

Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“
Факултет по Математика и Информатика
Катедра „Компютърни Системи“

Христо Илиянов Лесев

Модулни разширяеми системи за глобално осветяване

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд
за присъждане на образователната и научна степен „доктор“

в област на висше образование 4. Природни науки, математика и информатика
Професионално направление 4.6. Информатика и компютърни науки
докторска програма Информатика

Научен ръководител:
проф. д-р Снежана Гочева-Илиева

Пловдив, 2015 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедрения съвет на катедра „Компютърни системи“ на Факултета по математика и информатика при Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“ на 16.12.2014 г.

Дисертационният труд „Модулни разширяеми системи за глобално осветяване“ съдържа 169 страници. Библиографията включва 119 източника. Списъкът на авторските публикации се състои от 5 заглавия.

В автореферата номерацията на формулите, цитиранията и примерите съвпада с тяхната номерация в дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 17.03.2015 г. от 11:00 часа в Заседателната зала на Нова сграда на Пловдивския университет (бул. „България“ № 236).

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в секретариата на Факултета по математика и информатика на ПУ „Паисий Хилендарски“, (бул. „България“ № 236, Пловдив), каб. 330, всеки работен ден от 8:30 до 17:00ч.

Автор: **Христо Илианов Лесев**

Заглавие: **Модулни разширяеми системи за глобално осветяване**

Университетско издателство „Паисий Хилендарски“
Пловдив, 2015 г.

Съдържание

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	4
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	7
Глава 1 Обзор на съвременни системи за глобално осветяване	7
1.1 Основни понятия	7
1.2 Модели на светлината.....	8
1.3 Транспортно уравнение на светлината (The rendering equation).....	8
1.4 Класификация на алгоритмите за глобално осветяване.....	9
1.5 Обзор на съвременните АГО	9
1.6 Системи реализиращи АГО.....	10
Глава 2 Модел на МРСГО	11
2.1 Изисквания към системата.....	11
2.2 Модел на процеса за пресмятане на ГО	12
2.3 Модел на МРСГО	13
2.4 Събиране на статистика и анализ на работата на МРСГО	14
Глава 3 Архитектура и реализация на прототип на МРСГО.....	15
3.1 Архитектура на системата	15
3.2 Дизайн на прототипа.....	16
3.3 Подсистеми на МРСГО – Обектен модел	17
3.4 Реализиране на АГО със средствата на МРСГО	18
3.5 Подсистема за статистика и анализ.....	19
3.6 Реализация на прототип на МРСГО, документация, тестване	20
Глава 4 Приложения и резултати на разработената архитектура	20
4.1 Визуален редактор за конфигурации.....	20
4.2 Приложение за визуализиране на работата на АГО	21
4.3 Демонстрационна реализация на модулна разширяема система за глобално осветяване	21
4.4 Алгоритми за ГО, описани в контекста на МРСГО	22
4.5 Приложение в системи за моделиране	24
4.6 Приложение в обучението	24
4.7 Приложение за изследователски цели	24
4.8 Сравнение между прототипа на МРСГО и съвременните СГО	24
Глава 5 Заключение	25
БИБЛИОГРАФИЯ	27

Обща характеристика на дисертационния труд

Този дисертационен труд е посветен на архитектурата, дизайна, етапите на изграждане на една отворена, гъвкава, разпределена, модулна система за глобално осветяване, която представя алгоритмите за пресмятане на глобално осветяване като комбинация от преизползваеми модули. Разглежда се и прототипна реализация на модулна разширяема система за глобално осветяване, която представлява основна практическа програмна реализация на настоящата разработка.

Обект на изследването на този дисертационен труд са алгоритмите за пресмятане на глобално осветяване и системите реализиращи такива алгоритми.

Предмет на изследване са алгоритмите за пресмятане на глобално осветяване, техните градивни модули и приложението им за синтезиране на нови алгоритми за глобално осветяване.

Основната цел на този дисертационен труд е да се създаде модел и прототип на модулна, разширяема, гъвкава система за глобално осветяване.

В изследването се формулира и доказва следната **хипотеза**: възможен е общ подход за проектиране и реализация на система за глобално осветяване, която да позволи комбиниране на съществуващи и синтез на нови алгоритми за глобално осветяване, базирайки се на изследване на общите страни на алгоритмите и запазване на системата отворена за бъдещи разширения.

С помощта на този вид системи ще може да се изследват различни аспекти на съществуващите алгоритми за глобално осветяване, взаимовръзките между различни типове АГО, комбиниране на различни АГО с цел подобряване на бързината на работа и качеството на резултата, създаване на нови АГО. Като доказателство за възможността за изграждане на такива системи ще бъде изграден прототип на софтуерна рамка (framework), базиран на предложения модел и да бъде приложен за изследвания в областта на реалистичната компютърна графика.

Актуалност на проблематиката

Областта от компютърната графика, която се занимава с генерирането на реалистични изображения извървя дълъг път през последните четири десетилетия, започвайки от първите експерименти с чисто научна насоченост, до наши дни. Реалистичните изображения трансформираха индустрии като рекламата, филмопроизводството, компютърните игри и т.н. Възможността за визуализиране на сложни модели на сгради, машинни агрегати и др., преди да е започнал етапа на реализация, помага за редуциране на разходите и намаляване на процента на грешки при реализиране на проекта.

Математическият модел, на който стъпват всички алгоритми за глобално осветяване е известен от десетилетия и е добре изучен през годините [3]. Въпреки това, всяка година се появяват нови алгоритми за глобално осветяване и се инвестират огромни суми в изследвания на областта. Това е пряко следствие от факта, че проблемът за глобалното осветяване няма аналитично решение и допуска интерпретации с различна сложност и различен фокус на решението. Новите алгоритми целят да подобрят бързодействието на решението, крайното качество на изображението и степента на постигнатия реализъм.

Въпреки че съществува единен математически модел за описание на проблема за пресмятане на глобалното осветяване, все още не съществува общоприет информатичен подход за реализация на подобни алгоритми. Всяка реализация се ръководи от конкретните нужди на разработчиците и е обвързана с процесите, форматите за данни и детайлите на проекта, в който ще бъде използвана. Това често е продиктувано от желанието да се намали стойността на разработка и

резултатите да се приложат директно в следващия продукт на разработчика. За запазване на статуквото също допринася и фактът, че допреди десетина години единици бяха фирмите занимаващи се само с производството на софтуер за генериране на реалистични изображения, които не са част от филмовата или архитектурната индустрия.

През последните няколко години се забелязва една определена посока, поета от големите студия, за опити за уеднаквяване на информатичния модел, използван за реализиране на АГО [4]. Това е посока, която е близка до целите на настоящата дисертация, но въпреки това тези опити са първи стъпки на нещо, което ще се развива през следващото десетилетие.

Всичко казано дотук води до извода за актуалността на изследванията в областта на системите за глобално осветяване. Създаването и експериментирането със системи от този вид е много актуално и е със силна степен на приложимост в практиката.

Проблеми при съществуващите системи за глобално осветяване

Поради природата на задачата за пресмятане на глобалното осветяване съществуват много алгоритми за решаването ѝ, но не и универсален алгоритъм, който да дава желаните резултати във всяка ситуация. Всеки от съществуващите алгоритми дава добри резултати при определени видове сцени или части от сцени. Приложната област също влияе на избора на алгоритъм за глобално осветяване. Практиката е показала, че комбинирането на подходи от различни видове алгоритми за глобално осветяване дава по-добри резултати като качество на изображението и подобряване на бързодействието, отколкото използването на един вид алгоритъм. Възможността за лесно добавяне на нови алгоритми би увеличила възможните области на приложение на системата и нейната гъвкавост.

На практика съществуващите системи за глобално осветяване са обвързани с конкретен вид алгоритми и това поражда следните проблеми:

1. Добавянето на нов алгоритъм за глобално осветяване изисква промяна на компоненти от ядрото на системата;
2. Системата е затворена за разширение извън целите на създателите си;
3. Недостатъчна гъвкавост за приложение в различни области. Това съкращава жизнения цикъл на системата;
4. Системна архитектура, която е ориентирана или само за целите на практиката, или само за изследователски цели. Това поставя бариера между изследванията и внедряването им в практиката;
5. Обвързаност с конкретен вид хардуер и затруднена поддръжка на нови изпълнители;
6. Липса на инструменти за проследяване на работата на АГО, които да се възползват от визуалната природа на тези алгоритми.

Намирането на подход за решаване на описаните проблеми бе основен мотиватор на настоящото дисертационно изследване. Избраният подход е да се изследват съществуващите алгоритми за глобално осветяване и да се създаде модел на система, която се възползва от общите им черти, за да позволи комбинирането на решения от различни АГО. В предложения модел АГО са представени като съвкупност от взаимозаменяеми атомарни блокове.

Настоящата работа предлага решение на изброените по-горе проблеми чрез изграждане на модел на модулна разширяема система за глобално осветяване, при която процесът по генериране на изображение не е ограничен от изисквания за използване на конкретни библиотеки от инструменти, данни и формати. Дисертацията акцентира върху възможността за комбиниране на известни и синтезиране на нови подходи за пресмятане на глобалното осветяване, базирайки се върху концепцията за модулност и разширяемост на системата.

Задачи на дисертационния труд

За постигане на поставената цел на дисертационното изследване бяха планирани следните

четири основни задачи:

Задача 1. Да се направи обзор на областта на съвременните системи за глобално осветяване.

- 1.1. Да се направи обзор на съвременните системи за глобално осветяване;
- 1.2. Да се направи анализ и класификация на известните представители на алгоритми за глобално осветяване;
- 1.3. Да се направи анализ и класификация на съществуващите системи за глобално осветяване.

Задача 2. Да се създаде модел на модулна, разширяема система за глобално осветяване (МРСГО).

- 2.1. Да се дефинират изисквания към МРСГО;
- 2.2. Да се опише модел за комбиниране на алгоритми за глобално осветяване;
- 2.3. Да се предложи подход за анализ на работата на системи за глобално осветяване.

Задача 3. Да се проектира, реализира и тества прототип на софтуерна рамка за създаване на МРСГО.

- 3.1. Да се проектира архитектура на МРСГО, базирана на описания модел в точка 2;
- 3.2. Да се разработи прототип на МРСГО;
- 3.3. Да се опишат инструментите, които МРСГО предоставя.

Задача 4. Да се приложи в практиката разработеният прототип на МРСГО.

- 4.1. Да се разработят разширения, които да могат да се преизползват в различни реализации на алгоритми за глобално осветяване;
- 4.2. Да се реализират известни алгоритми за глобално осветяване, използвайки модулите на системата и създадените разширения;
- 4.3. Да се създаде връзка между разработения прототип и система за геометрично моделиране;
- 4.4. Да се използва създаденият прототип в обучението по компютърна графика и изследователска дейност.

Структура на дисертационния труд

В глава 1 е направен обзор на областта на системите и алгоритмите за глобално осветяване. Разгледани са основните типове съвременни системи за глобално осветяване и е направено сравнение и анализ на възможностите, предимствата и недостатъците на различните типове системи. Анализирани са популярни алгоритми за глобално осветяване и е направена категоризация.

В глава 2 са разгледани специфичните изисквания към модулна разширяема система за глобално осветяване (МРСГО). Описани са и са мотивирани решения, удовлетворяващи поставените изисквания. Разработен е модел на МРСГО.

В глава 3 са разгледани архитектурата и реализацията на прототип на МРСГО. Описани са различните области на системата, изграждащите я подсистеми и механизмите от всяка от подсистемите.

В глава 4 са описани приложенията на МРСГО. Описани са примери на АГО, реализирани със средствата на системата и изграждащите я модули.

В заключението е направено обобщение на архитектурата и реализираната система. Отбелязани са основните резултати и са представени възможности за бъдещо развитие.

Кратко съдържание на дисертационния труд

Глава 1 *Обзор на съвременни системи за глобално осветяване*

В тази глава е направен обзор на някои от най-важните алгоритми за глобално осветяване. Направен е анализ и класификация на различните видове алгоритми. Направен е анализ и сравнение на възможностите, предимствата и недостатъците на съвременните системи за генериране на изображения, използващи алгоритми за глобално осветяване. Целта е да се натрупат достатъчно знания в проблемната област и за съществуващите системи за глобално осветяване, за да се набележат свойства и характеристики, които са техни слаби или силни страни.

1.1 *Основни понятия*

Една от основните задачи в генеративната компютърна графика е получаване на визуално представяне на геометрични обекти във вид на графично изображение.

Деф. Визуализация: Визуализация е операция по преобразуването на представяния на (три-мерни) обекти във вид на графични изображения.

Изображението от своя страна е вид представяне на геометрична информация под формата на картина, която може да бъде възприета от човека.

Деф. Изображение: Изображение се нарича крайно множество от точки, всяка от които има определена визуализационна характеристика.

Една от целите на описваната модулна разширяема система за глобално осветяване е създаването на реалистични изображения.

Деф. Алгоритъм за създаване на реалистични изображения: Алгоритъм за визуализация, целящ получаване на изображение, с качество сравнимо с това на фотографска снимка.

Алгоритмите за визуализация могат да се разделят най-общо в два класа:

- Работещи в обектно пространство – типичен представител е алгоритъмът за разбиране на криволинейни повърхности предложен от Катмул (Catmull) [5];
- Работещи в пространството на изображението – представители за този клас са дълбочинният буфер [6] и трасирането на лъчи (Ray Tracing) [6].

Трасирането на лъчи е предпочитан избор за основа на алгоритми за глобално осветяване (АГО), тъй като идеята му на работа е взимствана от геометричната оптика, която представя светлината като насочен сноп лъчи. Алгоритъмът определя видимите повърхности като всеки лъч се трасира до първото му пресичане с границата на обект. За да се симулира разпространението на светлината в сцената трябва да се отчетат физическите характеристики на източниците на светлина и спецификата на материала на обектите от сцената.

Най-простият модел на осветяване е така нареченият **локален модел** - при пресмятане на отразената енергия се включват само трима участници: светлинният източник, точката от повърхността, чиито визуални характеристики пресмятаме и наблюдателят. **Глобалният модел** на осветяване разглежда и случаят, при който светлинните лъчи се отразяват няколкократно от други повърхности в сцената преди да достигнат наблюдателя.

Деф. Алгоритъм за глобално осветяване: представлява визуализационен алгоритъм за генериране на реалистични изображения, който пресмята взаимодействието на светлинна енергия с обектите от дадена тримерна сцена, базирайки се на физичен модел за разпространение на светлината. Комбинира директно падналата светлина и индиректно отразената светлинна енергия в сцената.

Ще използваме дефиницията за АГО, за да дадем по-формално определение за това какво е **система за глобално осветяване (СГО)**.

Деф. Система за глобално осветяване: Система за визуализация, която реализира поне един АГО.

1.2 Модели на светлината

Съществуват няколко популярни модела за описване на разпространението на светлината в пространството и взаимодействието ѝ с материята: квантова оптика, вълнова оптика и геометрична оптика. Най-широко използваният модел за представяне на светлината в компютърната графика е този на геометричната оптика. За пресмятане на взаимодействието на светлината с материята ще използваме следните модели [14]:

- **Функция на отражението (BRDF):** Функцията f_r ще наричаме функция на отражението или BRDF (bidirectional reflectance distribution function) [13], [15].

$$f_r(\vec{\omega}_i, \mathbf{x}, \vec{\omega}) = \frac{L(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i) \cos(\vec{n}_x, \vec{\omega}_i) d\vec{\omega}_i}$$

Функцията на отражението представлява съотношението на отразената яркост L в посока $\vec{\omega}$ към осветеността в точката $\mathbf{x}$, дошла от посока $\vec{\omega}_i$.

- **Пречупване:** Преминаването на светлинна енергия през прозрачен обект може да се моделира математически по подобие на функцията на отражението. И двете явления (отражение и пречупване на светлината) могат да се представят с една съставна функция f_{rt} , ако допуснем, че границата между двата обема е безкрайно тънка.

1.3 Транспортно уравнение на светлината (The rendering equation)

За решаване на задачата за глобалното са въведени следните изисквания: светлинната енергия се разпространява във вакуум, разпространението на светлинни частици в сцената е мигновено, следователно може да се счита, че и постигането на равновесно състояние не отнема физическо време. За всяка точка $\mathbf{x}$ принадлежаща на повърхност от обект в сцената и всяка посока $\vec{\omega}$ около тази точка, да се намери отразената от повърхността яркост $L(\mathbf{x}, \vec{\omega})$. Това формира следното уравнение:

$$L(\mathbf{x}, \vec{\omega}) = L_e(\mathbf{x}, \vec{\omega}) + \int_{\Omega_x} f_{rt}(\vec{\omega}_i, \mathbf{x}, \vec{\omega}) L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i) \cos(\vec{n}_x, \vec{\omega}_i) d\vec{\omega}_i$$

където $L_e(\mathbf{x}, \vec{\omega})$ е самостоятелно излъчената светлинна енергия от обекта в точката $\mathbf{x}$ (ако обектът притежава начална енергия) и се сумира заедно с яркостта $L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i)$, измерена във всички посоки $\vec{\omega}_i$ около $\mathbf{x}$, умножена по функцията на отражението f_{rt} .

Това уравнение е представено от **Каджия** (Kajiya) [3]. Всеки АГО се стреми да намери приближено решение на това уравнение, използвайки физическите характеристики, с които е описана сцената. Тяхната работа се базира на целеви апроксимации, целящи да намалят визуалната разлика с точното решение, което е аналитично непостижимо. Самото уравнение представлява

рекурсивен интеграл и следователно не съществува аналитично решение (освен при много опростени сцени), тъй като яркостта, която търсим присъства и от двете страни на уравнението.

Голяма част от съвременните АГО се базират на стохастични Монте Карло методи [25], [26], [27], [28]. Основната идея е да се изберат случайни светлинни лъчи, преминаващи през сцената, да се намерят пресечните им точки с обектите в сцената и да се пресметне яркостта в тези точки по посока на разпространение на лъчите. Един популярен подход за пресмятане на уравнението на Каджия е то да бъде разделено на няколко непокриващи се части [24], [4]. Функцията на отражението често е комбинация от два компонента: дифузен $f_{r,D}$ и идеално огледален $f_{r,S}$. Функцията на дифузията компонент се изменя плавно в цялата дефиниционна област, докато тази на идеално отразителния компонент често не е непрекъсната [15].

$$f_r(\vec{\omega}_i, \mathbf{x}, \vec{\omega}) = f_{r,D}(\vec{\omega}_i, \mathbf{x}, \vec{\omega}) + f_{r,S}(\vec{\omega}_i, \mathbf{x}, \vec{\omega})$$

Транспортното уравнение може да се представи като сума на енергията от светлинните източници директно попаднала в $\mathbf{x}$, индиректната светлинна енергия отразена/преминала от поне един огледален/прозрачен обект в сцената и индиректната светлинна енергия преминала през поне едно дифузно отражение.

1.4 Класификация на алгоритмите за глобално осветяване

Създаването на модел на система, имаща за цел реализирането на различни алгоритми за глобално осветяване изисква различните подходи за решаване на проблема да бъдат систематизирани и сравнени [34]. В дисертационния труд е предложена класификация на АГО, отчитаща общите елементи между различните видове осветителни алгоритми. Класификацията включва следните категории:

- **Точност на решението** – могат да бъдат точни (exact) и приближени (approximate);
- **Начална точка и посока на светлинните пътища** – могат да бъдат събиращи (gathering) и разпръскващи (shooting);
- **Област на действие** – могат да бъдат зависими от гледната точка (view-dependent) и независими от гледната точка (view-independent);
- **Запазване на данни** – могат да бъдат кеширащи (caching) и некеширащи (non caching);
- **Етапи на пресмятане** – могат да бъдат еднопасови (single pass) и многопасови (multi-pass).

Хибридни (hybrid) алгоритми са комбинация на различни типове от описаните дотук подходи. Главната цел на тези комбинации е да премахнат определени слабости в съществуващ алгоритъм, използвайки идеи и подход от друг АГО. Едно неудобство на хибридни АГО е, че комбинацията на два или повече алгоритъма обикновено трябва да се направи твърде конкретна и да се измени дизайнът на първоначалните алгоритми.

1.5 Обзор на съвременните АГО

В тази глава са разгледани някои важни класически и съвременни алгоритми за глобално осветяване. Описани са основната идея, техните предимства и недостатъци. Разгледани са следните АГО:

- Ray tracing [36];
- Path tracing [3];
- Bi-directional Path Tracing [40], [41];

- Irradiance caching [37], [38];
- Photon mapping [42], [24].

Сравнение и анализ на разгледаните алгоритми за глобално осветяване е дадено в Таблица 1. То е направено въз основа категориите от предложената класификация и поддържаните светлинни пътища.

Таблица 1 Сравнение на алгоритмите според направената класификация

N	Алгоритъм	Критерии					
		Точност	Посока	Област	Кеширане	Етапи	Видове Пътища
1	Ray tracing	точен	събиращ	зависим	некеширащ	еднопасов	LD?S*E
2	Path Tracing	точен	събиращ	зависим	некеширащ	еднопасов	L(S D)*E
3	Bi - directional Path Tracing	точен	хибриден	зависим	некеширащ	еднопасов	L(S D)*E
4	Irradiance caching	приближен	събиращ	зависим	кеширащ	хибриден	LD+S*E
5	Photon mapping	приближен	разпръскващ	независим	кеширащ	многопасов	L(S D)*E

Изводи: Прави впечатление, че са много малко алгоритмите, които могат да се определят като „чисти“ представители по всички критерии. Хибридните алгоритми стават все по-често срещани. Целта е в крайното решение да присъстват всички възможни светлинни пътища, за постигане на най-висока степен на реализъм.

1.6 Системи реализиращи АГО

Разгледани са някои близки до тематиката на дисертационния труд графични системи, реализиращи АГО (СГО):

- **PBRT** [15] - широко разпространена некомерсиална система за генериране на реалистични изображения с отворен код. Използва се като практически пример в обучението по компютърна графика;
- **Pixar RenderMan** [43] - широко използвана комерсиална система за генериране на реалистични изображения и филми. Процесът по генериране на изображението се изпълнява от комбинация програмни процедури наречени шейдъри (shaders);
- **Chaos Group V-Ray** [49] - комерсиална система за генериране на реалистични изображения. Визуализацията е базирана на алгоритъма за трасиране на лъчи. Системата предоставя мощен механизъм за разширяване на функционалността.

Анализ и сравнение на възможностите на разгледаните системи са дадени в Таблица 2. Използвани са следните означения: с „+“ – дадената възможност се поддържа от съответната система, с „-“ – съответната възможност не се поддържа от системата, с „~“ – означава частична поддръжка. **RayTracer** е прототипът на описваната в дисертацията МРСГО. Добавен е към таблицата само с цел сравнение с останалите системи.

Таблица 2 Сравнение на системите за глобално осветяване

N	Система	Възможности					
		Модулност на системата	Модулност на АГО	Визуално конфигуриране	Отделяне на данните	Гъвкав workflow	Преизползване на модулите на АГО
1	PBRT	+	-	-	+	-	-
2	Pixar Renderman	+	~	~	~	~	~
3	Chaos Group V-Ray	+	+	-	+	~	-
4	RayTracer	+	+	+	+	+	+

Изводи: От направените и представени в таблицата проучвания се вижда, че възможността пресмятането на глобалното осветяване като комбинация от различни АГО не е новост за съвременните системи за глобално осветяване, но там където това е възможно комбинациите се формират спрямо предварително фиксирани критерии, което силно ограничава модулността на АГО и възможността за тяхното преизползване.

Глава 2 Модел на МРСГО

В тази глава е разработен и описан модел на модулна разширяема система за глобално осветяване (МРСГО). При изготвяне на модела на модулна разширяема система за глобално осветяване е взето предвид проучването, направено в първа глава.

2.1 Изисквания към системата

Изхождайки от формулираната основна цел, след проведен анализ, МРСГО, трябва да притежават следните характеристики/свойства:

- **Модулност** – ясно структуриране на системата като съвкупност от подсистеми и възможност за гранулиране на функционалните модули на АГО и реализирането им като разширения;
- **Отвореност** – възможност за разширяване на системната функционалност в различни направления;
- **Гъвкавост** – възможност за лесна адаптация на системата към различни приложни области;
- **Разпределеност** – възможност за едновременна работа на части от системата на различни изпълнители;
- **Изчисления базирани на физични величини** – възможност за работа с модел на сцена, чиито характеристики са моделирани с физически коректни величини;
- **Точност** – точността на крайното решение да не бъде зависима от архитектурата на системата, а само от избора на АГО и неговите параметри;
- **Комбиниране на АГО** – възможност за съвместна работа на модули от различни АГО;
- **Събиране на статистика за работата на системата** – с цел динамичен анализ на системата и процесите протичащи в нея;
- **Изграждане от много разработчици** – осигуряване на добра структура на системата и слаба свързаност между подсистемите, документиране, ясна идеология за

разработка;

- **Без съществено значение на езика за програмиране и ОС** - архитектурата на системата не трябва да се обвързва с конкретни средства и технологии, зависещи от определена ОС или език за програмиране.

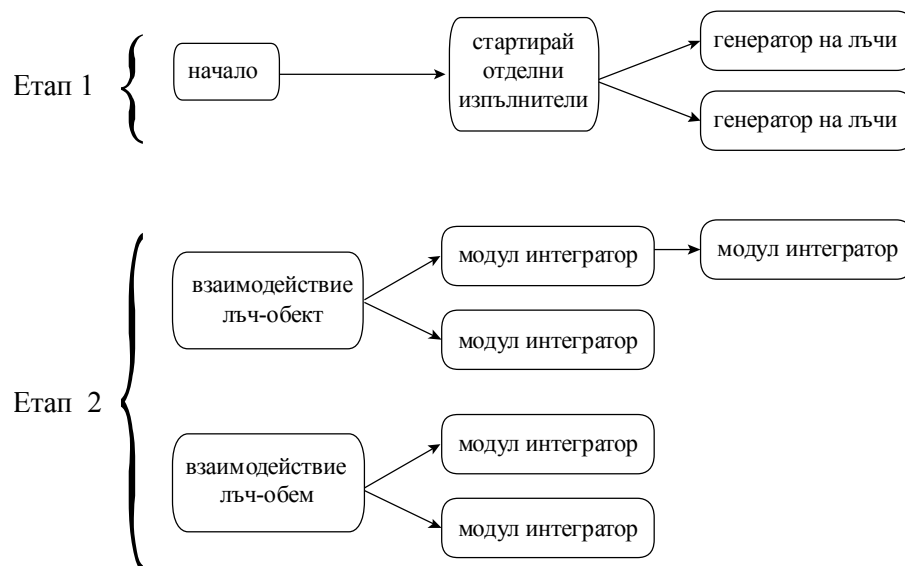
Моделът на МРСГО трябва да позволява системата да бъде използвана в различни направления, обхващащи следните цели: изследователски, учебни, приложни.

2.2 Модел на процеса за пресмятане на ГО

Представен е модел за реализирането на АГО като съвкупност от модули, които си комуникират помежду си в контекста на МРСГО. Критериите за това разделяне трябва да осигурят правилното обособяване на АГО на отделни функционални модули [34], [52]. Те са изведени на базата на класификацията на алгоритмите за глобално осветяване, направена в първа глава.

- Вида на настъпилото събитие при трасирането на лъча;
- Характеристиките на обекта, породил събитието (отражателните свойства на BRDF и др.);
- Текущия пас, на който работи алгоритъмът;
- Посоката на проследяване (от сензора, от светлинния източник);
- Дълбочината на светлинния път;
- Вида на предшестващите върхове от светлинния път;
- Допълнителни свойства, зададени чрез конфигурация.

Моделът на пресмятане на ГО, който е в основата на МРСГО може да се дефинира като процес съставен от два главни етапа, първи етап - генериране на първичния лъч от светлинния път и втори етап - определяне на настъпилите събития по продължение на изстреляния лъч и пресмятане на отразената по посока на лъча енергия (Фиг 1).



Фиг 1 Етапи на пресмятане на ГО – модулно представяне

Дисертационното изследване представя АГО като съвкупност от модули тип „черна кутия“. За да бъде една конфигурация от разширяващи модули валидна в контекста на МРСГО тя трябва да отговаря на следното условие: **дадено множество от свързани по между си модули трябва да отговаря на валиден светлинен път**. Задачите, изпълнявани от АГО модулите, най-общо могат да се сведат до следните области на действие:

- Генериране на лъч;
- Интегриране върху определена област на транспортното уравнение;
- Кеширане на данни;
- Управление на работния процес;

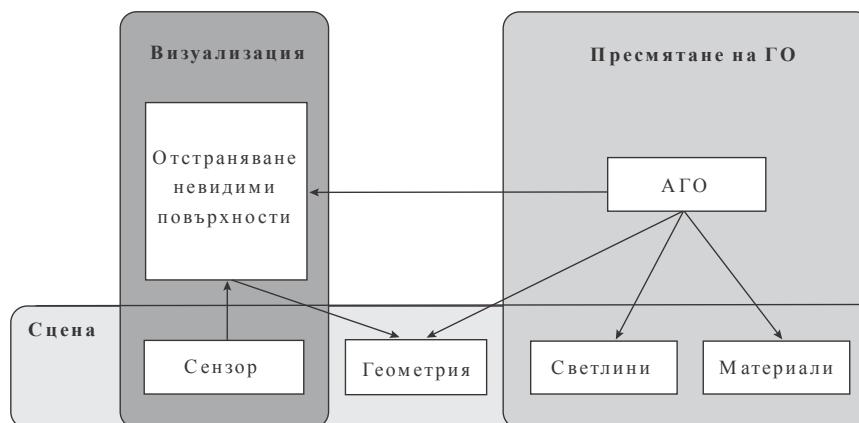
Описаният подход за моделиране на АГО като съвкупност от модули съответства на компонентна диаграма от UML (Unified Modeling Language) стандарта [53]. Това прави конфигурацията от разширяващи модули особено подходяща за визуално представяне под формата на диаграма.

2.3 Модел на МРСГО

Моделът на МРСГО е съставен от следните подсистеми:

- **Геометрична подсистема**—подсистемата описва геометричните обекти и обемите, от които е изградена пространствената сцена. Обектите се дефинират на база на техните характеристики и представяща схема;
- **Подсистема за отстраняване на невидимите повърхности**—отговаря за намирането на най-близката видима точка от повърхност или обем от друга точка в сцената. Тази подсистема позволява реализирането на други визуализационни алгоритми, различни от трасиране на лъчи;
- **Подсистема за светлинни източници**—описва характеристиките на тези обекти от сцената, които излъчват светлинна енергия;
- **Подсистема за материали**—отговаря за пресмятането на характеристиките на локално отразената светлинна енергия от точка в сцената или с други думи - отразителните свойства на повърхностите;
- **Подсистема за сензор**—отговаря за проектиране и представяне на светлинната енергия от сцената върху двумерно растерно изображение;
- **Подсистема за пресмятане на ГО**—в контекста на МРСГО тя представя АГО. Подсистемите за материали и светлини пресмятат локалния ефект на осветяване в дадена точка и си комуникират с подсистемата за пресмятане на ГО за постигане на ефекта на пълно глобално осветяване;
- **Подсистема сцена**—съдържа описанието на тримерната сцена. Чрез нея се определят конфигурацията и свойствата на примитивите изграждащи тримерната сцената;
- **Ядро**—съдържа инфраструктурата на МРСГО и позволява на останалите подсистеми да съществуват и работят в общ контекст. Тя е отговорна за регистрирането на разширения и за механизма за комуникация между различните модули.

Различните подсистеми могат да се групират в области, които обобщават отговорностите на подсистемите в процеса на генериране на изображение (Фиг 2).



Фиг 2 Функционални области на МРСГО

За осигуряване на правилното функциониране на МРСГО всеки модул (елемент) от системата трябва да укаже с кои други типове модули трябва да комуникира. Това е възможно да се реализира чрез дефинирането на обектен интерфейс (*interface*) за всеки тип системен модул. Структурата на системата на МРСГО позволява обособяването на **мрежи от модули**. Всяка мрежа представлява съвкупност от елементи на системата и техните отношения.

За да се осигури капсулацията на модулите моделът на МРСГО предлага механизъм за комуникация между входовете и изходите на различните модули. Работата на този механизъм е пряко свързан с отвореността на системата. Механизмът представлява **контекст**, в който се съхранява резултата от работата на модулите на АГО. Моделът на разглеждания контекст може да се дефинира чрез използването на компонентно базиран модел (Entity-component-system) [54]. Това ще позволи разширяване на поведението на контекста, без да го ограничава или да добавя допълнителни зависимости.

За постигане на **гъвкавост** и **разпределеност** моделът включва **механизъм за управление на работния процес**. В него се включват функционалното отделяне на етапите на пресмятане на разпространението на светлинните пътища в отделни пасове, осигуряване паралелната работа на АГО модули в рамките на една компютърна система или върху различни **отдалечени изпълнители**, синхронизация между едновременно протичащите изчисления и осигуряване на възможност за коректното им комбиниране. Друга съществена роля на механизма за управление на работния процес е **реализиране на стратегия** при разклоняване на работния процес.

2.4 Събиране на статистика и анализ на работата на МРСГО

За улесняване на разработчиците и крайните потребители на МРСГО, системата предлага механизъм за събиране на данни и статистика за работата на системата и отделните модули. Събраните данни се съхраняват във формат, който позволява съхранението на произволен брой характеристики за всяка стъпка от изследвания модул или алгоритъм и притежава възможност за дефиниране на взаимовръзки между данните [58]. Подсистемата за събиране на статистика и анализ притежава следните характеристики:

- Събира данни за изпълнението и работата на АГО и системата;
- Предоставя механизми за търсене и филтриране на събраните данни;
- Визуализира данните в съответната приложната област, към която се отнасят.

За да е възможно извършването на какъвто и да е анализ върху събраните данни трябва да се извърши филтриране на пакетите, за да може анализът да се фокусира само върху важните за

него участъци. Дадена е формална дефиниция за това какво ще разбираме под филтър. Дефинирана и останалите основни понятия в тази подсистема.

Нека $G = (N, E)$; $N = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, $E \subseteq N \times N = \{e_i \in N \times N \mid \forall i = 1..k\}$,

където G е мултиграф с множество на върховете N с елементи g_i , представящи пакети данни. Ребрата на графа (означени като множеството E) определят релациите между различните пакети. За описване на дървото на лъчите ще използваме релацията родител-дете между два пакета (пакет-родител е породил пакет-дете - ParentID-ID).

Деф. Активно Множество (Active Set) представлява подмножество на множеството от върхове в G . Елементите съставлящи активно множество може и да не бъдат свързани с ребра от мултиграфа. Активните множества определят кои данни ще бъдат визуализирани по време на фазата на анализ.

Деф. Активен Път (Active Path) представлява наредено активно множество, съставено от върхове принадлежащи на G . Активният път представлява поредица от свързани пакети данни. Най-честата релация между елементите на активния път е между атрибутите ParentID-ID, която представя свързаността между лъчите в един светлинен път.

Нека $R_0 = (G, P_0) = \emptyset$, $R_1 = (G, P_1) = \{(g_{i_1}) \in N \mid P_1(g_{i_1})\} \cup R_0$,

$R_2 = (G, P_2) = \{(g_{i_1}, g_{i_2}) \in N^2 \mid P_2(g_{i_1}, g_{i_2})\} \cup R_1, \dots$,

$R_j = (G, P_j) = \{(g_{i_1}, g_{i_2}, \dots, g_{i_j}) \in N^j \mid P_j(g_{i_1}, g_{i_2}, \dots, g_{i_j})\} \cup R_{j-1}, \dots$,

където R е релация между върхове в мултиграфа G , зададени чрез предикат P .

Деф. Филтър (Filter) представлява предикат, дефиниращ активен път или активно множество от елементите на G . Релациите R_j определят множество от активни пътища с дължина по-малка или равна на j в мултиграфа G , определени от филтъра P_j .

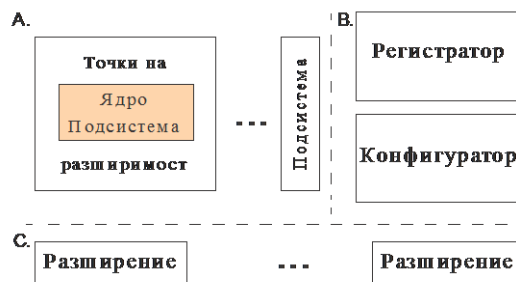
Една от целите на МРСГО при анализа на събраните данни за работата на АГО е да ги визуализира в контекста на проблемната област на алгоритъма. Опити за подобен анализ и визуализиране на данни според областта на приложение не са новост и могат да се видят в [62], [63] и [64]. В описвания модел се стремим да надградим върху основата на съществуващите инструменти за визуализация на данни и да се фокусираме върху проблемите, които поставят графичните приложения и по-конкретно системите за глобално осветяване.

Глава 3 Архитектура и реализация на прототип на МРСГО

В трета глава на дисертационния труд се описва архитектурата, проектирането на обектно-ориентиран дизайн и реализация на прототип на софтуерна рамка RayTracer за изграждане на модулни разширяеми системи за глобално осветяване.

3.1 Архитектура на системата

Общата схема на системата е представена на Фиг 3.



Фиг 3 Обща схема на МРСГО

Системната архитектура е разделена на три основни групи. Група А, съдържа множеството на подсистемите на МРСГО. Всяка подсистема е дефинирана от ядро и точки на разширимост. Група В управлява разширимостта на системата, като позволява регистрацията на нови разширения и тяхното конфигуриране. Група С представя множеството от всички налични разширения на системата.

3.2 Дизайн на прототипа

Дизайнът на прототипа на системата ще бъде извършен, следвайки целите, модела и архитектурата на МРСГО. Предложеният дизайн ще се възползва от добрите практики в съвременното обектноориентирано програмиране.

3.2.1 Ядро

За постигане на по-голяма гъвкавост, която е основно изискване, заложено в модела на МРСГО, ще разделим системното ядро на две части - абстрактно ядро и реализационно ядро. Абстрактното ядро на системата се състои от елементите в група В от Фиг 3 и интерфейсите на подсистемите от група А. Реализационното ядро (или само ядро) представлява конкретната реализация на тези елементи като части от нея могат да бъдат включени дори в елементите, разширяващи системата (група С). Основните модули, които трябва да бъдат видими за приложението са стартовият модул на системата, регистраторът на разширения и модулът за конфигурация. Стартовият модул на системата е отговорен за стартирането и инициализацията на системата като логиката, която изпълнява може да варира в зависимост от областта на приложение на МРСГО. Негова отговорност е създаването и инициализацията на останалите компоненти от ядрото, включително и тези от група В, които ще конфигурират приложението.

3.2.2 Разширяващи модули (plugins)

Разширяващите модули са основният компонент за постигане на желаните характеристики отвореност и лесна разширимост на МРСГО. Концепцията за разширяващ модул в МРСГО е изградена от две части:

- **Точка на разширимост** – формализирано описание на функционалните изисквания на дадена подсистема;
- **Разширение** – реализация на функционалност, удовлетворяваща изискванията на поне една точка на разширимост от системата.

Точката на разширимост представлява аналог на обектните интерфейси (interface) в ООП [67]. Всяка подсистема от МРСГО може да дефинира собствен набор от точки на разширимост. **Разширение** на системата представлява конкретна реализация на протокола, дефиниран от една или няколко точки за разширение. Ако следваме ООП парадигмата аналогът на разширението е

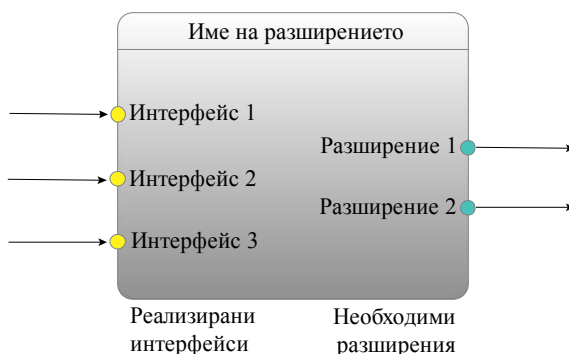
клас (class), който реализира набор от интерфейси (interface). Интерфейсите, които дадено разширение (plugin) реализира определят функционалността и формата на данните, с които то ще работи.

3.2.3 Конфигурация

В една децентрализирана, слабо свързана система, изградена от модули, една от основните цели на конфигуриращата подсистема е да дефинира и настрои връзките между модулите на системата. В дисертацията са разгледани различни подходи и формати за описване на конфигурация. При реализацията на МРСГО ще се фокусираме върху йерархично изградена конфигурация, зададена чрез скрипт.

При реализиране на динамично заредена конфигурация разширяващите модули на МРСГО представляват assembly, съдържащи интерфейси и класове. При стартирането на системата се активира **модул регистратор**, който обхожда наличните assembly файлове и открива наличните в тях разширения и точки на разширение (чрез използване на добавената към модула метайнформация). На този етап разширенията биват заредени и включени към системата. Следващият етап е създаване на необходимия брой инстанции от заредените разширения и установяване на връзки между тях. За това отговаря **модул конфигуратор**. Следвайки зададена конфигурация, този модул настройва разширенията за конкретно приложение. Релациите между модулите на системата могат да формират граф. В реализацията на МРСГО конфигураторът построява граф на зависимостите на разширяващите модули, включени в конфигурацията и ги свързва в правилен ред.

Състемната архитектура на МРСГО предлага възможност за изграждане на визуална конфигурация. В реализацията на визуална конфигурация в МРСГО е приет подход подобен на избрани за представяне на компонентни диаграми в UML [53]. На Фиг 4 е изобразено визуално представяне на едно разширение.

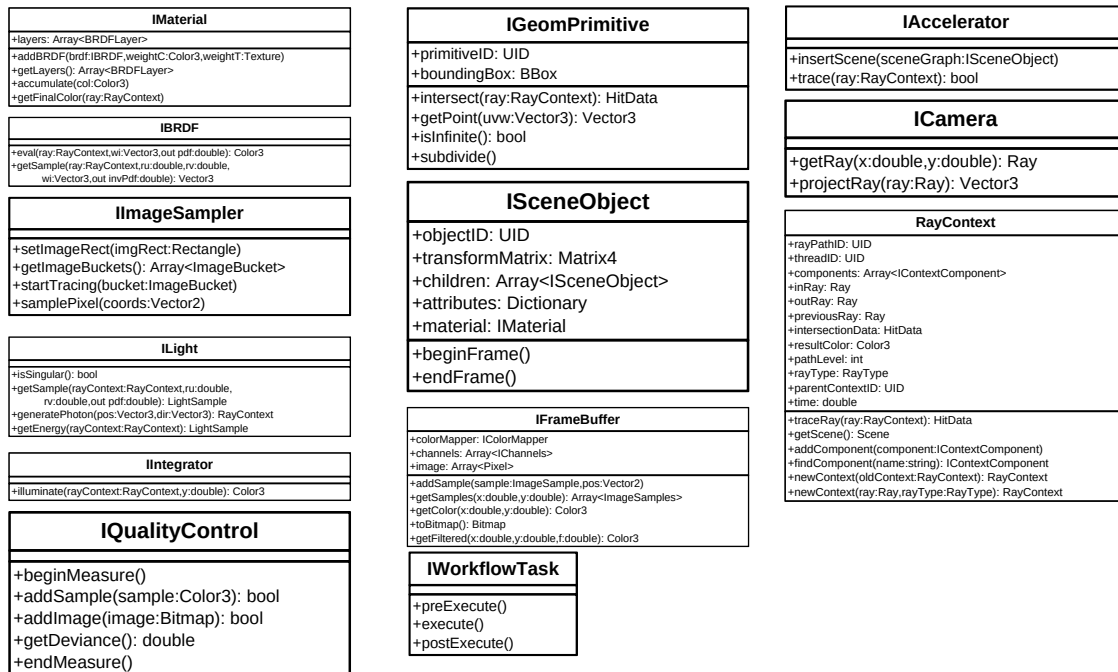


Фиг 4 Визуално представяне на разширение

В реализацията на МРСГО ще разглеждаме визуалната конфигурация като диаграма, изобразяваща разширенията, които участват в конфигурацията и връзките между тях. Връзките между разширенията дефинират, предлаганата от един възел функционалност, от която друг възел се нуждае [74].

3.3 Подсистеми на МРСГО – Обектен модел

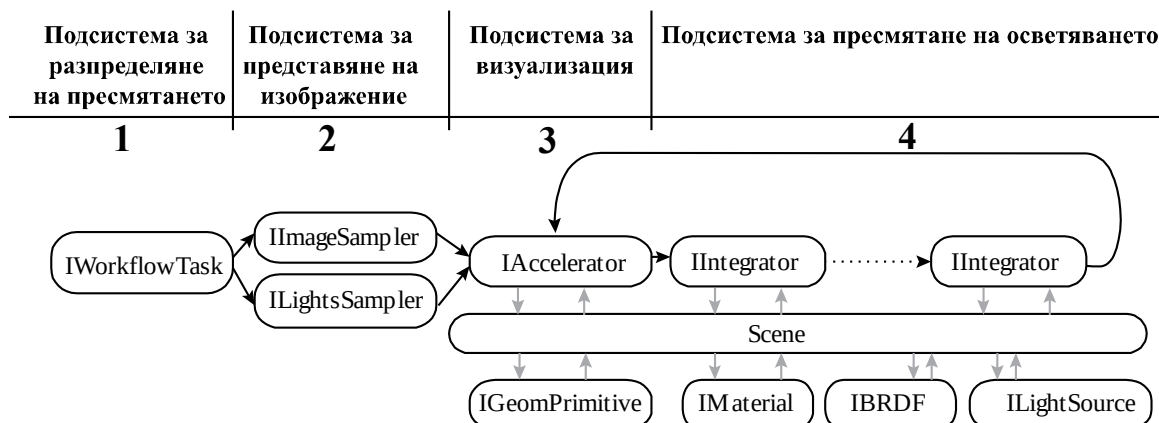
В настоящата глава се описва на подробен интерфейс на всяка от подсистемите, дефиниран от гледна точка на алгоритмите от проблемната област, която подсистемата обхваща. Фиг 4 показва базовите интерфейси, включени в прототипната реализация.



Фиг 5 Обектен модел на MPCGO

3.4 Реализиране на АГО със средствата на MPCGO

В главата се разглежда реализирането на представения концептуален модел на етапите от реализацията на АГО в контекста на избраната архитектура на системата. На Фиг 6 графично са изобразени четирите етапа и областта на отговорност на всяка подсистема.

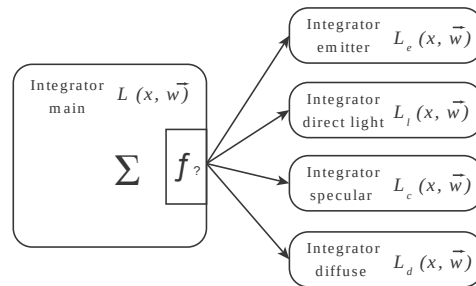


Фиг 6 Етапи от пресмятането на АГО в контекста на MPCGO

За реализиране на АГО са необходими **три основни типа модули**: модул генератор на първични лъчи, модул интегратор, модул за контрол на изпълнението. В реализацията на MPCGO първични лъчи могат да бъдат генерирани от наблюдателя през изображението или от светлинен източник. Лъчите, които се генерират при пресмятане на осветеност на точка от сцената, се генерират от интегратор. Модулът интегратор пресмята един израз от текущата итерация на транспортното уравнение. Модулът за контрол на изпълнението осигурява нужната гъвкавост при разпределянето на изразите като независими задачи в системата и тяхното комбиниране. Интегриращите модули се комбинират в **граф от интегратори**, които пресмятат глобалното осветяване в точка от сцената. Примерен граф от интегратори за уравнението

$$L(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + L_l(x, \vec{\omega}) + L_c(x, \vec{\omega}) + L_d(x, \vec{\omega})$$

е видим на Фиг 7.



Фиг 7 Граф от интегратори

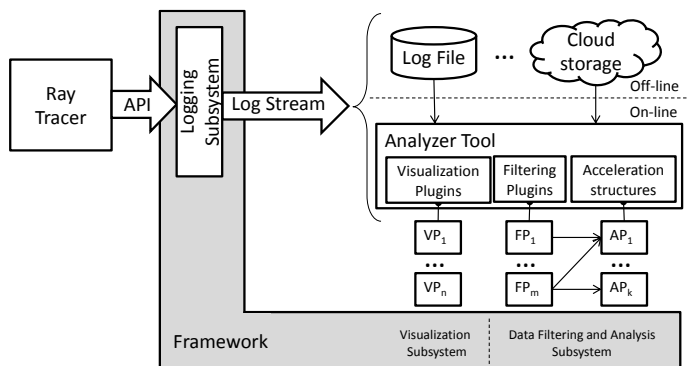
Родителският възел **Integrator main** определя кой от подинтеграторите да се активира на база отразителните свойства на активния слой на материала в точката x и сумира техния резултат, за да изчисли текущата итерация на АГО върху транспортното уравнение. Всеки АГО работи върху различен апроксимиран модел на транспортното уравнение, изграден от различни изрази. Всеки от тези изрази пресмята определено събитие, настъпило по пътя на светлинния лъч. В МРСГО е възприет разширен модел, близък до нотацията, използвана в Open Shading Language [33].

3.5 Подсистема за статистика и анализ

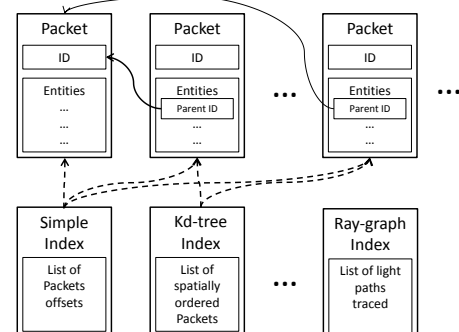
Отговорностите на подсистемата покриват следните три области:

- Събиране и съхранение на данни за изпълнението и работата на АГО и системата;
- Търсене и филтриране на събраните данни;
- Визуализиране на данните в приложната област, към която се отнасят.

Всяка от трите области дефинира автономна подсистема, която може да се изгради на модулен принцип, както е изобразено на Фиг 8.



Фиг 8 Архитектура на подсистемата за статистика и анализ



Фиг 9 Пакети от данни

За събиране на данни от МРСГО е реализиран програмно-приложен интерфейс (API), който кореспондира с избраната архитектура на системата. Потокът на данните се състои от множество пакети, всеки от които има различна дължина. Всеки пакет представлява контейнер на множество обекти от тип ключ-стойност. Всеки от обектите е атомарен и може да съдържа част от състоянието на системата в даден момент. Освен контейнера за обекти, всеки пакет притежава заглавна част (header) и тяло (body) Фиг 9.

За да се улесни процесът по намиране на специфична информация, модулът за филтриране на данни използва пакети индекси, които са пряко обвързани с проблемната област на МРСГО. Филтрирането на данните е реализирано според модела на МРСГО. В реализацията са използвани

филтри предикати, които работят върху отделните атрибути на пакет и комбинация от предикати за конструиране на по-сложни филтри [58].

3.6 Реализация на прототип на МРСГО, документация, тестване

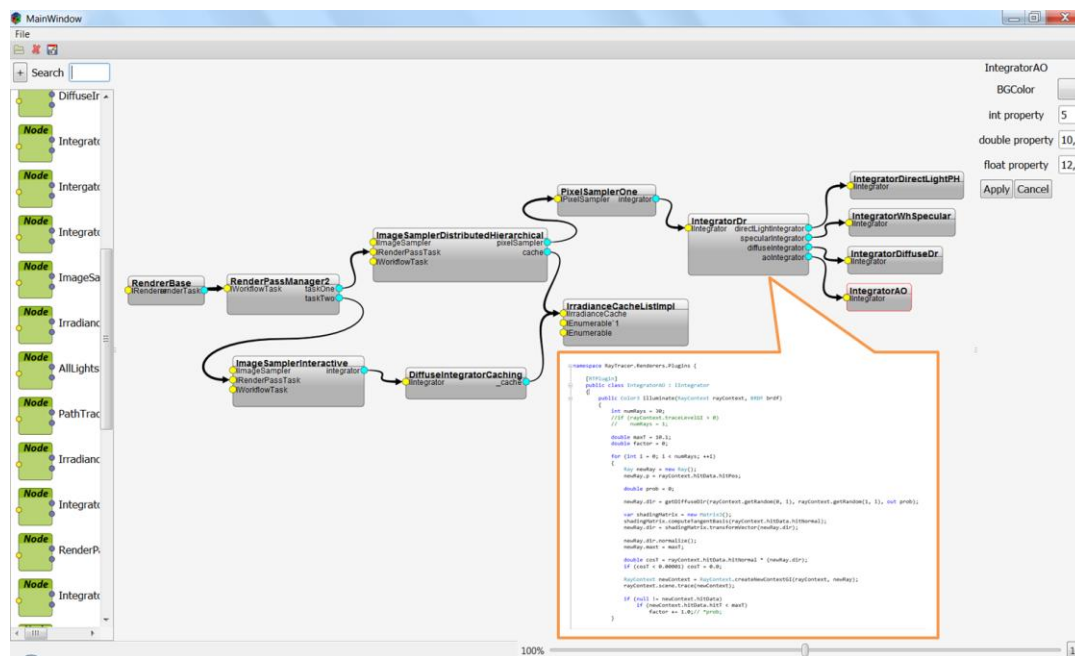
Практическата реализация на прототипа на МРСГО е извършена на C# и C++. За да се удовлетвори поставеното изискване за многоплатформеност, изборът на платформа за изпълнение на C# се сведе до Mono [104], а използваният C++ компилатор до gsc [105]. Системата е подробно документирана. При разработката на МРСГО беше използвана автоматизираната система за тестове NUnit. Това включва разработването на редица тестови случаи за всеки метод и клас като цяло. Поради стохастичната природа на АГО резултатите от работата на МРСГО е възможно да варират в определени граници между различните стартирания на системата. Това е отчетено при разработката на инструментариума от тестови случаи.

Глава 4 Приложения и резултати на разработената архитектура

В тази глава са описани приложенията на МРСГО при създаването на конкретна СГО и реализирането на различни АГО. Разглеждат се реализации на инструменти за подобряване на потребителската комуникация със системата. Дават се примери за гъвкавостта на МРСГО и приложението ѝ в различни проблемни области. Те показват приложимостта на разработения модел на МРСГО и неговите предимства.

4.1 Визуален редактор за конфигурации

Реализиран е визуален редактор за конфигурации адресира разширяемостта на модела на системата и възможността за комбиниране на АГО. Снимка от графичния интерфейс на приложението е представена на Фиг 10.



Фиг 10 Визуален редактор за конфигурации

Приложението реализира предложения в предишната глава подход за представяне на разширяващите модули на МРСГО. Приложението позволява да се издърпват модули от библиотеката върху работното поле и да се създават връзки между тях чрез издърпване на изходна точка от един модул върху входна точка на друг модул и обратно. По време на процеса по създаване на връзка приложението проверява интерфейсите, които всяка входно-изходна точка реализира и позволява

свързване само на съвместими интерфейси в системата. Разработени са визуални подсказки за потребителя, които показват съвместимостта на избраните точки.

4.2 Приложение за визуализиране на работата на АГО

За анализиране на събраните данни от подсистемата за статистика и анализ е разработено приложение-инструмент като допълнение към системата, който визуализира пакетите от данни в контекста на сцената [58]. Приложението реализира интерактивен графичен интерфейс, който визуализира сцената, светлинните пътища и позволява филтриране на потока от пакети. Данните за геометрията на сцената, светлинните източници и материалите се извлича от пакетите с метаданни в потока. Приложението предлага на потребителя възможност за избор на параметри, чрез елементи за множествена селекция, слайдери за контролиране на времевите параметри на пакетите, редактор на изрази и полета за описване на регулярни изрази.

4.3 Демонстрационна реализация на модулна разширяема система за глобално осветяване

На базата на предложената архитектура на МРСГО е създадена демонстрационна система за генериране на реалистични изображения. Реализацията на демонстрационната система използва целия набор от средства, предоставени от МРСГО – ядрото и основните му разширяващи модули, както и допълнително реализирани модули, удовлетворяващи специфични изисквания на АГО.

За да се удовлетвори изискването за работа с физически коректни материали, в демонстрационната система са реализирани: универсален материал, изграден от слоеве [109], [110], модел на Phong [16], модел на Ward [20], модел на Blinn [17] и модел на Ashikhmin-Shirley [22]. За реализиране на светлинните източници е реализирано семплиране със запазване на площта [111]. Ядрото на системата и АГО модулите са реализирани на C#, към системата е добавен външен модул за визуализация Intel Embree [112], реализиран на C++. Реализирането на АГО и конфигурирането на системата се извършва с помощта на приложението за визуална конфигурация, описано в точка 4.1.

Поредността на активиране на интеграторите, които участват в конфигурацията се задава чрез логически изрази на C#. Изразите се запазват в началния възел от графа на интеграторите и се компилират до изпълним код преди стартиране на системата. Освен стандартните оператори на езика в изразите участват и няколко специално проектирани функции, които реализират функционалността за определяне на събитията в пътя на светлинния лъч. Реализираните в демонстрационната система функции включват:

- *pass(passName)* – бинарна функция, връща *true*, ако името на текущия пас съвпада с това в *passName*, иначе връща *false*;
- *last(<ES>)* – бинарна функция, проверява дали последното събитие в пътя отговаря на наредената двойка <събитие, тип разпръскване>;
- *count(<ES>)* – връща число, броя на настъпилите събития от вида <ES> в целия път на лъча;
- *exists(<ES>)* – бинарна функция, проверява за наличието на събитие от вида <ES>;
- *depth* – връща текущата дължина на пътя (в брой събития).

4.4 Алгоритми за ГО, описани в контекста на МРСГО

В тази точка са представени реализациите на няколко от най-използваните АГО в реалистичната компютърна графика. Изборът на алгоритми е направен така, че да обхване всички типове на класификацията на АГО. Всеки от алгоритмите ще бъде представен като конфигурация от разширяващи модули на МРСГО. Избраните примери целят да демонстрират възможността за конструиране на различни алгоритми чрез използване на еднакви модули.

Модулите, които присъстват във всяка конфигурация на АГО са:

- Модул *Start* – това е модулът, който зарежда системата;
- Модул *RenderBase* – основен управляващ модул, позволява разпределянето на задачи в системата;
- Модул *Surface* – активира се, когато има съприкосновение между светлинен лъч и повърхността на обект от сцената. Стартира процеса на интегриране;
- Модул *IntegratorMainUber* – първият възел в графа на интеграторите. В него се съдържа конфигурацията на поредността на активиране на свързаните с него модули.

Разгледани са конфигурации на алгоритмите:

- Visibility ray tracing
- Path tracing
- Irradiance caching
- View-independent irradiance map
- Photon mapping
- Photon mapping with Final Gathering

4.4.1 View-independent irradiance map

Този АГО представлява авторска модификация на *Irradiance caching* АГО, описана в [116]. Целта на модификацията е алгоритъмът да се превърне в независим от гледната точка и да се запазят добрите характеристики на оригиналния АГО.

Според класификацията, направена в първа глава, той е приближен, събиращ, независим от гледната точка, кеширащ, хибриден алгоритъм. Конфигурацията му е показана на Фиг 11.

Основната идея на този АГО е освен пресмятането на осветеността в определени точки, принадлежащи на повърхностите в сцената, да се добави допълнителна, обемна кеш структура, която съхранява осветеността в определени точки от пространството на сцената. Всяка от тези точки ще запази информация за светлинната енергия, идваща от всички посоки на ограждащата я сфера. По време на финалния пас осветеността на междинните точки в сцената ще се интерполира от съхранените данни в кеша, като се взема предвид посоката на нормалата на точката. Тъй като кеширането се извършва в точки от целия обем на сцената и съхранената информация обхваща всички посоки около точките в кеша, той може да бъде използван и след промяна на гледната точка на наблюдателя, без да се изисква преизчисляване на кешираните данни.

Конфигурацията на *View-independent irradiance map* АГО е почти идентична с тази на *Irradiance caching* АГО.

4.5 Приложение в системи за моделиране

Като част от експериментите, разглеждани в дисертационния труд е реализирана връзка между демонстрационната реализация на МРСГО и моделиращата система Blender [118]. Това демонстрира гъвкавостта на системата, описана в дисертационния труд. Връзката между двете системи е реализирана чрез експортиращ модул, който трансформира описанието на сцената във формата на МРСГО и стартира процеса по пресмятане на АГО.

4.6 Приложение в обучението

Описаният прототип на МРСГО е използван в обучението по време на занятията на избираемата дисциплина „Raytracing – фотореалистични изображения“, провеждана във ФМИ на ПУ „Паисий Хилендарски“. Модулността на МРСГО помага на обучаваните да се концентрират само върху даден вид модул и го разширяват с все повече компоненти. Слабата свързаност поощрява екипната работа и води до постигане на по-сложни визуални резултати при студенти с изявен интерес към компютърната графика. Приложенията на МРСГО в обучението включват използване на системата за онагледяване на учебен материал от различни дялове на информатиката и математиката. В [2] са посочени някои конкретни учебни дисциплини, които могат да се възползват от приложенията на МРСГО.

4.7 Приложение за изследователски цели

Областта на реалистичната компютърна графика е сравнително добре проучена, но съществуват множество неизследвани проблеми или такива с не достатъчно добри решения. Решение на основните положения на проблема за комбиниране и конструиране на различни АГО е разгледано в трета и втора глава, а извършените експерименти за комбиниране на АГО могат да бъдат видени в глава четири. Това показва, че МРСГО може и се използва за изследователски цели. Приложимостта ѝ при изследване на АГО беше доказана на практика.

4.8 Сравнение между прототипа на МРСГО и съвременните СГО

Поради невъзможността да сравним графичните системи за реализация на АГО количествено, сравнението е направено на базата на дейностите, необходими за разширяване или приспособяване на всяка система. Експериментът ще сравнява отвореността, разширяемостта, удобството и бързината за реализиране на АГО в контекста на разгледаните в глава първа системи и МРСГО. Като критерий за сравнение ще служи броя на задачите, които трябва да се извършат от външен разработчик, за да се добави следната функционалност към системата:

- Реализиране на АГО - View-independent irradiance map;
- Разширяване на реализирания АГО, за да може да се изпълни на специализиран видео хардуер (GPGPU).

При изпълнението на всяка отделна задача е измерено средно време за работа върху кода на задачата и интегрирането ѝ към системата. В експеримента се разглеждат системите PBRT, Pixar Renderman, ChaosGroup V-Ray и прототипът на МРСГО RayTracer. Алгоритъмът View-independent irradiance map е избран поради факта, че е модификация на АГО - Irradiance map, който е наличен и в четирите СГО.

Таблица 3 Обобщение на сравнението между СГО

	PBRT	ChaosGroup V-Ray	Pixar Renderman	МРСГО RayTracer
Реализиране на АГО - View-independent irradiance map	11.3 часа	10 часа	9.5 часа	3.3 часа
Реализация на АГО за GPGPU	не е въз- можно	не е въз- можно	не е въз- можно	3 часа
Общ брой дейности	4	5	4	3
Общо време за разработка	11.3 часа	10 часа	9.5 часа	6.5 часа

От обобщените резултати в Таблица 3 Обобщение на сравнението между СГО е видимо, че предложеният в дисертационния труд модел на МРСГО предлага по-голяма степен на отвореност, гъвкавост и разширяемост от разгледаните представители на съвременните СГО. Времето за разработка на нов АГО и добавянето му към системата е с около 1/3 по малко при МРСГО. Предложеният модел позволява разработката на варианти на системни модули, които да се изпълняват на специализиран хардуер. Това позволява на МРСГО да реализира АГО върху GPGPU, дейност, която не е възможна с другите разглеждани системи.

Глава 5 Заключение

Главният извод, който можем да направим е, че целта на настоящия дисертационен труд е постигната. По време на разработката бяха открити и други области, в които разгледаните подходи могат да бъдат използвани. Бяха разкрити някои важни области за бъдещо развитие на тематиката.

Отвореността на предложеният модел дава възможност за развиване в различни насоки. Бъдещите изследвания и разработки трябва да бъдат насочени към:

- Изследване на АГО, които се настройват автоматично чрез анализ на сцената;
- Създаване на библиотеки от готови проблемно-ориентирани подсистеми, с възможност за директно използване в системата;
- Разширяване на набора от системни модули;
- Детайлно изследване на предимствата за АГО от изпълнението им в нехомогенна хардуерна среда (CPU, GPGPU и т.н.);
- Създаване и популяризиране на единен инструментариум от модули за реализация на прототипи в процеса на изследване на алгоритмите за глобално осветяване;
- Реализиране на връзки между популярни системи за моделиране и МРСГО.

Апробация

Част от резултатите са апробирани и използвани в следните университетски проекти:

1. Научен проект **НИ11 ФМИ-004/30.05.2011** „Разработка и приложение на иновативни ИКТ за провеждане на качествени конкурентоспособни научни изследвания и цялостно осъвременяване процеса на обучение във ФМИ“ с ръководител проф. д-р Снежана Гочева-Илиева, Фонд „Научни

изследвания“ при ПУ „Паисий Хилендарски“, 2011/2012 г.;

2. Научен проект **НИ13 ФМИ-002/19.03.2013** „Интеграция на ИТ в научните изследвания по математика, информатика и педагогика на обучението“ с ръководител проф. д-р Снежана Гочева-Илиева, Фонд „Научни изследвания“ при ПУ „Паисий Хилендарски“, 2013/2014 г.

3. Научен проект **НИС14-ФМИ-002/26.03.2014** „Разработка на паралелни алгоритми с приложения в научните изследвания и обучението по математика и информатика“ с ръководител доц. д-р Христо Крушков, Фонд „Научна инфраструктура“ при ПУ „Паисий Хилендарски“, 2014 г.

Доклади на национални и международни конференции, научни сесии и семинари:

[D1] **Lesev H.**, *Architecture of a highly modular lighting simulation system*, CERN Computing Seminar, 03.10.2014, Geneva;

[D2] **Лесев Х.**, *Комбиниране на GI алгоритми - проектиране на модулна рендер система*, CG2 - Photo-Realistic Graphics Development Seminar, 26.10.2013, София;

[D3] **Лесев Х.**, *Visual Ray Analyzer*, ФМИ семинар, 08.05.2013, Пловдив;

[D4] **Лесев Х.**, *Plug-in based framework for GI algorithms*, ФМИ семинар, 03.01.2013, Пловдив;

[D5] **Лесев Х.**, *Кеширане на изходящите лъчи за оптимизиране пресмятането на материали изградени от слоеве*, ФМИ семинар, 22.06.2011;

[D6] **Lesev H.**, *Classification of Global Illumination Algorithms*, Research and Education in Mathematics, Informatics and their Applications Conference 10-12.12.2010, Пловдив;

[D7] **Lesev H.**, *Optimizing shading process in photorealistic graphic systems*, International scientific conference Informatics in the scientific knowledge 2010, Варна, 24-26.06.2010

[D8] **Лесев Х.**, *Фотореалистичната компютърна графика в обучението по информатика*, Конференция Образованието в информационното общество, 27-28.05.2010, Пловдив;

[D9] **Лесев Х.**, Иванов Д., *Генериране карта на осветеността независима от гледната точка*, Конференция за Студентско научно творчество, 30.03.2007, Бургас.

Авторска справка

При решаване на задачи 1-4, бяха получени научни, научно-приложни и приложни приноси към тематиката, както следва:

1. Предложена е качествена класификация на алгоритмите за глобално осветяване;
2. Предложен е модел за проектиране на МРСГО;
3. Предложен е общ подход и схема за описване на АГО чрез използването на модули и е показана възможността за комбиниране на съществуващи и реализиране на нови АГО;
4. Предложен е подход за визуален анализ на изпълнението на алгоритми в контекста на областта на ГО чрез проблемно ориентирани филтри;
5. Предложена е отворена архитектура за проектиране и реализация на модулни разширяеми системи за глобално осветяване;
6. Реализиран е прототип на МРСГО и широк набор от разширяващи модули, адресиращи специфични проблеми от областта на реалистичната компютърна графика.

Прототипът е приложен в обучението по дисциплината Компютърна графика във ФМИ на ПУ.

В Таблица 4 е показана връзката между най-важните резултати на дисертационния труд, основните цели и задачи, приносите и публикациите.

Таблица 4 Връзка на основните резултати с целите и публикациите

Принос	Цел	Задача	Раздел	Публикации
1	1	1.1, 1.3	1.1, 1.3	P1
2	2	2.1	2.1, 2.3	P1, P2, P4
3	1, 2	1.2, 2.2	1.2, 2.2	P1, P2, P3
4	2	2.3	2.3.5, 3.5, 4.2	P2
5	3	3.1, 3.3	3.1, 3.2, 3.3, 3.5	P1, P2, P4
6	3, 4	3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5	3.6, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5.2	P1, P3, P5

Публикации по дисертационния труд

[P1] **Lesev H.**, *Classification of Global Illumination Algorithms*, Proceedings of the 2010 Research and Education in Mathematics, Informatics and their Applications Conference 10-12.12.2010, Plovdiv, pp. 271-278, 2010, University Press "Paisii Hilendarski", Plovdiv, ISBN 978-954-423-621-2.

[P2] **Lesev H.**, **Penev A.**, *A Framework for Visual Dynamic Analysis of Ray Tracing Algorithms*, Cybernetics and Information Technologies, Volume 14, No. 2, pp. 38-49, 2014, ISSN: 1314-4081.

[P3] **Лесев Х.**, *Фотореалистичната компютърна графика в обучението по информатика*, Сборник доклади на научната конференция Образованието в информационното общество, Пловдив, 27-28.05.2010 г., стр. 141-146, 2010. ISSN 1314-0752.

[P4] **Lesev H.**, *Optimizing shading process in photorealistic graphic systems*, International scientific conference Informatics in the scientific knowledge 2010, Varna, 24-26.06.2010, pp. 211-219, ISSN 1313-4345.

[P5] **Лесев Х.**, **Иванов Д.**, *Генериране карта на осветеността независима от гледната точка*, Годишник Студентско научно творчество, Том XVI Бургаски свободен университет, Бургас 2007, стр. 250-256, ISSN 1311-221-X.

Библиография

- [1] Д. Димов, *Компютърна графика*, Университетско издателство „Паисий Хилендарски“, Пловдив, 1999, ISBN 954-423-154-4.
- [2] Х. Лесев, *Фотореалистичната компютърна графика в обучението по информатика*, в *Сборник Доклади на научната конференция Образованието в информационното общество*, стр. 141-146, 2010, ISSN 1314-0752.
- [3] J. Kajiya, *The rendering equation*, in *SIGGRAPH '86 Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, August 18-22, Dallas, ACM, New York, NY, USA, vol. 20, No. 4, pp. 143-150, 1986.
- [4] C. Hery and R. Villemin, *Physically Based Lighting at Pixar*, 2013.

<<http://graphics.pixar.com/library/PhysicallyBasedLighting/paper.pdf> > посетено 11.2014

- [5] E. Catmull, *A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces*, Ph.D. Thesis ed., Computer Science Department, University of Utah, 1974, UTEC-CSc-74-133.
- [6] J. F. Hughes, A. van Dam, M. McGuire, D. F. Sklar, J. D. Foley, S. K. Feiner, K. Akeley, *Computer Graphics: Principles and Practice*, 3rd edition, Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2014, ISBN 978-0321399526.
- [7] A. Pasko, V. Adzhiev, A. Sourin and V. Savchenko, Function Representation in Geometric Modeling: Concepts, Implementation and Applications, *The Visual Computer*, vol. 11, Issue 8, pp. 429-446, 1995, ISSN 0178-2789.
- [8] P. Fayolle and A. Pasko, Distance to objects built with set operations in constructive solid modeling, in *Proc. of 13th International Conference on Humans and Computers*, University of Aizu Press Fukushima-ken, Japan, pp. 41-46, 2010.
- [9] A. J. P. Gomes, I. Voiculescu, J. Jorge, B. Wyvill, C. Galbraith, *Implicit Curves and Surfaces: Mathematics, Data Structures and Algorithms*, Springer-Verlag, Dordrecht, 2009, p. 351, ISBN 978-184-88-2406-5.
- [10] M. Meyer, *Dynamic Particles for Adaptive Sampling of Implicit Surfaces*, Ph.D. Thesis, School of Computing, University of Utah, 2008, p. 154, ISBN 978-054-96-7889-2.
- [11] М. Марков, *Физични величини. Мерни единици и системи SI*, София, Университетско издателство “Св. Климент Охридски”, 2008, стр. 290-318, ISBN 978-954-07-2575-8.
- [12] А. Андреева, *Лабораторен практикум по оптика*, Второ издание, София, Университетско издателство “Св. Климент Охридски”, 2009, стр. 146-150, ISBN 978-954-07-2820-9.
- [13] P. Dutre, K. Bala and P. Bekaert, *Advanced Global Illumination*, 2nd Edition, Wellesley, Massachusetts, A. K. Peters Ltd, 2006, ISBN 978-1568813073.
- [14] P. Slusallek, *Vision: An Architecture for Physically-Based Rendering*, PhD thesis, Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik), University of Erlangen, 1995.
- [15] M. Pharr and G. Humphreys, *Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation*, Morgan Kaufmann, Elsevier Inc, Burlington, MA, USA, 2010, ISBN 978-0123750792.
- [16] B. Phong, Illumination for computer generated pictures, *Communications of ACM*, p. 311–317, 1975.
- [17] J. Blinn, Models of light reflection for computer synthesized pictures, in *SIGGRAPH '77 Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, published in: *Computer Graphics*, vol. 11, pp. 192-198, ACM, New York, 1977.
- [18] K. Torrance and E. Sparrow, Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of Optical Society of America*, vol. 57, pp. 1105-1112, 1967.
- [19] R. Cook and K. Torrance, A Reflectance Model for Computer Graphics, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 1, no. 1, pp. 7-24, January 1982.
- [20] G. Ward, Measuring and modeling anisotropic reflection, in *Proc. of SIGGRAPH'92*, published in *Computer Graphics*, ACM, New York, vol. 26, no. 2, pp. 265–272, 1992.
- [21] M. Oren and S. Nayar, Generalization of Lambert's Reflectance Model, in *Proc. of SIGGRAPH' 94*, ACM, New York, vol. 28, pp. 239–246, 1994.
- [22] M. Ashikhmin and P. Shirley, An Anisotropic Phong BRDF Model, *Journal of Graphics Tools*, vol. 5, pp. 25-32, 2000.
- [23] E. Lafortune, S.-c. Foo, K. Torrance and D. Greenberg, Non-Linear Approximation of Reflectance Functions, in *Proceedings of SIGGRAPH 97*, pp. 117-126, 1997.
- [24] H. W. Jensen, *Realistic Image Synthesis using Photon Mapping*, AK Peters, Natick, Massachusetts, 2001, ISBN: 156-8811470.
- [25] S.-K. László, *Monte-Carlo Methods in Global Illumination – Photo-Realistic Rendering with Randomization*, Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, 2000.
- [26] M. Kalos and P. Whitlock, *Monte Carlo Methods*, 2nd Edition, Wiley-VCH, Darmstadt, Germany, 2008, ISBN: 978-3-527-40760-6.
- [27] A. Keller, *Quasi-Monte Carlo methods in computer graphics: The global illumination problem*, Lectures in Applied Mathematics – American Mathematical Society, vol. 32, pp. 455-470, 1996.
- [28] T. Kollig and A. Keller, *Efficient multidimensional sampling*, Computer Graphics Forum, vol. 21, no. 3, pp. 557-563, 2002.
- [29] W. Mason and O. A. R. Board, *OpenGL Programming*, Addison-Wesley Professional, 1999, ISBN 978-0201604580.
- [30] P. Heckbert, Adaptive radiosity textures for bidirectional ray tracing, in *ACM SIGGRAPH '90 Proceedings*, vol. 24, pp. 145–54, 1990.
- [31] J. Friedl, *Mastering Regular Expressions*, 3rd Edition, O'Reilly Media, 2006, ISBN:978-0-596-52812-6.
- [32] E. Veach, *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*, Ph.D. dissertation ed., Stanford University, 1997.
- [33] L. Gritz, 2010, <<https://code.google.com/p/openshadinglanguage/wiki/LightPathExpressions>> посетено 11.2014.

- [34] H. Lesev, Classification of Global Illumination Algorithms, in *Research and Education in Mathematics, Informatics and their Applications Conference*, 10-12.12.2010, Plovdiv, University Press "Paisii Hilendarski", Plovdiv, pp. 271-278, 2010.
- [35] Т. Нешков, *Приложна компютърна графика*, Ирин-Пирин, Благоевград, 2009, ISBN: 978-954-8505-17-8.
- [36] T. Whitted, An improved illumination model for shaded display, *Communications of the ACM*, vol. 23, no. 6, pp. 343-349, June 1980.
- [37] G. Ward, F. Rubinstein and R. Clear, A ray tracing solution for diffuse interreflection, in *SIGGRAPH '88: Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, published in *Computer Graphics*, ACM, New York, vol. 22, No. 4, pp. 85-92. 1988.
- [38] G. Ward, The Radiance lighting simulation and rendering system, in *SIGGRAPH'94: Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 459 – 472, 1994.
- [39] G. Ward and P. Heckbert, Irradiance gradients, in *Proceedings of the 3rd Eurographics Workshop on Rendering*, Bristol, United Kingdom, pp. 85-98, 1992.
- [40] E. Lafortune and Y. Willems, Bidirectional path tracing, in *Proceedings of Third International Conference on Computational Graphics and Visualization Techniques (Compugraphics '93)*, pp. 145-153, 1993.
- [41] E. Veach and L. Guibas, Bidirectional estimators for light transport, in *Proceedings of the 5th Eurographics Workshop on Rendering*, Darmstadt, Germany, pp. 147-162, 1994.
- [42] H. W. Jensen, Global illumination using photon maps, in *Rendering Techniques '96*, pp. 21-30, 1996.
- [43] The RenderMan Team, RenderMan Documentation, 2014, <<http://renderman.pixar.com/view/documentation>> посетено 11.2014.
- [44] I. Stephenson, *Essential RenderMan®*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 2007, ISBN 184-628-344-2.
- [45] P. Hanrahan and J. Lawson, A language for shading and lighting calculations, in *SIGGRAPH '90 Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, *Computer Graphics*, ACM, New York, vol. 24, no. 4, pp. 289 - 298, 1990, ISBN:0-89791-344-2.
- [46] S. Upstill, *The RenderMan Companion: A Programmer's Guide to Realistic Computer Graphics*, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., Boston, MA, 1989, ISBN 020-150-868-0.
- [47] Pixar, *The RenderMan Interface Version 3.1*, 1989, <http://renderman.pixar.com/products/rispec/rispec_pdf/RISpec3_1.pdf> посетено 11.2014.
- [48] The RenderMan Team, *Shader objects and coshaders*, 2009, <<http://renderman.pixar.com/resources/current/rps/shaderObjects.html>> посетено 11.2014.
- [49] Chaos Group Ltd, *V-Ray SDK*, 2011, <<http://help.chaosgroup.com/vray/help/maya/sdk22/>> посетено 11.2014.
- [50] J. Gough, *Compiling for the .NET Common Language Runtime (CLR)*, 1st ed., Prentice Hall PTR, 2001, ISBN 978-0130622969.
- [51] S. Lidin, *Expert .NET 2.0 IL Assembler*, Apress, 2006, ISBN 978-1-59059-646-3.
- [52] H. Lesev, Optimizing shading process in photorealistic graphic systems, in *International scientific conference Informatics in the scientific knowledge*, Varna, 24-26.06.2010, pp. 211-219, 2010, ISSN 1313-4345.
- [53] M. Fowler, *ML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., 2003, pp. 103-105, ISBN 032-119-368-7.
- [54] S. Bilas, A data-driven game object system. Talk at the '02 Game Developers Conference., 2002, <<http://gamedevs.org/uploads/data-driven-game-object-system.pdf>> посетено 11.2014.
- [55] O. Cole, *Aprobe: A Framework for Non-intrusive Software Instrumentation*, 2009, <<http://www.ocsystems.com/pdf/AprobeTechnologyOverview.pdf>> посетено 11.2014.
- [56] M. Hewardt and D. Pravat, *Advanced Windows Debugging*, 1st ed., Addison-Wesley Professional, 2007, ISBN 032-137-446-0.
- [57] C. Gribble, J. Fisher, D. Eby, E. Quigley and G. Ludwig, Ray tracing visualization toolkit, in *I3D '12 Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, New York, USA, pp. 71-78, 2012, ISBN 978-1-4503-1194-6.
- [58] H. Lesev and A. Penev, A Framework for Visual Dynamic Analysis of Ray Tracing Algorithms, *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 14, no. 2, pp. 38-49, ISSN 1314-4081.
- [59] B. Myers, INCENSE: A System for Displaying Data Structures, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 17, no. 3, pp. 115-125, 1983.
- [60] S. Mukherjea and J. Stasko, Toward visual debugging: integrating algorithm animation capabilities within a source-level debugger, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, vol. 1, no. 3, pp. 215-244, September 1994.
- [61] M. Carlisle, T. Wilson and S. Hadfield, RAPTOR: a visual programming environment for teaching algorithmic problem solving, in *Proceedings of the 36th SIGCSE technical symposium on Computer science education*, New York, NY, USA, pp. 176-180, 2005.
- [62] J. A. Rusell, *An interactive web-based ray tracing visualization tool*, 1999.
- [63] T. Naps and B. Swander, An object-oriented approach to algorithm visualization - easy, extensible, and dynamic, in *SIGCSE '94*

Proceedings of the twenty-fifth SIGCSE symposium on Computer science education, ACM New York, NY, USA, pp. 46-50, 1994.

- [64] J. Nikander and J. Helminen, Algorithm Visualization in Teaching Spatial Data Algorithms, in *Information Visualization, 2007. IV '07. 11th International Conference*, Zurich, pp. 505–510, 2007.
- [65] A. Penev, D. Dimov and D. Kralchev, Open hybrid system for geometrical modeling, in *Proceedings of 17th International Conference on Systems for Automation of Engineering and Research*, vol. 1, pp. 131-135, 2003.
- [66] J. Skeet, *C# in Depth*, Third Edition, Manning Publications Co., Shelter Island, NJ, USA, 2013, ISBN 978-161-729-134-0.
- [67] Apple Inc. *Working Protocols*, 2012,
<<https://developer.apple.com/library/ios/documentation/Cocoa/Conceptual/ProgrammingWithObjectiveC/WorkingwithProtocols/WorkingwithProtocols.html>> посетено 11.2014.
- [68] Microsoft Developer Network, *IniFile Table*, 2014
<[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa369282\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa369282(v=vs.85).aspx)> посетено 11.2014.
- [69] P. Bryan and K. Zyp, *JSON Reference*, 2011
<<http://tools.ietf.org/html/draft-pbryan-zyp-json-ref-01>> посетено 11.2014.
- [70] Microsoft, *Managed Extensibility Framework (MEF)*, 2014 <[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd460648\(v=vs.110\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd460648(v=vs.110).aspx)> посетено 11.2014.
- [71] C. Holm, B. Spuida and M. Kruger, *Dissecting a C# Application: Inside SharpDevelop*, Wrox Press, 2003, ISBN 186-100-817-1.
- [72] *Novell: Mono.Addins*, 2014
<<http://monoaddins.codeplex.com/wikipage?title=Description%20models&referringTitle=Reference%20Manual&ANCHOR#XML%20Manifest>> посетено 11.2014.
- [73] R. Aish, DesignScript: Origins, Explanation, Illustration, in *Computational Design Modelling*, pp. 1-8, 2012, ISBN 978-3-642-23434-7.
- [74] Object Management Group, *OMG Unified Modeling Language (UML), Superstructure, V2.1.2*, 2007
<<http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Superstructure/PDF>> посетено 11.2014.
- [75] B. T. Tomas Möller, Fast, Minimum Storage Ray/Triangle Intersection, *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, no. 1, pp. 21-28, 1997.
- [76] I. Stroud, *Boundary Representation Modelling Techniques*, Springer, 2006, ISBN 1-84628-312-4.
- [77] O. Fryazinov, A. Pasko, V. Adzhiev, BSP-fields: An exact representation of polygonal objects by differentiable scalar fields based on binary space partitioning, *Computer-Aided Design Volume 43 Issue 3*, pp. 265-277, 2011.
- [78] A. Penev, D. Dimov and D. Kralchev, Functional representation in computer, *Union of Bulgarian Mathematicians*, pp. 288-292, 2006, ISBN 978-954-8880-23-7.
- [79] I. Shafarevich and A. Remizov, *Linear Algebra and Geometry*, Springer, 2012, ISBN 978-3-642-30993-9.
- [80] F. Romeiro, L. Velho and L. H. d. Figueiredo, Hardware-assisted rendering of csg models, in *In XIX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'06)*, pp. 139-146, 2006.
- [81] L. J. Tomczak, GPU Ray Marching of Distance Fields, Technical University of Denmark, 2012.
- [82] W. Donnelly, Per-Pixel Displacement Mapping with Distance Functions, in *GPU Gems 2*, Chapter: *Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation (Gpu Gems)*, Addison-Wesley Professional, pp. 123-136, 2005, ISBN 032-133-559-7.
- [83] H. W. Jensen, S. R. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan, A Practical Model for Subsurface Light Transport, in *SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, New York, NY, USA, pp. 511-518, 2001.
- [84] K. Zhou, Q. Hou, R. Wang and B. Guo, Real-time KD-tree construction on graphics hardware, *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2008*, ACM, New York, NY, USA, Article 126, 2008.
- [85] J. Revelles, C. Urena and M. Lastra, An Efficient Parametric Algorithm for Octree Traversal, *Journal of WSCG*, pp. 212-219, 2000.
- [86] W. Leler and J. Merry, *3D With Hoops: Build Interactive 3d Graphics into Your C++ Applications*, Longman Pub Group, 1996, ISBN 020-187-025-8.
- [87] E. Lengyel, Chapter 4 Transforms, in *Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics, Third Edition*, Cengage Learning PTR, 2011, ISBN143-545-886-9.
- [88] K. Suffern, 21 Transforming Objects, in *Ray Tracing from the Ground Up*, A. K Peters/CRC Press, 2007, ISBN 156-881-272-8.
- [89] S. McConnell, *Code Complete*, 2nd ed., Microsoft Press, 2004, ISBN 073-561-967-0.
- [90] T. Odaka, W. Sae-Tang, M. Fujiyoshi, H. Kobayashi, M. Iwahashi and H. Kiya, A Lossless Compression Method Using Histogram Packing for HDR Images in OpenEXR Format, in *International Workshop on Advanced Image Technology*, Bangkok, Thailand, 2014, ISSN: 1745-1337.
- [91] T. Boutell, *PNG (Portable Network Graphics) Specification Version 1.0*, RFC 2083, Internet Engineering Task Force, 1997.

- [92] ITU-T and ISO/IEC, Information technology - JPEG XR image coding system - Part 2: Image coding specification, 2009.
- [93] ISO/IEC, High Efficiency Coding and Media Delivery in Heterogeneous Environments, ISO/IEC 23008, 2013.
- [94] I. Wald and V. Havran, On building fast kd-trees for ray tracing, and on doing that in $O(N \log N)$, in *Proceedings of IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing 2006*, pp. 61-70, 2006.
- [95] I. Wald, On fast Construction of SAH-based Bounding Volume Hierarchies, in *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, IEEE Computer Society Washington, DC, USA pp. 33-40, 2007.
- [96] I. Wald, S. Boulos and P. Shirley, Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 1, Article 6, 2007.
- [97] M. Aono and R. Ohbuchi, Quasi-Monte Carlo Rendering with Adaptive Sampling, IBM Tokyo Research Laboratory, 1996.
- [98] M. Ramasubramanian, S. Pattanaik and D. Greenberg, A Perceptually Based Physical Error Metric for Realistic Image Synthesis, in *SIGGRAPH '99 Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, USA, pp. 73-82, 1999.
- [99] B. Walter, S. Fernandez, A. Arbre, K. Bala, M. Donikian and D. Greenberg, Lightcuts: a scalable approach to illumination, *ACM Transactions on Graphics (TOG)* - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, vol. 24, no. 3, pp. 1098-1107, 2005.
- [100] G. Ward, Adaptive Shadow Testing for Ray Tracing, *Photorealistic Rendering in Computer Graphics, Focus on Computer Graphics*, pp. 11-20, 1994.
- [101] G. Ward, Making global illumination user-friendly, in *Rendering Techniques*, P. Hanrahan and W. Purgathofer, Eds., Springer, pp. 104-114, 1995, ISBN 3-211-82733-1.
- [102] H. Samet, *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*, Addison-Wesley, 1990, ISBN 020-150-255-0.
- [103] R. Bayer, The Universal B-Tree for Multidimensional Indexing: General Concepts, in *Proceedings of the Worldwide Computing and Its Applications*, Springer-Verlag, London, UK, pp. 198-209, 1997.
- [104] E. Dumbill and N. Bornstein, *Mono: A Developer's Notebook*, O'Reilly Media, 2004, ISBN 978-0596007928.
- [105] R. Stallman and the GCC Developer Community, *Using The Gnu Compiler Collection: A Gnu Manual For Gcc Version 4.3.3*, CreateSpace, 2009, ISBN 144-141-276-X.
- [106] Doxygen, *Doxygen*, <<http://www.doxygen.org>> посетено 11.2014.
- [107] D. Shreiner, G. Sellers, J. M. Kessenich and B. M. Licea-Kane, *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL*. Version 4.3. 8th Edition., Addison Wesley Professional, 2013, ISBN 978-0321773036.
- [108] G. Krasner and S. Pope, A Cookbook for Using the Model-View-Controller User Interface Paradigm in Smalltalk-80, *Journal of Object-Oriented Programming*, vol. 1, pp. 26-49, 1988.
- [109] A. Langlands, Physically Based Shader Design in Arnold, 2014, <http://blog.selfshadow.com/publications/s2013-shading-course/andersson/s2013_pbs_mia_notes.pdf> посетено 11.2014.
- [110] A. Zap, SIGGRAPH 2013 Course: Physically Based Shading in Theory and Practice, 2013<http://blog.selfshadow.com/publications/s2013-shading-course/andersson/s2013_pbs_mia_notes.pdf> посетено 11.2014.
- [111] C. Ureña, M. Fajardo and A. King, An Area-Preserving Parametrization for Spherical Rectangles, in *Eurographics Symposium on Rendering, EGSR'13*, Eurographics Association Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, pp. 59-66, 2013.
- [112] M. Ernst and S. Woop, Embree: Photo-Realistic Ray Tracing Kernels, Intel Labs, 2011 <<https://software.intel.com/en-us/articles/embree-photo-realistic-ray-tracing-kernels>> посетено 11.2014.
- [113] J. Křivánek, I. Georgiev and A. Kaplanyan, Recent Advances in Light Transport Simulation: Theory & Practice, in *ACM SIGGRAPH 2013 Courses*, ACM, New York, NY, USA, Article 4, 2013.
- [114] J. Arvo and D. Kirk, Particle transport and image synthesis, in *SIGGRAPH '90 Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Newsletter ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 24, no. 4, pp. 63-66, 1990.
- [115] E. Tabellion and A. Lamorlette, An Approximate Global Illumination System for Computer Generated Films, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, no. 3, pp. 469-476, 2004.
- [116] X. Лесев, Д. Иванов, Генериране карта на осветеността независима от гледната точка, *Годишник Студентско научно творчество*, Том XVI Бургаски свободен университет, Бургас, стр. 250-256, 2007, ISSN 1311-221-X.
- [117] R. Cook, T. Porter and L. Carpenter, Distributed ray tracing, in *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, ACM Computer Graphics, vol. 18, no. 3, pp. 135-147, 1984.
- [118] Blender Foundation, Blender, <<http://www.blender.org/>> посетено 11.2014.
- [119] Y. Hijazi, A. Knoll, M. Schott, A. Kensler and C. Hansen, CSG Operations of Arbitrary Primitives with Interval Arithmetic and Real-Time Ray Casting, in *Scientific Visualization: Advanced Concepts*, H. Hagen, Ed., Salt Lake City, Schloss Dagstuhl--Leibniz-Zentrum fuer Informatik, pp. 78-89, 2008, ISBN: 978-3-939897-19-4.

Hristo Iliyanov Lesev

Modular extendable systems for global illumination calculation

Author’s summary

of a dissertation

for the acquisition of the educational and scientific degree “Doctor”

Area of Higher Education 4. Natural Sciences, Mathematics and Informatics

Professional Stream 4.6. Informatics and Computer Science

Doctoral Program Informatics

Dissertation Tutor:

Prof. Dr. Snezhana Georgieva Gocheva-Ilieva

Plovdiv, 2015