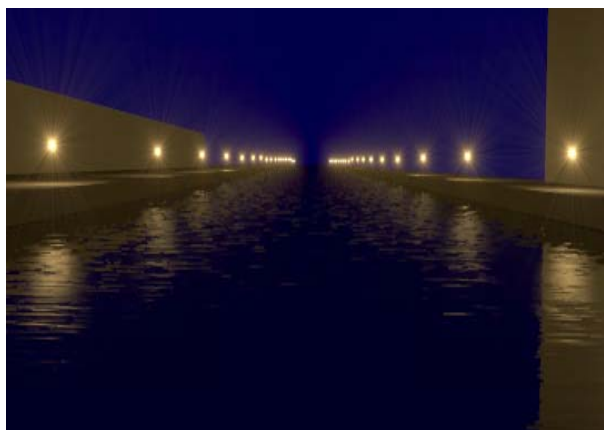


Рис. 2.9. Воспроизведение ореолов вокруг ярких источников света в соответствии с особенностями зрительного восприятия человека.

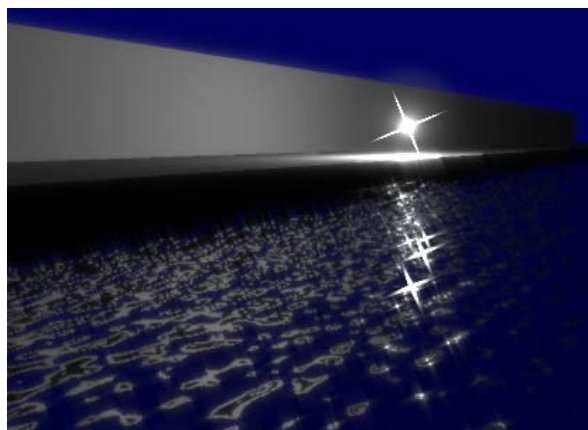


Рис. 2.10. Воспроизведение ореола вокруг яркого источника света и бликов на глянцевой поверхности воды

Ореол, воспроизводимый на фотоизображении, состоит из двух компонентов: лучистой «короны» и блуминга - размытого светового пятна. В ореоле, видимом человеческим глазом, эти два эффекта неразрывно связаны, в то время как в фотоизображении они четко разделены. Это объясняется природой их формирования в процессе фотографирования. Корона образуется, когда свет достигает линзы объектива, блуминг есть результат взаимодействия света с фотопленкой. Поэтому характер двух составляющих зависит от свойств линзы и пленки. В соответствии с этим, в графической системе предусмотрено раздельное управление эффектами короны и блуминга.

Помимо амплитуды ореола и порогового значения светимости, при котором он воспроизводится, можно задавать также число лучей короны, их длину (относительно диаметра изображения) и толщину. Для блуминга задается характер функции затухания и радиус.

Дефокусировка изображения. Если камера сфокусирована на некотором объекте, то на фотографии он будет выглядеть четко, а предметы, расположенные ближе или дальше, будут выглядеть несколько размытыми. Этот эффект

поддерживается в процессе визуализации при задании соответствующих опций и параметров фокусирования камеры. Эффект реализован не только для геометрических объектов, но и для источников света.

Эффект экспозиции. Эффект экспозиции воспроизводится для движущихся волнообразных водных поверхностей. Для этой цели используются специальные экспозиционные текстуры. Экспозиционная текстура воспроизводит меняющийся во времени рельеф водной поверхности по заданным параметрам, таким как размеры водного резервуара, его глубина, скорость и направление ветра, диапазон длин волн и число гармоник, максимальное время экспозиции, которое будет использоваться, число «кадров» текстуры, которые будут сгенерированы и их разрешение.

По этим параметрам генерируется серия волнообразных поверхностей, соответствующих моментам времени $0, \dots, t_{\max}$, где t_{\max} - максимальное время экспозиции. При визуализации сцены с экспозиционной текстурой и заданным ненулевым временем экспозиции $t_{\exp} \leq t_{\max}$ производится суперпозиция волнообразных поверхностей, соответствующих моментам времени из промежутка $[0, \dots, t_{\exp}]$. За счет этого достигается эффект размытости водной поверхности, как на фотографических снимках.

На рис. 2.11 показаны примеры изображений сцены, содержащей водную поверхность, полученные с нулевым и ненулевым значениями параметра экспозиции. В первом случае вода выглядит как бы застывшей, что редко бывает на реальных фотоизображениях, так как время экспозиции съемки всегда ненулевое. Во втором случае изображение волн в "лунной дорожке" выглядит более правдоподобным.

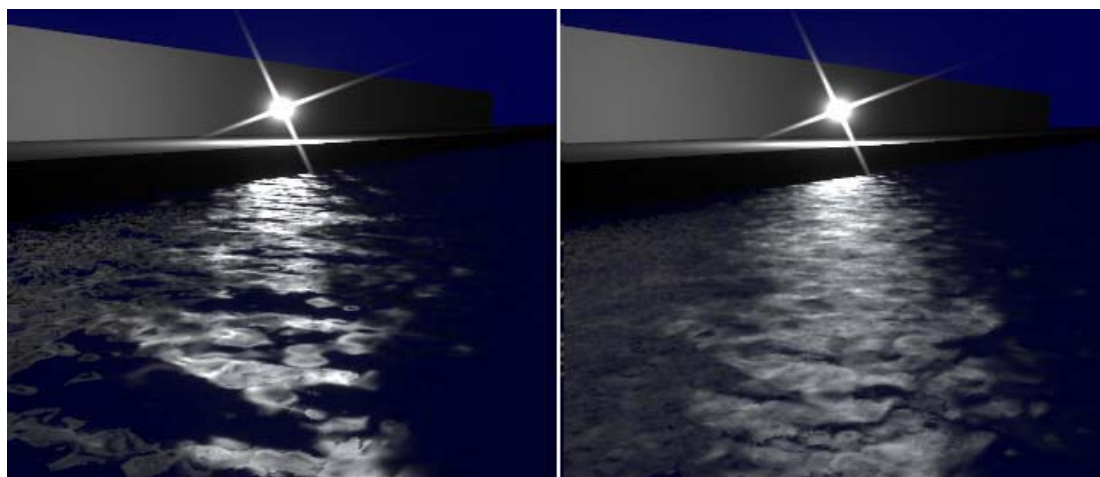


Рис. 2.11. Изображения водной поверхности в ночное время. Слева — изображение, полученное с нулевой экспозицией, справа — изображение, полученное с экспозицией 1 сек. Хорошо виден также ореол вокруг яркого источника света.

3. Визуализация результатов моделирования

Были разработаны средства визуализации трехмерных распределений физических характеристик (скалярных и векторных полей температур, влажности, воздушных потоков и др.) в их физическом окружении, например, в интерьере здания, в районе застройки домов, в пассажирском салоне автомобиля или самолета или внутри технических устройств, таких как компьютер. В результате повышается информативность изображений, позволяя в наглядной форме представлять связь между характером физического процесса и обуславливающими его внешними факторами. Это может оказаться важным в градостроительстве, при проектировании систем кондиционирования воздуха и отопления, систем охлаждения в приборостроении и компьютерной индустрии и др. Разработанные средства позволяют «накладывать» цветовые карты (тоновая заливка), карты изолиний, векторные поля на реалистичные изображения рассматриваемых сцен в условиях искусственного или естественного освещения [18].

Поддерживается визуализация пространственных скалярных полей, а также трех и четырехмерных векторных полей, заданных на равномерной или неравномерной сетке. Для скалярных полей возможны представления тоновой заливкой и изолиниями на одной или нескольких параллельных плоскостях, а также на трех ортогональных плоскостях. Изолинии могут применяться в сочетании с тоновой заливкой. Скалярные поля можно также изображать в виде изоповерхностей. Трехмерные векторные поля отображаются однотонными векторами переменной длины или разноцветными векторами постоянной длины, где цвет представляет длины векторов. Четырехмерные поля (например, скорость движения воздуха плюс температура) отображаются векторами переменной длины; направление и длина векторов соответствуют трем компонентам, а для представления четвертой служит цвет. Векторные поля визуализируются на заданных пользователем плоскостях в пространстве сцены.

На рис. 3.1 показано изображение здания и обтекающие его воздушные потоки. Стрелки показывают направления перемещения воздушных масс. Абсолютные значения скорости ветра обозначены цветом стрелок. Рис.3.2 иллюстрирует распределение температуры в салоне автомобиля в солнечную погоду с работающим кондиционером, представленное на вертикальной секущей плоскости с полупрозрачной заливкой цветом.



Рис.3.1. Векторное поле воздушного потока вокруг фасада здания.

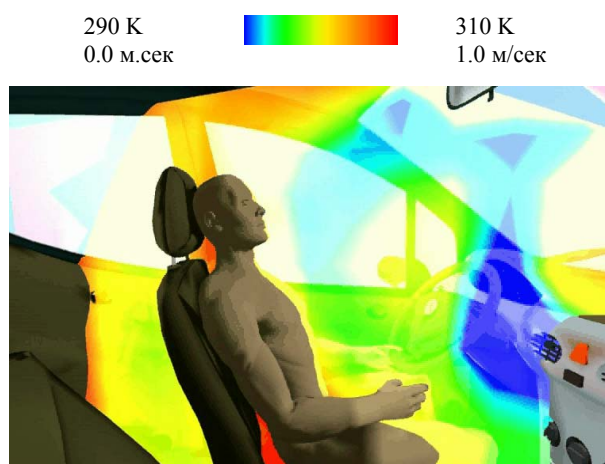


Рис.3.2. Цветовая карта распределения температуры внутри автомобиля.

4. Моделирование сложных оптических систем

Созданная технология расчета распространения света оказалась столь эффективной и точной, что позволила сделать следующий шаг и перейти к моделированию и инженерному проектированию сложных оптических светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические панели, элементы волоконной оптики, автомобильные фары и приборы и др. Системы такого рода характеризуются многократным количеством внутренних переотражений света.

На рис. 4.1 схематично показаны некоторые из таких систем. Приборы, отмеченные цифрами 1, 2, 3, 5, представляют собой осветительные части жидкокристаллических дисплеев (так называемых “LCD” мониторов), которые сейчас широко используются, например, в портативных компьютерах. Прибор, отмеченный цифрой 4, представляет осветительный элемент приборной доски современного автомобиля. Как правило, компоненты таких приборов имеют достаточно сложные оптические свойства и геометрию, включая поверхности с микроструктурами. Принцип работы таких устройств основан на эффекте полного внутреннего отражения. Для их моделирования практически невозможно использовать обычные детерминистические методы лучевого расчета распространения света, применяемые для расчета линзовых оптических систем. Наиболее эффективным и физически точным подходом в этом случае является трассировка лучей, основанная на методе Монте-Карло.

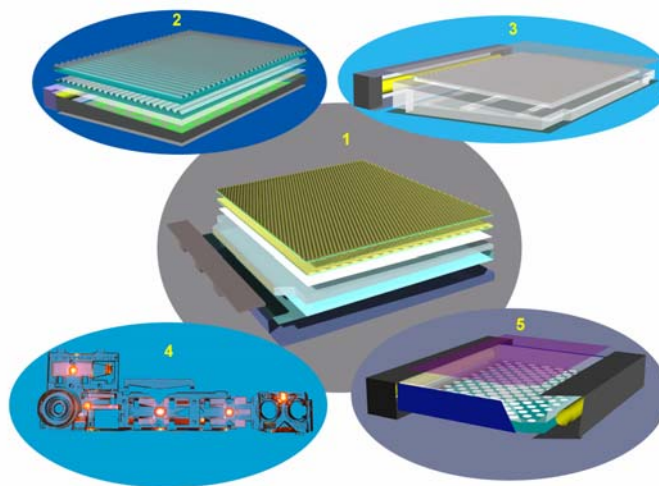


Рис. 4.1. Примеры осветительных систем.

4.1. Системы подсветки жидкокристаллических мониторов

Рассмотрим процесс проектирования одного из таких устройств, а именно осветительной части жидкокристаллического монитора (рис. 4.2), более подробно. Конечной целью моделирования подобных систем является расчет пространственного и углового распределений яркости света над выходной гранью устройства (помеченной рамкой на рисунке). Задача заключается в том, чтобы сделать яркость на выходе максимально равномерной.

Схематично принцип действия современной системы для подсветки LCD монитора состоит в следующем: свет, излучаемый люминисцентной лампой, попадает через входную грань в акриловую светопроводящую пластину (рис. 4.2) - основной оптический элемент прибора, по которой распространяется путем многократных полных внутренних отражений. На нижнюю сторону этой пластины нанесена сетка диффузных точек, которая рассеивает падающий свет. Свет может выйти из пластины через верхнюю выходную грань в результате диффузного рассеяния от этих точек (рис. 4.2). Все остальные световые лучи падают на верхнюю поверхность под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения, что не дает возможности свету выйти за пределы пластины. Поэтому интенсивность выходящего светового потока в точке определяется плотностью распределения диффузной сетки под этой точкой (и в некоторой ее окрестности).

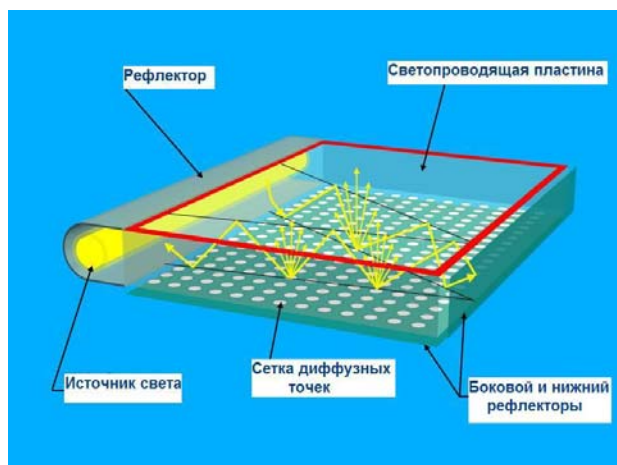


Рис. 4.2. Схема системы подсветки жидкокристаллического монитора.

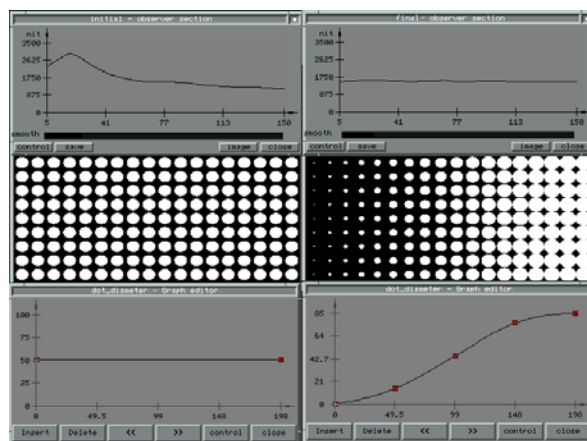


Рис. 4.3. Иллюстрация процесса проектирования диффузной сетки.

С другой стороны интенсивность света, распространяющегося внутри пластины, падает с расстоянием от входной грани (левая грань на рис. 4.2). Для компенсации этого эффекта плотность диффузной сетки должна постепенно возрастать слева направо, если мы хотим в результате получить на выходной грани равномерное распределение (рис. 4.3). Таким образом, размер диффузных точек, изменяющийся вдоль пластины, или точнее, зависящая от него плотность распределения диффузного материала, является важнейшим параметром при проектировании системы подсветки. В верхней части рис. 4.3 слева и справа показаны графики распределения интенсивности светового потока на выходе системы до начала процесса проектирования и после. Легко видеть, что в результате увеличения размера диффузных точек в направлении слева-направо (рис. 4.3, середина) удается достичь равномерности светового потока на верхней выходной грани. Нижние, редактируемые, графики на рис. 4.3 являются одним из инструментов, позволяющих изменять размеры диффузных точек.

Кроме расчета матрицы диффузных точек в процессе проектирования системы подсветки LCD монитора моделируется также рефлектор светового источника (люминисцентной лампы) с целью максимизации интенсивности светового потока, падающего на входную грань светопроводящей пластины.

Отметим, что для достаточно точного расчета подобных реальных оптических систем необходимо учитывать десятки и сотни последовательных отражений световых лучей. Поэтому глобальность моделирования освещенности (см. разд. 2) играет здесь важнейшую роль.

Результаты расчета распространения света в модели, осуществляемого по методу Монте-Карло, накапливаются в так называемых *элементах наблюдения*.

Элемент наблюдения представляет собой виртуальный светочувствительный сенсор, который, не оказывая влияния на распространение света в модели, регистрирует лучи и накапливает распределение световой энергии в соответствии с заданными пользователем параметрами. Например, распределение яркости или освещенности на заданной прямоугольной поверхности, расположенной над выходной гранью устройства подсветки (рис. 4.4-а). Распределение будет вычисляться с заданным пользователем разрешением. Возможна выборочная регистрация лучей, которые поступают или исходят в заданном диапазоне направлений. Поддерживаются также элементы наблюдения, регистрирующие угловое распределение светового потока (рис. 4.4-б), и другие типы.

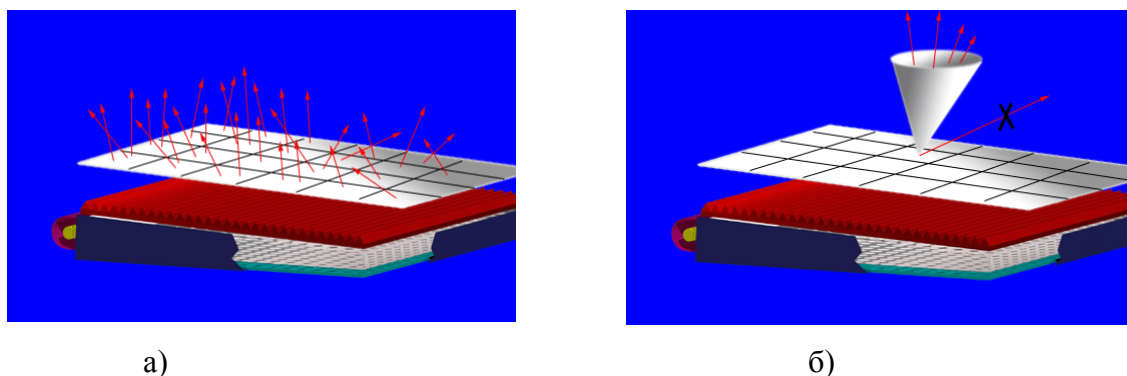


Рис. 4.4. Распределение яркости или освещенности с заданным разрешением на прямоугольной поверхности (а) и в заданном диапазоне направлений (б).

Пользователь может определить в сцене несколько элементов наблюдения. Накопленные результаты в каждом из элементов наблюдения представляются как в виде числовых таблиц, так и в удобной графической форме, доступной для просмотра в интерактивном режиме (рис. 4.5).

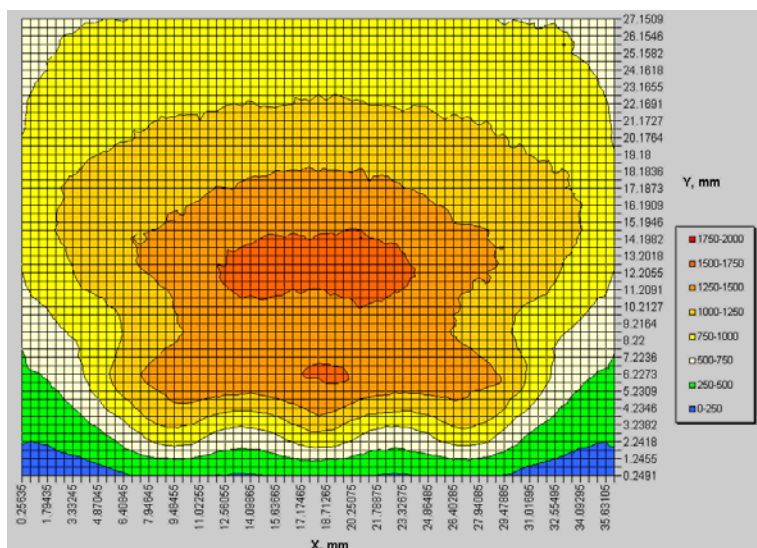


Рис. 4.5. Пространственное распределение яркости в направлении перпендикулярном выходной грани, вычисленное с высоким пространственным и угловым разрешением.

4.2. Поверхности с микрорельефом. Поляризация

Кроме рассмотренных выше матриц диффузных точек при моделировании жидкокристаллических панелей используются и другие типы поверхностей со сложными оптическими свойствами, например, поверхности с *микрорельефом*. На рис. 4.6 показаны различные типы таких микроструктур: а) матрица углублений; б, в) матрицы параллельных и пересекающихся бороздок соответственно. Размер и шаг углублений и бороздок может задаваться параметрически и меняться по обеим осям независимо. Допускается не только детерминистическое, но и стохастическое распределение элементов микрогеометрии по поверхности. Количество таких элементов в реальных устройствах может исчисляться от 10^6 до 10^{12} и более. На рис. 4.1, приборы 1 и 2, схематично показаны примеры использования поверхностей с микроструктурами при проектировании жидкокристаллических панелей.

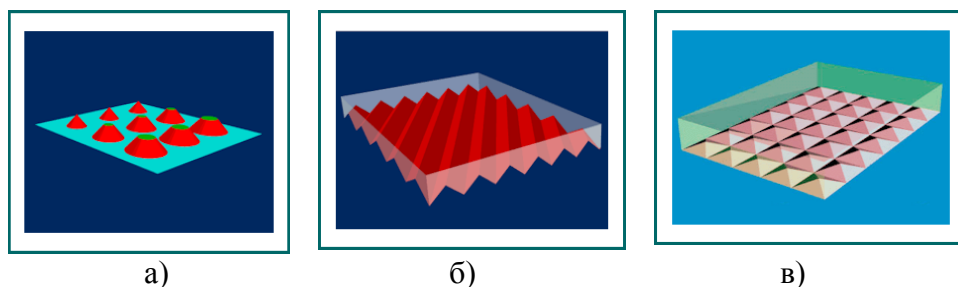


Рис. 4.6. Типы поверхностей с микрорельефом.

Очевидно, что такие сложные распределенные микроструктуры не могут быть заданы традиционными геометрическими способами, например, многоугольниками или сплайнами (NURBS). В противном случае размер такого описания просто выйдет за пределы любого разумного объема компьютерной памяти, не говоря об эффективности

трассировки лучей при работе с такой геометрией. Для работы с подобными поверхностями используются специально созданные методы.

Имеется также возможность использовать и моделировать *поляризационные* свойства света. Поляризация света является важным фактором, влияющим на процесс проектирования многих оптических устройств, в частности в системах подсветки жидко-кристаллических дисплеев с многослойными покрытиями и др. Разработан инструментарий для описания источников поляризованного света, поляризационных свойств материалов, а также для анализа поляризации света в модели. Он включает поддержку поляризационных фильтров, реализацию поляризационной двунаправленной функции рассеяния света (BSDF) (см. разд. 5.1) и др.

4.3. Моделирование осветительных систем

Как отмечалось выше, разработанный программный комплекс позволяет моделировать не только светопроводящие, но и осветительные системы, такие как фары и фонари автомобилей, прожекторы и др. Основными целями моделирования и дизайна осветительных систем являются создание максимально эффективного светового потока в определенном направлении. Параметрами дизайна, в основном, бывают форма рефлектора, материал из которого он создан, вид и форма непосредственно источника света (лампы).

На рис. 4.7 показано изображение автомобильной фары, смоделированной с использованием созданной системы. В данном случае важным также являлась равномерность распределения интенсивности светового потока. Результаты компьютерного моделирования этой фары полностью совпали с измеренным световым потоком реального устройства.



Рис. 4.7. Визуализация компьютерной модели автомобильной фары (с разрешения фирмы *Thomas & Gilles GmbH*)

5. Моделирование и визуализация оптически сложных материалов

5.1. Моделирование и визуализация красок со сложной внутренней микроструктурой

Дальнейшим развитием направления, связанного с моделированием оптических систем, которое получило развитие в Институте в последние годы, стало моделирование и визуализация новых оптически сложных материалов, таких как *многослойные (с металлическим эффектом и перламутровые) краски* со сложной микроструктурой [19, 20]. Разработанная модель краски строится из плоско-параллельных однородных слоев, каждый из которых состоит из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек (рис.5.1).

Каждый уровень описывается в виде однородной среды, состоящей из наполнителя и чешуек, и пигментных частиц, рассеянных в нем. *Чешуйки* представляют собой мельчайшие металлические или диэлектрические пластинки, иногда покрытые диоксидом титана (интерференционное покрытие). Они рассматриваются как крошечные цветные зеркала и характеризуются размером, ориентацией, толщиной, оптическими свойствами тела и покрытия и некоторыми другими параметрами. *Пигменты* представляют собой диэлектрические частицы, характеризующиеся своей плотностью, оптическими свойствами и распределением размеров. *Наполнитель (лак)* описывается как прозрачное вещество с заданными преломлением и абсорбцией. *Цветная подложка* представляет собой твердую цветную пленку с отражением одинаковым по всем направлениям. Оптические характеристики описываемой краски вычисляются путем моделирования распространения света в рамках вышеупомянутой многослойной модели.

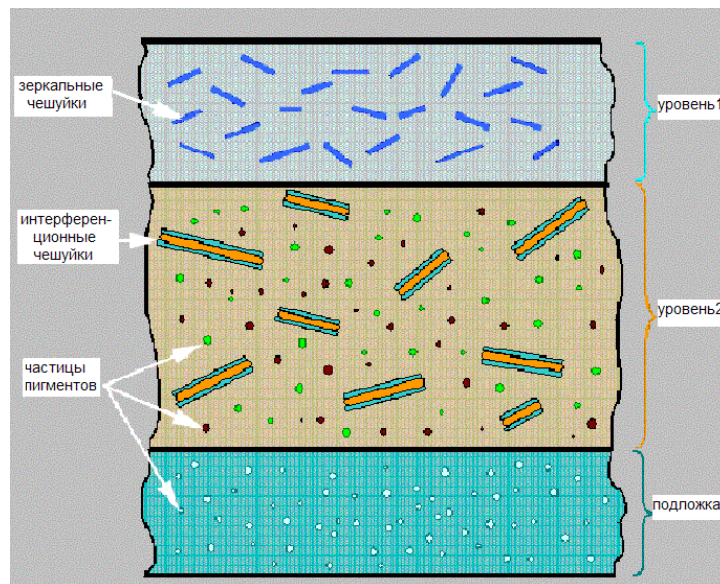
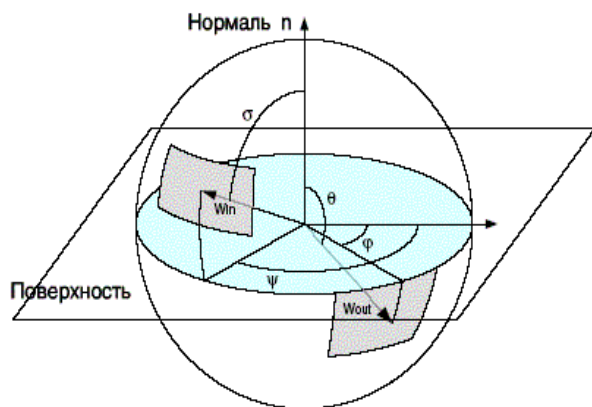
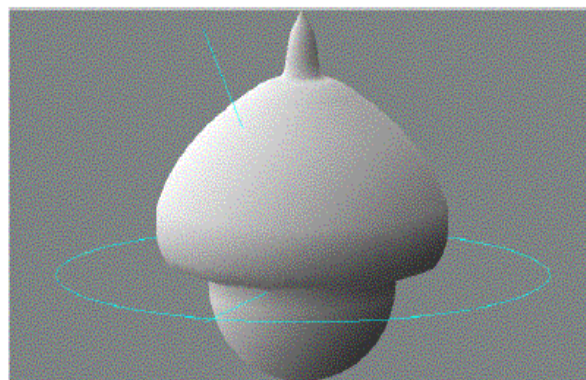


Рис. 5.1. Схема используемой модели краски (поперечное сечение).

Цвет таких красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов. Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скалярными коэффициентами, а требуют более сложного описания. Наиболее полно их можно задать с помощью *двухнаправленных функций отражения/пропускания* (BRDF/BTDF) (ДФО/ДФП) [21]. ДФО, заданная в каждой точке поверхности, определяет какая часть энергии, принятая с направления w_{in} будет рассеяна поверхностью в направлении w_{out} . Таким образом, в общем случае, ДФО в каждой точке является функцией двух направлений. Так как каждое из направлений – излучаемой и принимаемой энергии – можно задавать в сферической системе координат, в общем случае ДФО является функцией четырех углов (рис. 5.2). В качестве полярных осей выбраны направление нормали и некоторое выделенное направление на поверхности.



а)



б)

Рис. 5.2. Задание ДФО в сферической системе координат:

а) система координат и схема задания углов, определяющих направления $w_{in}(\sigma, \psi)$ и $w_{out}(\theta, \phi)$; б) пример реальной ДФО, полученной путем измерений (см. разд. 6) – трехмерное изображение соответствует углу падения $\sigma = 0$.

Реально, однако, ДФО зависит также от пятого параметра - длины волны падающего света. Световые лучи разных длин волн (цветов) рассеиваются поверхностями различным образом (рис. 5.3).

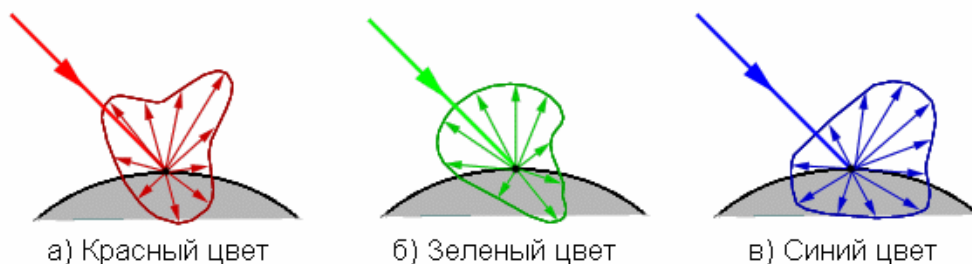


Рис. 5.3. ДФО световых лучей для разных длин волн (цветов) различные (изображены плоские поперечные сечения).

При построении реалистичных изображений сцен, содержащих поверхности с ДФО, их освещенность (цвет) вычисляется такой, какой она видима из заданной точки наблюдения. На рис. 5.4 показано изображение модели автомобиля, покрашенной краской с ДФО компонентой, при естественном освещении (солнечный свет при полном отсутствии облачности). Интенсивность солнечного света вычисляется в соответствии со стандартами дневного освещения Международной комиссии по освещению CIE [14].



Рис. 5.4. Физически аккуратное изображение модели автомобиля, покрашенного краской с металлическим эффектом, при естественном освещении.



Рис. 5.5. Иллюстрация процесса проектирования новой оптически сложной краски.

Если нужной краски с ДФО нет в имеющейся библиотеке красок, новая краска может быть составлена путем вариаций компонент существующей краски, таких как глянец, металлический эффект, интенсивность (рис. 5.5, правое окно). Или можно воспользоваться «морфингом», т.е. составить новую краску путем смешения двух или нескольких имеющихся красок (рис. 5.5, левое окно).

Были также созданы программные средства, которые на основе модели двухслойной краски позволили решать задачу восстановления состава краски по ее визуальным (оптическим) характеристикам (цвет краски, структура, размер и качество глянца при заданном освещении, плотность и размер чешуек и др.), и наоборот, по физико-химической композиции самой краски (тип применяемого металлического порошка, его плотность, ориентация чешуек, свойства наполнителя и пр.) рассчитать оптические параметры краски и ее визуальные характеристики.

В результате специалист-дизайнер получает возможность проектировать новые композиционно возможные краски в интерактивном режиме, манипулируя исключительно ее визуальными атрибутами и параметрами (которые естественно зависят также от формы поверхности и условий освещения). В результате он получает композиционную информацию о краске, необходимую для ее опытного производства.

На рис. 5.6-а приведен пример, иллюстрирующий процесс выбора желаемой протяженности зоны *глянца* (*gloss*) окрашенной поверхности; т.е. размера самого яркого (белого на рисунке) светового пятна. Он определяет уровень шероховатости окрашенной поверхности. Следует отметить, что внешний вид атрибутов зависит также от кривизны поверхности и условий освещения, поэтому, например, сплошная облачность практически полностью нивелирует влияние таких атрибутов, как глянец.

На рис. 5.6-б показан процесс задания количества *блесток* (*sparkles*) атрибута *блеска* (*glitter*) путем вариации плотности металлических чешуек. Блеск здесь является комплексным атрибутом, порождаемым металлическими чешуйками, входящими в состав современных автомобильных эмалей. Он определяется такими параметрами как протяженность зоны блеска, количество блесток (текстура краски), интенсивность и насыщенность цвета блесток.

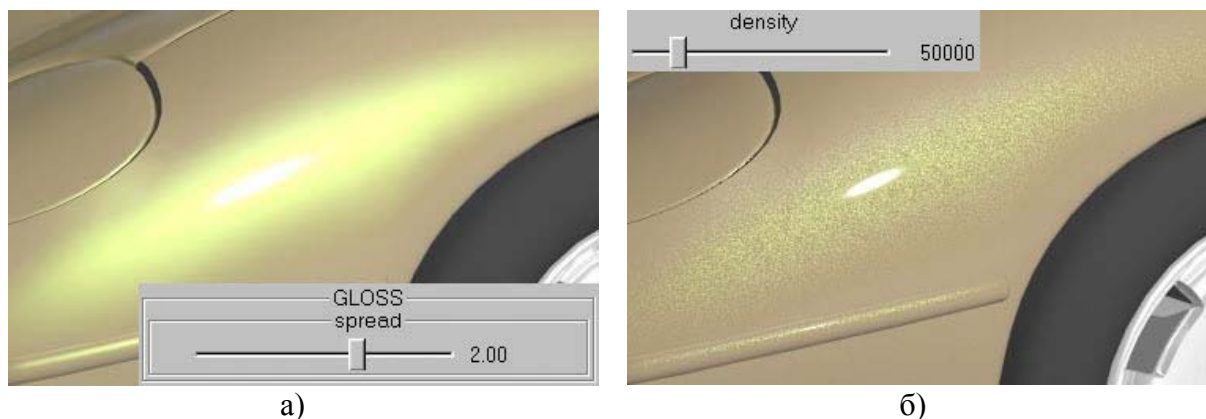


Рис. 5.6. Иллюстрация процесса проектирования композиции краски по ее визуальным характеристикам: а) выбор нужной протяженности зоны глянца; б) плотность металлических чешуек в красочном слое определяется вариацией количества блесток в атрибуте блеска.

И обратно, внешний вид краски при том или ином освещении можно смоделировать, основываясь на известной информации о ее составе. Технолог получает возможность проектировать и визуальное контролировать в интерактивном режиме влияние вносимых им изменений в композицию экспериментального образца краски до начала ее реального изготовления. При этом используется физическая (композиционная) модель краски, схематично показанная на рис. 5.1.

Метод трассировки лучей, описанный выше, позволяет визуализировать только эффекты геометрической (лучевой) оптики. С его помощью нельзя моделировать эффекты, определяемые волновыми свойствами света. Однако оптические свойства частиц краски (пигментов и интерференционных чешуек), такие как цвет, существенным образом определяются именно волновыми эффектами. Поэтому отражательные свойства интерференционных частиц, например, вычисляются с использованием программ волновой оптики, предназначенных для моделирования интерференционных покрытий. Полученная в результате зависимость коэффициента отражения поверхности чешуйки от направления падающего света используется в дальнейшем в программах трассировки лучей. Используя такой «комбинированный»

подход удастся корректным образом учесть волновые эффекты взаимодействия света с интерференционными покрытиями.

5.2. Моделирование и визуализация тканей

Другим сложным для визуализации и моделирования типом материала являются *ткани*. Имеющаяся технология расчета распространения света была дополнена методами (прямой) стохастической трассировки лучей. Были созданы средства визуального проектирования некоторых типов тканей, основывающиеся на их физических и структурных параметрах, которые подразделяются на *детерминистические* (тип сплетения ткани, цвет нитей, количество волокон в нити, форма поперечного сечения волокна, оптические свойства волокон и др.) и *стохастические* (распределение волокон вдоль нитей, уровень шероховатости поверхности волокна и пр.) [22, 23]. Эта модель применима для искусственных типов тканей, таких как искусственный шелк, капрон и др.

В результате моделирования генерируется ДФО ткани, описывающая распределение отражаемого света в зависимости от направления падающего света. Полученная ДФО может быть непосредственно использована для визуализации объектов, покрытых моделируемой тканью, с помощью программной системы, описанной в разд. 2. Это позволяет оценить, как будет выглядеть тот или иной материал (ткань) при различных условиях освещения и направлениях наблюдения до того, как он будет произведен. Рис. 5.7 иллюстрирует процесс моделирования внешнего вида ткани типа искусственного шелка. На рис. 5.8 показано изображение объекта (кресла), покрытого смоделированной тканью.

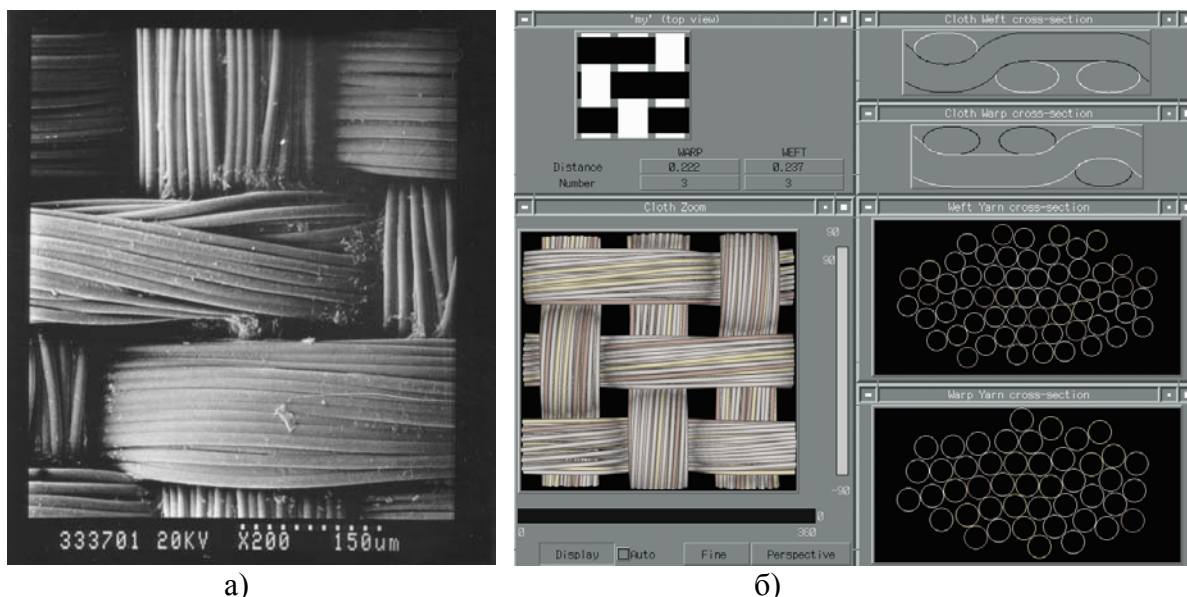


Рис. 5.7. Процесс проектирования внешнего вида ткани: а) микрофотография сплетения реальной ткани; б) моделирование микроструктуры ткани путем переплетения ацетатных волокон в нити и комбинации нитей в заданный тип сплетения.



Рис. 5.8. Макроизображение смоделированной ткани.

5.3. Объемное рассеяние света

Реализация функции *объемного рассеяния* позволяет моделировать рассеяние света внутри самого объекта, а не только на его поверхности. Такими свойствами обладают многие материалы, используемые в производстве оптических устройств. Обычно материал со свойствами объемного рассеяния состоит из некоторой среды и мельчайших частиц, распределенных в этой среде (рис. 5.9). Свет самопроизвольно рассеивается на этих частицах.

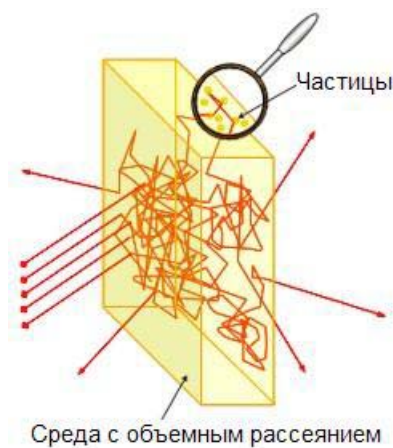


Рис. 5.9. Сложные трансформации световых лучей при прохождении через среду, обладающую свойством объемного рассеяния.

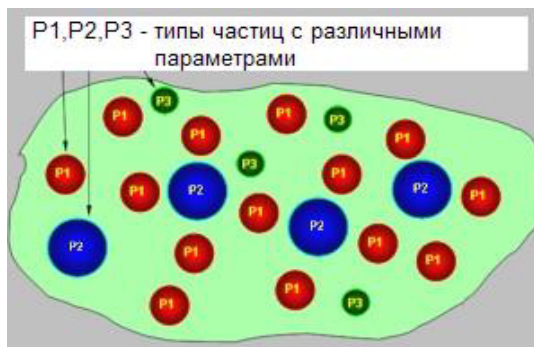


Рис. 5.10. Смесь нескольких типов рассеивающих частиц, обладающих различными свойствами.

В разработанной системе поддерживаются две модели объемного рассеяния. В одной из них (Rayleigh/Mie) свет рассеивается средой, в которой распределены однородные сферические частицы, задаваемые их радиусом, комплексным индексом преломления и концентрацией. В другой, более общей модели, объемное рассеяние определяется непосредственно заданием функции распределения для отдельной частицы (фазовой функции), сечениями рассеяния и поглощения рассеивающих частиц и их объемами. Фазовая функция описывает распределение угловой интенсивности рассеянного света и зависит от длины волны и от угла между рассеянными и падающими лучами.

Может быть задано неограниченное количество типов частиц с различными параметрами (концентрация, индекс преломления, радиус, объем, фазовая функция и др.) (рис. 5.10), в том числе и поддерживаемых разными моделями. При реализации функции объемного рассеяния может учитываться поляризация света (см. разд.4.2).

Как уже отмечалось выше, материалы, обладающие свойством объемного рассеяния, широко применяются в различных оптических устройствах. Одним из важных примеров является использование так называемых HSOT (Highly Scattering Optical Transmission) полимеров в качестве материала для светопроводящих пластин систем подсветки жидкокристаллических мониторов (см. рис. 4.2). Такие полимеры имеют неоднородную структуру на микро уровне (частицы) и характеризуются высоким уровнем объемного рассеяния света. Их использование в качестве материала для светопроводящих пластин позволяет существенно упростить и удешевить конструкцию системы подсветки, получая при этом выходящий световой поток лучшего качества.

6. Измерения светорассеивающих свойств материалов

С самого начала работ по физически аккуратному моделированию распространения света стало ясно, что движение в этом направлении невозможно без качественных и точных значений светорассеивающих свойств реальных материалов, используемых в моделировании: красок, рефлекторов, элементов жидкокристаллических панелей и др. В большинстве случаев эти свойства материалов неизвестны и получить их возможно только непосредственными измерениями. Из-за многомерного характера отражения света и большого числа необходимых измерений использование традиционных оптических приборов оказалось невозможным.

В связи с этим в Институте был разработан и построен *спектральный скаттерометр* - оригинальный лабораторный измерительный комплекс для определения спектрального и пространственного распределения света, рассеиваемого поверхностями, т.е. для измерения их ДФО/ДФП [24].

На рис. 6.1 показана общая схема установки. В скаттерометре используется световая энергия от монохроматора, который получает ее от ксеноновой дуговой лампы с цветовой температурой 6000 К (дневной свет). В качестве приемника используется устройство регистрации на ПЗС-матрице. Для одновременного измерения рассеяния в различных направлениях применяются световоды, направляющие рассеянный свет на ПЗС-матрицу. Для каждого из углов падения света производятся измерения исходящего света по всей полусфере и для широкого диапазона длин волн (с интервалом 10 нм, в диапазоне от 400 нм до 690 нм). Угол падения может быть 0, 10, 20, 30, 45 и 60° (считая от нормали к поверхности). Значения ДФО/ДФП, полученные в результате измерений, представляются в виде текстового файла в формате пригодном для использования в системах, описанных выше.

Уникальность построенной установки заключается в том, что в отличие от ряда существующих в мире аналогов она позволяет измерять полную оптическую характеристику поверхности: отражение и преломление света во всех направлениях при произвольных углах падения света на поверхность.

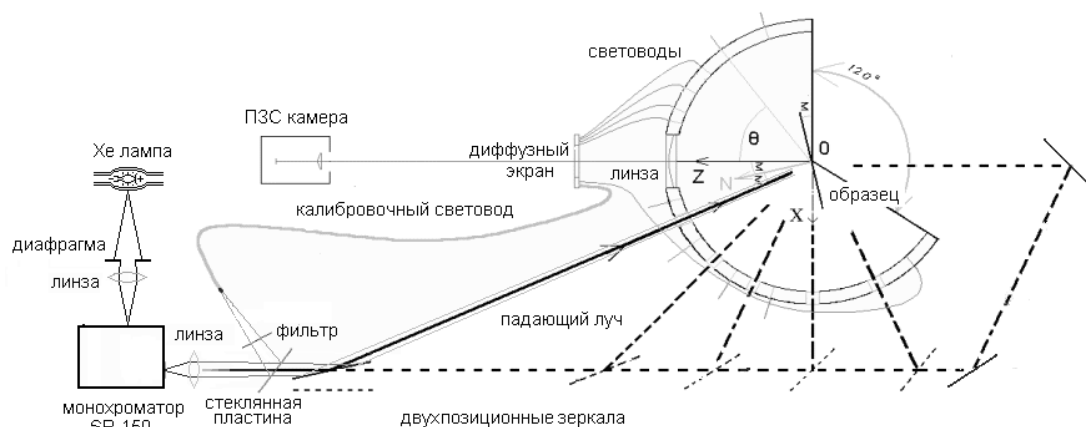


Рис. 6.1. Общая схема измерительной установки для определения светорассеивающих свойств реальных материалов.

7. Параллельные и многопоточные вычисления

Для вычисления глобальной освещенности и расчетов оптических систем используется трассировка лучей, основанная на методе Монте-Карло. Этот метод, как и любой другой стохастический подход, требует трассировки огромного количества лучей для достижения необходимой точности и качества результатов моделирования. Для иллюстрации можно привести следующий пример: моделирование устройства 1, показанного на рис. 4.1 (т.е. расчет пространственного и углового распределений яркости над выходной гранью устройства), с достаточной точностью требует расчета около миллиарда лучей. Обычный персональный компьютер справится с такой задачей в течение 2-4 недель. В реальной жизни такое время неприемлемо. Только применение распределенных вычислений, то есть использование вычислительных ресурсов группы компьютеров, объединенных в сеть, позволяет решить эту проблему за приемлемое время. Поэтому разрабатываемый программный комплекс был спроектирован таким образом, чтобы максимально эффективно использовать все вычислительные ресурсы, имеющиеся в наличии у пользователя, при решении вышеупомянутых задач [25].

Реализация как прямой, так и обратной трассировки лучей включает как многопоточные вычисления, которые позволяют использовать параллелизм многопроцессорных систем с общей памятью, так и распределенные вычисления на нескольких компьютерах, объединенных при помощи локальной сети. Параллельные вычисления реализованы для случая, когда каждому компьютеру доступна полная копия сцены.

Идея параллельной реализации алгоритма прямой трассировки лучей основана на независимости вычисления траекторий отдельных фотонов. Каждый процесс

трассирует большое количество лучей и накапливает результаты для элементов наблюдения (см. разд. 4.1) в буферах; содержимое буферов передается процессу-мастеру, который аккумулирует результаты. Этот подход обеспечивает высокую эффективность параллельных расчетов.

Алгоритм параллельной реализации обратной трассировки лучей основан на том, что значения светимости отдельных пикселей вычисляются независимо. Экран адаптивно разделяется на несколько непересекающихся регионов, так, чтобы обеспечивалась равномерная загрузка процессоров. Каждый процессор выполняет трассировку для заданных регионов, исполняя последовательную версию алгоритма. Завершенные фрагменты изображения объединяются в итоговое изображение процессом-мастером. Возможная неравномерная загрузка процессоров, возникающая из-за разницы в вычислительной сложности, ассоциируемой с различными областями изображения, устраняется динамическим распределением заданий процессором-мастером.

В терминах параллельного программирования реализуемый подход относится к стратегии управления заданиями. В компьютерной графике его называют пространственным разбиением экрана. Ускорение для этого типа параллельной реализации близко к линейному, так как возможные накладные расходы минимальны. Поскольку сам алгоритм обратной трассировки лучей остается последовательным, рассматриваемое решение принадлежит к классу линейно-параллельных алгоритмов.

8. Реконструкция архитектурных объектов по фотографиям

Еще одним направлением работ в Институте, тесно связанным с машинной графикой, явились исследования методов реконструкции искусственной реальности. Были разработаны алгоритмы и методы и была построена система, позволяющая реконструировать трехмерные пространственные модели объектов сложной формы (прежде всего архитектурных объектов) на основе их фотографий или видеоснимков [26, 27]. С помощью такой системы можно калибровать фотокамеры, определять параметры моделей (например, реальные размеры зданий и их элементов), редактировать эти модели, использовать их в системах виртуальной реальности и т.д.

В частности, она позволяет производить «фотомонтаж», когда автоматически вычисляются положение и ориентация объектов в сцене, заданной фотоснимком, позиционирование камеры, условия освещения и т.д. Далее фотоизображение используется как фон, на котором размещается изображение другого, уже

виртуального, объекта, который отбрасывает «правильные» тени, на поверхности которого видны реалистичные блики, отражения других объектов сцены и т.п. Пример фотомонтажа показан на рис. 8.1. Компьютерная модель автомобиля здесь встроена в фотоизображение городского пейзажа.



Рис.8.1. Пример фотомонтажа, когда модель виртуального автомобиля встраивается в фотоизображение.

В дальнейшем работы, связанные с фотомонтажом, вылились в работы по построению HDRI сцен (см. п. 2.3).

9. Заключение

В статье приведен краткий очерк ранних работ по машинной графике, выполненных в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, обозначены основные направления исследований и разработок, проведенных отделом машинной графики Института за последнее десятилетие. В качестве главного направления было выбрано физически аккуратное моделирование распространения света в оптически сложных средах. Для генерации фотореалистичных изображений реализован подход на основе методов Монте-Карло и трассировки лучей. На базе той же технологии разработаны средства инженерного проектирования современных светопроводящих и осветительных систем и материалов, построенных на основе сложных взаимодействий света. Предложены методы физически аккуратного моделирования и визуализации оптически сложных материалов (современные автомобильные краски, ткани) в условиях искусственного и естественного освещения. Рассмотрены некоторые аспекты специфики зрительного восприятия человека, а также эффекты фотографических изображений. Подчеркнута особая важность проблемы, связанной с получением надежных и качественных

начальных данных для моделирования – спектральных светорассеивающих свойств материалов. С этой целью в Институте была построена оригинальная специализированная измерительная установка.

Вышеозначенные работы явились результатом сотрудничества большого коллектива специалистов. Значительная их часть упомянута в списке литературы как соавторов соответствующих конкретных работ. Кроме них хотелось бы отметить существенный вклад Д.Д.Жданова, В.В.Новосельского, В.Г.Гарбуля, В.Г.Соколова, С.В.Андреева, Е.Ю.Денисова, Н.Б.Дерябина, О.Л.Коновалова, Л.З.Шапиро, Г.В.Кирейко и ряда других.

Особую признательность авторы выражают А.Г.Волобою, который внимательно прочел рукопись статьи и сделал ряд весьма ценных замечаний.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ "Научная школа НШ-1689.2003.1".

Версию статьи с цветными рисунками можно найти по адресу
http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm

Литература

- [1] Sutherland I.E. SKETCHPAD: A man-machine graphical communication system. *SJCC*, 1963, Baltimore, MD, Spartan Books, p.329.
- [2] Штаркман В.С., Баяковский Ю.М. Машинная графика. *Препринт ИПМ АН СССР*, 1970.
- [3] Вершубский В.Ю. Подпрограммы для работы с дисплеем и для съемки кинофильмов. *Препринт ИПМ АН СССР*, № 62, 1971.
- [4] Охочимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И., Павловский В.Е., Ярошевский В.С. Алгоритмы управления движением шагающего аппарата. *Препринт ИПМ АН СССР*, № 63, 1972.
- [5] Козлов Н.Н., Сюняев Р.А., Энеев Т.М. Приливное взаимодействие галактик. *Доклады Академии Наук*, т. 204, № 3, с. 579-582, 1972.
- [6] Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. Графор. Графическое расширение фортрана. М.: Наука, 1985.
- [7] С.Б.Базаров, Ю.М.Баяковский, Ф.Ф.Сейдалиева, А.Ю.Скачков. Адаптация комплекса графических программ ГРАФОР в операционных системах WINDOWS и LINUX. *Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН*, № 27, 2002 г.
- [8] <http://www.graphicon.ru>
- [9] <http://www.integra.jp>

- [10] J. T. Kajiya. The rendering equation. *Computer Graphics* (SIGGRAPH '86 Proceedings), 1986, vol. 20, pp.143-150.
- [11] A.Khodulev, E.Kopylov Physically accurate lighting simulation in computer graphics software. Proc. *GraphiCon '96 - The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization*, St.Petersburg, 1996.
- [12] А.Г.Волобой, В.А.Галактионов, К.А.Дмитриев, Э.А.Копылов. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. "Программирование", № 5, 2004.
- [13] <http://www.iesna.org>
- [14] Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky. CIE DS 011.2/E:2002 Draft Standard. Official version. CIE TC 3-15. CIE Central Bureau, Vienna, Austria.
- [15] A.Watt, M.Watt, "Advanced Animation and Rendering Techniques. Theory and Practice", AddisonWesley, 1993.
- [16] Debevec, P. E., Malik, J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, AddisonWesley, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, 1997, pp. 369–378.
- [17] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов. Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей. "Программирование", № 5, 2004.
- [18] V.Vassiliev, A.Voloboy, N.Vyukova Context-Aided Visualization of Volumetric Data. Proc. of *GraphiCon '2004 - The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 2004.
- [19] S. Ershov, A.Khodulev, K.Kolchin. Simulation of sparkles in metallic paints. Proc. *GraphiCon '99 - The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 1999, pp.121-128.
- [20] S.Ershov, K.Kolchin, K.Myszkowski "Rendering Pearlescent Appearance Based on Paint-Composition Modelling". *Eurographics 2001 conf. proc.*, vol.20 (2001), number 3.
- [21] B. K.P. Horn, "Robot Vision", MIT Press and McGraw-Hill, Cambridge, MA, 1986.
(русский перевод: Хорн Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ.- М.:Мир, 1989.-487 с.,ил.)
- [22] V.Volevich, E.Kopylov, A.Khodulev, O.Karpenko An Approach to Cloth Synthesis and Visualization. Proc. *GraphiCon '97 - the 7-th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Visualization*, Moscow, 1997.
- [23] I.Bogaevski, E.Kopylov, A.Khodulev An Implicit Approach to Cloth Synthesis. Proc. *GraphiCon '99 - The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 1999.

- [24] Летунов А.А., Барладян Б.Х., Зуева Е.Ю., Вежнев В.П., Солдатов С.А. Прибор для измерения BDF на основе ПЗС-камеры для использования в компьютерной графике. Труды *Межд. конф. по компьютерной графике и машинному зрению – Графикон-99*, Москва, 1999, стр.129-135.
- [25] Применение распределенных вычислений для расчета сложных оптических систем. Многопоточные и распределенные вычисления в задачах вычисления глобальной освещенности. *Отчеты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН по проекту № 85/2001*.
- [26] B.Barladyan, E.Zueva, V.Galaktionov, A.Kargashin, E.Kugushev, E.Starostin. Computer Modeling of Real Scenes and Objects Based on Their Photographs. *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol.8, No.2, 1998.
- [27] I.Valiev 3D Reconstruction of Architectural Objects from Photos. *Proc. GraphiCon '99 - The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 1999.

Информация об авторах:

Баяковский Юрий Матвеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией компьютерной графики и мультимедиа при факультете ВМиК МГУ.

Галактионов Владимир Александрович - кандидат физико-математических наук, заведующий отделом машинной графики ИПМ им.М.В.Келдыша РАН.