

Novos Métodos de Design de Iluminação

António Cardoso Costa
Dep. de Eng^a Informática do ISEP
Rua S. Tomé, 4200 Porto
INESC Porto
P. da República 93 R/C, 4007 Porto
acc@dei.isep.ipp.pt

António Augusto Sousa
INESC Porto
P. da República 93 R/C, 4007 Porto
Fac. de Eng. da Univ. do Porto
Rua dos Bragas, 4099 Porto
augusto.sousa@inescn.pt

Fernando Nunes Ferreira
Fac. de Eng. da Univ. do Porto
Rua dos Bragas, 4099 Porto
fnf@fe.up.pt

Sumário

O design de iluminação ainda é predominantemente baseado em processos empíricos. O utilizador geralmente recorre a métodos numéricos para determinar a solução pretendida, mas não dispõe de ferramentas evoluídas de análise e predição. Este artigo descreve uma abordagem ao design de iluminação que, utilizando modelos ópticos verosímeis, permite ao utilizador definir os objectivos de iluminação, incorporá-los nos dados de entrada e obter soluções "óptimas". Este tipo de design inverso apresenta claras vantagens sobre o design baseado em "tentativa e erro" (evolução interactiva). A metodologia desenvolvida baseia-se na versão dual da equação de transporte da luz (equação de transporte da importância) para transformar o problema de design de iluminação num problema de optimização global. A solução "óptima" deste problema representa uma configuração particular de parâmetros da cena que maximiza a satisfação dos objectivos de iluminação.

Palavras Chave

Design de iluminação, Transporte da luz, Optimização global.

1. INTRODUÇÃO

Os espaços interiores são frequentemente rotulados de "amplos", "alegres", "claustrofóbicos", "depressivos", entre outras designações. Estas palavras têm uma carga emocional evidente; raramente um espaço interior é classificado através de um código numérico. Como é a luz que revela a arquitectura, existe um problema de comunicação quando se tenta exprimir por palavras ou números uma experiência visual – as subtilezas da luz são difíceis de descrever através de explicação verbal ou matemática. Do mesmo modo que os cientistas tentam racionalizar os mistérios da natureza, os técnicos de iluminação tendem a reduzir a luz a grelhas de números. Porém, cada pessoa apreende a luz de um modo muito próprio. Raramente dois designers de iluminação obtêm a mesma solução para um espaço interior – uma possível explicação para essa aparente discrepância é o número elevado de variáveis em jogo, impossível de quantificar na prática.

A investigação da resposta humana em ambientes de iluminação controlada permitiu desenvolver esquemas de iluminação padronizados para uma gama diversificada de espaços interiores. No entanto, muitos designers acham que o "toque pessoal" que valoriza uma solução de iluminação não pode ser obtido de uma forma totalmente analítica, mas essencialmente através da intuição fundamentada numa visão abrangente do problema. Tal não significa, porém, que o designer não se socorra de ferramentas de apoio, capazes de potenciar a qualidade e

quantidade do trabalho a realizar. Considera-se até desejável que essas ferramentas possuam uma base física sólida, um grau de abstracção elevado e sejam orientadas para os utilizadores que realmente delas necessitam. Essas ferramentas deverão ser tão flexíveis quanto possível, no sentido de ajudar a evitar soluções desvantajosas e de facilitar a descoberta de soluções interessantes, mas sempre sob o controlo do designer. Apesar dos desenvolvimentos nas áreas da computação em geral e da computação gráfica em particular, não existem ainda ferramentas computacionais capazes de apoiar completamente o design de iluminação (entendido como sendo uma interacção entre a arquitectura, a luminotecnia e a estética). Algumas das razões que podem explicar esta lacuna são:

- Os recursos computacionais elevados necessários para utilizar essas ferramentas;
- A complexidade da óptica, que está na base do fenómeno da iluminação;
- A relação complexa da iluminação com a geometria e os materiais de superfícies;
- A dificuldade em simular e prever resultados em design de iluminação.

O tema principal deste artigo é discutir a apresentar novos processos de design de iluminação, preferencialmente mais voltados para a satisfação dos objectivos dos designers.

2. TRABALHO RELACIONADO

Actualmente existem ferramentas computacionais sofisticadas, embora forneçam pouco apoio ao design – o designer dispõe de ferramentas fisicamente válidas e razoavelmente intuitivas para realizar cálculos de transporte da luz e de iluminação, com inegáveis vantagens produtivas (maior confiança nos resultados e menores tempos de obtenção desses resultados). No entanto, a actividade de design está ainda muito desapojada, pois as referidas ferramentas pouco mais são do que calculadores luminotécnicos sofisticados (aplicações de validação de iluminação), conforme se mostra na Figura 1. A correlação entre os objectivos e a solução obtida deverá ser efectuada mentalmente pelo designer.

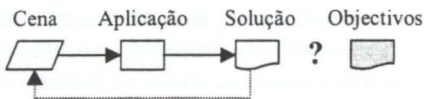


Figura 1 – Design de iluminação tradicional

Para se poder empregar correctamente a expressão “design de iluminação” às ferramentas computacionais, estas deverão ser capazes de lidar inicialmente com uma especificação dos objectivos do design [Costa98], de modo a poderem orientar os seus cálculos para a produção de soluções enquadráveis nos referidos objectivos. Esta metodologia de **design inverso** (Figura 2) é potencialmente superior ao design tradicional, este último baseado numa metodologia de **evolução interactiva**. No entanto, a metodologia de design inverso adiciona mais complexidade ao problema. Algumas abordagens preliminares baseadas em design inverso foram desenvolvidas por [Kawai93] e [Schoeneman93], mas a sua aplicabilidade é limitada pelo facto de recorrerem a algoritmos de transporte de luz simplificados e por serem incapazes de modelar satisfatoriamente a realidade, devido a tratarem apenas superfícies exclusivamente difusas.

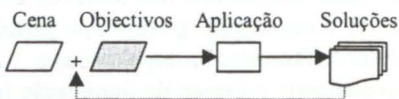


Figura 2 – Design de iluminação inverso

Segundo [Marks97], para situações de design em que o custo computacional é elevado ou em que os objectivos são difíceis de quantificar, pode ser empregue uma metodologia alternativa designada **Design Gallery™** (DG).

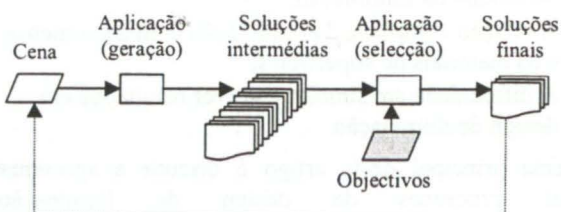


Figura 3 – Design baseado em Design Gallery™

A metodologia DG (Figura 3) baseia-se na geração

aleatória de um número muito elevado de soluções alternativas (através de heurísticas de “dispersão”), seguida da selecção dos grupos de soluções mais relevantes. A fase inicial deve gerar um número suficientemente elevado de soluções, a fim de se reduzir a probabilidade de falhar a solução óptima. A segunda fase classifica as diversas soluções de acordo com parâmetros iniciais pré-definidos e selecciona as mais significativas, deixando a escolha final para o utilizador. No entanto, esta metodologia é susceptível de ser menos eficiente do que o design inverso, caso seja possível definir uma medida de qualidade associada a cada solução candidata. Na metodologia DG faz-se uma classificação de todas as soluções interessantes geradas e apresentam-se as mais promissoras num interface visual hierarquizado, navegável pelo utilizador. Em problemas de elevado custo computacional, a geração de muitas soluções aumenta consideravelmente o tempo de processamento, o que pode ser incomportável; nesses casos, o design inverso baseado num método de optimização global pode evitar a geração de soluções desinteressantes e concentrar-se nas regiões mais promissoras do universo de soluções, a fim de tentar encontrar mais rapidamente a solução óptima.

3. ENQUADRAMENTO

A quantidade fundamental da iluminação é a radiância. Quando os ambientes não participam nos fenómenos radiantes, a radiância “viaja” ao longo de percursos lineares desobstruídos sem sofrer alterações, ie, os fenómenos radiantes só acontecem nas superfícies dos objectos. Geralmente pretende-se determinar o estado de equilíbrio da função de radiância na cena. A formulação da **equação de transporte da luz** correspondente é

$$L(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{S^2} L(x_M(x, \omega_i), -\omega_i) f_s(x, \omega_i, \omega) d\sigma_x^\perp(\omega_i)$$

$L(x, \omega)$ – radiância no ponto x segundo a direcção ω ; f_s – BSDF¹;
 $x_M(x, \omega)$ – função de *ray-casting*²; $d\sigma_x^\perp(\omega)$ – ângulo sólido projectado infinitesimal

A **equação de transporte da luz** descreve o espalhamento da luz emitida pelas fontes de luz. No entanto, também se podem formular equações relacionadas com os sensores de radiância da cena (por exemplo, pixels), considerando-se a sua sensibilidade $W_e(x, \omega)$ como uma quantidade emitida; esta designa-se por **função de importância emitida**, dado que W_e representa a importância da luz que chega ao sensor. Esta é a ideia subjacente aos métodos duais, em que as regras de transporte são aplicadas à importância em vez da radiância. Assim, a **equação de transporte da importância** é

$$W(x, \omega) = W_e(x, \omega) + \int_{S^2} W(x_M(x, \omega_i), -\omega_i) f_s(x, \omega, \omega_i) d\sigma_x^\perp(\omega_i)$$

Pode-se considerar que o transporte da luz é composto

¹ BSDF – função que descreve o comportamento da radiância emitida num certo ponto de uma superfície.

² A função de *ray-casting* $x_M(x, \omega)$ determina o ponto mais próximo de x segundo a direcção ω .

por dois mecanismos que se sucedem alternadamente: o espalhamento, que descreve a interacção dos fótons com as superfícies, e a propagação, que descreve o modo como os fótons viajam em linha recta através de um meio. Estes mecanismos podem ser associados aos dois operadores seguintes:

Operador de espalhamento K

$$(Kh)(x, \omega) = \int_{S^2} f_s(x, \omega_i, \omega) h(x, \omega_i) d\sigma_x^\perp(\omega_i)$$

Operador de propagação G

$$(Gh)(x, \omega_i) = \begin{cases} h(x_M(x, \omega_i), -\omega_i) & \leftarrow x_M(x, \omega_i) \in M \\ 0 & \end{cases}$$

A composição destes operadores origina o

Operador de transporte da luz T

$$T = KG$$

Para se determinar a radiância L no estado de equilíbrio, tem que se verificar a relação $L = L_e + TL$, em que L_e é a radiância emitida pelas fontes de luz (esta equação é uma versão operacional da **equação de transporte da luz**). Resolvendo esta equação em ordem a L , obtém-se $L = L_e + TL_e + T^2L_e + \dots$, o que mostra que L pode ser considerada como a adição da luz emitida pelas fontes de luz com a luz espalhada uma vez, duas vezes, etc, sendo esta formulação correcta para superfícies fisicamente válidas. Em termos de transporte da importância através de operadores duais, também se verifica que $W = W_e + T_W W$, definindo-se $T_W = K^*G$, em que K^* é o operador dual de K ³. Quando $K = K^*$, ie, se não existem BSDF's assimétricos, verifica-se que $T = T_W$. No caso geral, porém, a radiância e a importância possuem equações de transporte diferentes: $T_L = KG$ e $T_W = K^*G$.

Em [Veach97] propõe-se um novo enquadramento dos operadores de transporte por forma a resolver este problema. A solução baseia-se na alteração da definição do operador de espalhamento K de modo a ser usado f_s/η_o^2 em vez de f_s (η_o é o índice de refração): deve-se usar $d\sigma_x^{\perp'}(\omega) = \eta^2(x, \omega) d\sigma_x^\perp(\omega)$ em vez de $d\sigma_x^\perp(\omega)$ em todas as definições e relações radiométricas – $d\sigma_x^{\perp'}(\omega)$ é designado o ângulo sólido projectado **básico**. A nova definição de radiância que decorre desse enquadramento é a radiância básica:

$$L'(x, \omega) = L(x, \omega) / \eta^2(x, \omega)$$

$\eta(x, \omega)$ – índice de refração no ponto x

Usando as novas definições, os operadores de transporte passam a ser $T_L = T_W = K^*G$, ie, a radiância básica e a importância obedecem à mesma equação de transporte. Uma vantagem importante de utilizar a radiância básica nos algoritmos de transporte da luz é que permite usá-los de forma reversível, ie, podem ser usados para computar a radiância ou a importância, evitando-se assim o recurso a dois algoritmos distintos. Esta reversibilidade dos algoritmos é fundamental para a implementação dos métodos de design que são o tema deste artigo.

³ Na realidade é $T_W = K^*G^*$, mas G^* é sempre igual a G .

4. DESIGN DE ILUMINAÇÃO

O design de iluminação "ideal" representa o design na sua abstracção máxima, desprovido de todos os pormenores acessórios. Em termos ideais, o designer deveria descrever de modo preferencialmente qualitativo os objectivos de iluminação, os quais seriam imediatamente validados e, em caso de conflito, assinaladas as causas. Conjuntamente com a geometria e os materiais de superfície dos objectos, uma ferramenta "ideal" de design de iluminação seria capaz de fazer rapidamente uma simulação de transporte da luz e apresentar os resultados fisicamente válidos de formas visualmente adequadas. Com uma ferramenta destas, dois cenários de utilização parecem evidentes:

- Tipo evolução interactiva – o designer faria alterações nos parâmetros do problema e obteria resultados imediatos, desejavelmente a taxas interactivas.
- Tipo design inverso – o designer faria uma especificação qualitativa/quantitativa dos seus objectivos e das gamas de variação dos parâmetros, e obteria soluções óptimas rapidamente.

Em ambos os cenários, a simulação do transporte da luz seria efectuada por algoritmos com base física validada.

O ciclo de design tradicional é formado por iterações de pesquisa de parâmetros, com o objectivo final de determinar os valores óptimos desses parâmetros; o ciclo de design ideal seria semelhante, mas os parâmetros de design poderiam de muitos tipos:

- De luminárias – posição e orientação espacial, potência emissora, entre outros.
- Geométricos – espaçamentos entre luminárias, restrições geométricas e direccionais, etc.
- Lógicos – tipos de luminárias, esquemas de iluminação, etc.
- De cena – alterações de geometria de cena, alterações de tipos de materiais, etc.

Tanto em cenários tipo evolução interactiva como design inverso, em cada iteração de design efectuar-se-iam uma ou mais simulações de transporte da luz, cujos resultados seriam utilizados para calcular a medida de qualidade da solução encontrada. No cenário de design inverso, uma ferramenta computacional controlaria a sequência de iterações com o objectivo de otimizar os parâmetros de design – o utilizador poderia, em qualquer instante, visualizar as soluções existentes e interromper o processo, caso achasse conveniente.

As ferramentas computacionais de apoio ao design de iluminação operam sobre uma representação quantitativa do espaço e da luz [Barker97]. Essa representação tem uma vertente geométrica (volumétrica) correspondente à descrição de todos os objectos existentes, os quais afectam o percurso dos raios luminosos e, por consequência, a propagação da radiância pela cena. Outra vertente da referida representação descreve o comportamento da radiância quando os raios luminosos

incidem num ponto da superfície de um objecto; essa descrição influencia o espalhamento da radiancia pela cena. A terceira vertente descreve a emissão de luz existente no espaço, comportando-se como as condições iniciais do problema.

4.1 Luminárias

A maior parte das ferramentas de simulação do transporte da luz apenas aceita a especificação de luminárias muito simples (do tipo fonte de luz pontual, por exemplo). Do ponto de vista do designer, uma luminária é um objecto complexo, que emite radiancia com distribuições direccionais complexas e espectros complicados. Este desfasamento é responsável, em parte, pelo desinteresse dos designers no emprego destas ferramentas computacionais. No entanto, com o aparecimento de formatos estandardizados de descrição de luminárias, as ferramentas mais sofisticadas de simulação do transporte da luz começam a suportar modelos de luminárias reais. O uso de dados de distribuição luminosa, normalmente sob a forma de ficheiros em formato IESNA⁴, permite normalmente modelar com elevada exactidão o desempenho emissivo das luminárias.

4.1.1 Iluminação natural

A fonte de toda a iluminação natural é o sol, mas é o espalhamento da luz solar na atmosfera pelo ar, vapor de água, poeiras, etc, que dá ao céu a aparência de uma fonte de luz autónoma. Normalmente o sol e o céu são modelados através luminárias infinitamente distantes da cena. Porém, o efeito emissivo do céu é muito difícil de descrever, exceptuando-se certos casos de céu muito nublado. Por estas razões, foram desenvolvidos modelos do comportamento emissivo do sol e do céu para aplicação em simulações computacionais – estes modelos geram padrões emissivos a partir de quantidades físicas simples [CIE73] [Perez93] (Figura 4).

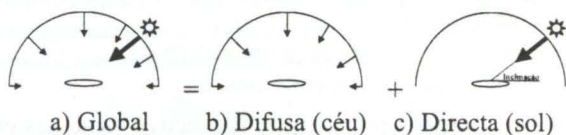


Figura 4 – Iluminação natural

4.2 Metodologia Baseada em Objectivos

Infelizmente, o actual estado da arte na área da simulação do transporte da luz não permite, pelo menos a médio prazo, supor que o design de iluminação "ideal" seja realizável. A razão principal deve-se ao facto da iluminação ser um fenómeno global complexo. Nessa medida, torna-se necessário encontrar alternativas que permitam tratar o problema de forma razoável (em termos de consumo de recursos computacionais, tempos de processamento, etc). Em [Costa99] descreve-se uma metodologia baseada em design inverso para abordar problemas de design de iluminação. Esta metodologia está de acordo com a Figura 2; no entanto, introduzem-se algumas restrições que permitem um tratamento "simplificado" do problema:

- A geometria permanece inalterada durante o processo de design;
- As características dos materiais de superfícies também permanecem inalteradas;
- Os objectivos de iluminação de natureza radiométrica são modelados através de fontes emissoras de importância;
- Os outros tipos de objectivos de iluminação são usados na definição de um procedimento algorítmico a empregar na pesquisa da melhor solução.

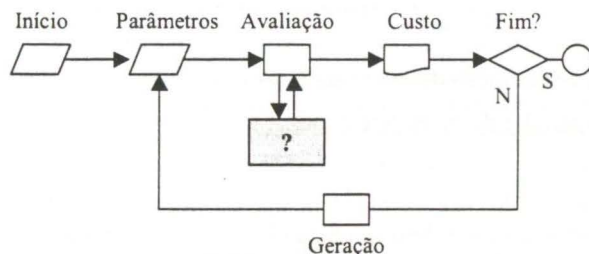


Figura 5 – Design como otimização global

A utilização de uma metodologia de design inverso que inclui as restrições acima referidas permite transformar o problema de design de iluminação num problema de otimização global (Figura 5) – os graus de liberdade do design de iluminação correspondem às dimensões de um espaço de configuração, sendo as variáveis correspondentes associadas aos parâmetros de iluminação. Para cada ponto do espaço de configuração pode-se computar o valor de uma função custo, o qual representa uma medida de qualidade da solução de iluminação correspondente. Se a função custo modelar correctamente os objectivos não radiométricos de iluminação e se as gamas de variação dos objectivos radiométricos forem as adequadas, então a otimização global dessa função custo produzirá o conjunto "óptimo" de valores dos parâmetros de iluminação, o que corresponderá a obter a solução "óptima" do design de iluminação. Esta nova metodologia permite abordar problemas comuns de iluminação, essencialmente relacionados com a determinação de características de luminárias a partir de objectivos de iluminação: o número total de luminárias, as suas posições, as suas orientações, os seus tipos, etc.

5. ALGORITMO

A Figura 6 apresenta o algoritmo proposto para implementar a nova metodologia. Para além da geometria e dos materiais de superfície, os objectivos de natureza radiométrica deverão ser associados a objectos "fictícios", emissores de importância; os restantes parâmetros a determinar podem ser incluídos numa função custo adequada. A dupla seta da Figura 6 representa a comunicação entre o ciclo principal de pesquisa de soluções e o algoritmo de transporte da luz que computa os dados radiométricos.

5.1 Funcionamento

5.1.1 Preparação de dados

Nesta fase definem-se todos os dados de entrada

⁴ IESNA – Illumination Engineering Society of North America.

necessários: geometria da cena, materiais de superfície, emissores de importância (ligados aos objectivos radiométricos), função custo (ligada aos objectivos não-radiométricos), parâmetros de optimização (valores iniciais e gamas de variação) e critérios de paragem da pesquisa de soluções.

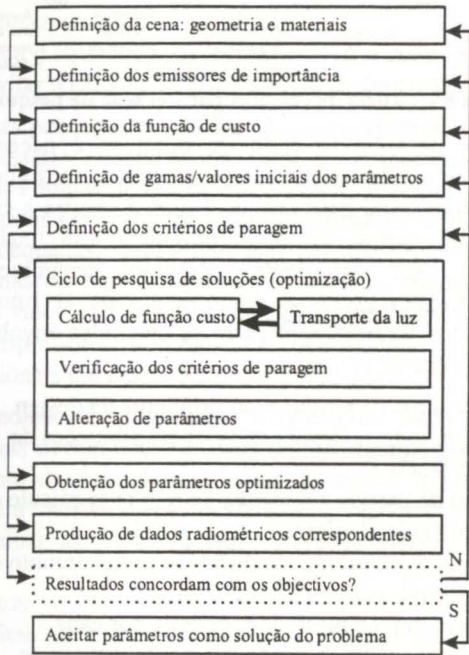


Figura 6 – Algoritmo proposto

5.1.2 Ciclo de pesquisa

Esta fase corresponde ao ciclo de pesquisa de soluções (optimização global dos parâmetros), de acordo com o contexto definido na fase anterior; o utilizador pode, em qualquer iteração, antever as melhores soluções encontradas e decidir pela interrupção da pesquisa; esta fase normalmente termina quando os critérios de paragem forem verificados. O papel da função custo é desempenhando por uma sequência de instruções (noção de programa custo da Figura 7).

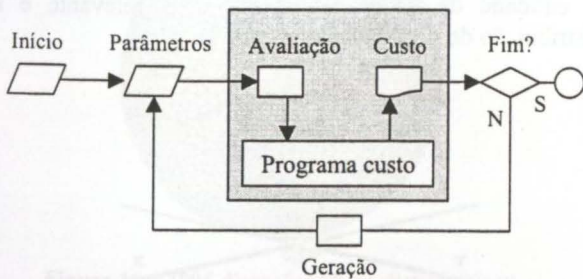


Figura 7 – O papel da função custo

5.1.3 Exploração de resultados

Depois da pesquisa terminada, os valores dos parâmetros correspondentes às soluções “óptimas” podem ser usados na produção de dados quantitativos para confirmação dos resultados, exploração de novas ideias, etc.

5.1.4 Decisão final

Nesta fase toma-se a decisão final de aceitação ou recusa da solução do problema de design de iluminação; em caso de recusa, o processo deverá ser recommençado na fase

de preparação de dados e incluir alguma modificação do contexto do problema (alteração de objectivos, ajuste dos dados da cena, etc).

5.2 Recursos Computacionais

A complexidade do algoritmo proposto deriva fundamentalmente dos dois processos computacionais que o constituem, a heurística de pesquisa de soluções e o algoritmo de simulação de transporte da luz. A explosão combinatória que resulta de parametrizar o problema de design e de discretizar cada parâmetro gera uma complexidade exponencial, à qual se junta a complexidade exponencial que advém da simulação do transporte da luz numa cena:

- A incidência de um raio luminoso num ponto da superfície de um objecto tende a produzir muitos raios espalhados, em função das características do material de superfície.
- A propagação de um raio luminoso pode ser afectada por qualquer objecto da cena.
- A determinação do percurso óptico entre dois pontos da cena complica-se fortemente à medida que o número requerido de operações de propagação e espalhamento aumenta.

5.2.1 Complexidade espacial

A complexidade espacial depende essencialmente da complexidade espacial do algoritmo de simulação de transporte da luz adoptado. Cada objectivo radiométrico é representado por uma ou mais fontes emissoras de importância. Existirão tantas representações geométricas cena/objectivo radiométrico quantos os objectivos radiométricos definidos, sendo cada representação constituída pela geometria da cena e do objectivo. Esta multiplicidade de representações geométricas cena/objectivo é necessária, dado que cada objectivo radiométrico produz uma distribuição particular de importância na cena e os efeitos dos diversos objectivos têm de ser calculados independentemente⁵. No entanto, este crescimento linear do espaço de dados utilizado pelo algoritmo proposto em função do número de objectivos radiométricos pode ser atenuado em algumas situações particulares. Sendo N_{Cena} o número de objectos da cena e N_{ORad} o número de objectivos radiométricos, a complexidade espacial do algoritmo proposto é

$$C_E \propto O(N_{Cena} \times N_{ORad})$$

5.2.2 Complexidade temporal

A complexidade temporal do algoritmo proposto depende do algoritmo de simulação de transporte da luz e do método heurístico de pesquisa de soluções. Cada objectivo radiométrico será analisado através de simulações de transporte da importância próprias, baseadas na representação geométrica da cena e desse objectivo. Note-se que a simulação de transporte da luz é, em si, um processo computacional com uma complexidade temporal de natureza exponencial,

⁵ Serão depois relacionados entre si na função custo.

dependente do número de objectos da cena, do número máximo de raios a espalhar por interacção radiante e do número máximo de propagações de raios descendentes. A complexidade temporal associada à pesquisa de soluções depende do número máximo de iterações a efectuar, da função custo (execução do programa custo) e do método de geração de valores de parâmetros (tipicamente por processos de aceitação/recusa). A complexidade temporal do algoritmo proposto é

$$C_T \propto O(N_{MIter} \times N_{ORad} \times O(N_{ONRad}) \times O(N_{Cena}, N_{REsp}, N_{RDesc}))$$

- N_{MIter} – N° máximo de iterações de pesquisa;
- N_{ORad} – N° de objectivos radiométricos;
- N_{ONRad} – N° de objectivos não-radiométricos;
- N_{Cena} – N° de objectos da cena;
- N_{REsp} – N° máximo de raios a gerar por interacção radiante;
- N_{RDesc} – N° máximo de descendentes de um raio;
- $O(N_{ONRad})$ – Complexidade temporal da função custo;
- $O(N_{Cena}, N_{REsp}, N_{RDesc})$ – Complexidade temporal do transporte da luz

Da equação anterior concluiu-se que o desempenho do algoritmo proposto pode ser melhorado das seguintes formas:

- Definição de objectivos (afecta N_{ORad} e/ou N_{ONRad}).
- Método de pesquisa mais eficiente (afecta N_{MIter}).
- Algoritmo de transporte da luz mais eficiente (afecta $O(N_{Cena}, N_{REsp}, N_{RDesc})$).

6. IMPLEMENTAÇÃO

Uma implementação inicial do algoritmo referido foi efectuada com recurso ao pacote de simulação de transporte da luz *RADIANCE* [Ward94] (caixa cinzenta da Figura 6) e ao pacote de optimização global *ASA* [Ingber98], este último baseado no método de *simulated annealing*. Todas as simulações foram efectuadas em PC's com sistema operativo *Linux* (PC/333 MHz com 128MB RAM). Os parâmetros posicionais de luminárias foram discretizados em múltiplos de 5cm e os parâmetros angulares em múltiplos de 2°.

6.1 Pesquisa de Soluções

A fase de pesquisa de soluções é totalmente implementada através de um programa baseado no pacote *ASA*, o qual apenas necessita da definição da função custo para poder funcionar.

6.1.1 Ciclo de pesquisa

O ciclo de pesquisa implementado através de um programa *ASA* pode ser controlado por diversos parâmetros, os quais afectam, em última análise, a qualidade das soluções obtidas. Alguns dos parâmetros de configuração mais relevantes são:

- N° máximo de iterações a efectuar.
- N° máximo de soluções aceites antes de terminar.
- N° máximo de estados inválidos repetidos.
- Precisão do valor da função custo.

Sendo o *ASA* uma implementação de um método heurístico, a convergência para a solução óptima é apenas garantida estatisticamente – é preferível executar várias vezes o ciclo de pesquisa com um número máximo de iterações da ordem dos milhares e depois tomar como soluções “óptimas” as melhores encontradas do que

realizar apenas um ciclo de pesquisa com um número máximo de iterações muito elevado.

6.1.2 Função custo

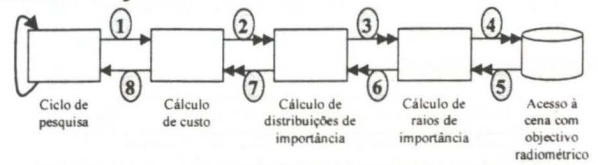


Figura 8 – Cadeia de cálculos por iteração de pesquisa

Em cada iteração do ciclo de pesquisa é necessário determinar o valor da função custo para a configuração dos parâmetros de pesquisa. A Figura 8 mostra a cadeia de cálculos que se inicia no programa *ASA* (ciclo de pesquisa), vai até cada conjunto cena/objectivo radiométrico e regressa ao ponto de partida. Os números presentes na figura representam as entidades envolvidas entre cada par de processos:

1. Parâmetros de pesquisa do problema de design.
2. Pontos onde se devem calcular distribuições de importância.
3. Ponto de partida e direcção de raio para cálculo de importância elementar.
4. Acesso às estruturas de dados de cada conjunto cena e objectivo radiométrico.
5. Valores parcelares de importância por cada interacção radiante associada ao raio em causa.
6. Valor de raio de importância.
7. Distribuição de importância.
8. Valor custo.

Como se depreende da Figura 8, uma avaliação da função custo implica uma quantidade elevada de cálculos de importância, para o cálculo da qual se efectua uma quantidade enorme de operações de espalhamento e propagação (fundamentais no transporte da luz).

6.2 Desempenho

6.2.1 Dados intermédios

A entidade de dados intermédia mais relevante é a distribuição de importância (Figura 9).

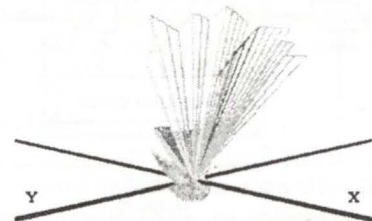


Figura 9 – Importância em torno de um ponto

Em problemas de design de iluminação que usam a importância em torno de um ponto, é necessário calcular a sua distribuição (podem existir outros tipos de distribuições – lineares, malhas de pontos, etc – mas a pontual é a mais comum). A distribuição de importância em torno de um ponto é, no caso geral, uma função escalar esférica de duas variáveis. No entanto, a determinação da importância para todas as direcções em torno de um ponto é impraticável, pelo que é necessário

efectuar essa determinação num conjunto discreto de direcções. As condições que afectam a definição do conjunto discreto de amostras mais adequado são:

- Nº elevado de amostras – Reduz o erro de aproximação.
- Nº reduzido de amostras – Reduz os tempos de processamento.
- Boa distribuição das direcções – Importante para evitar o cálculo de distribuições tendenciosas.

As duas primeiras condições são contraditórias, pelo que é necessário encontrar um valor de compromisso que satisfaça ambas de um modo razoável. Testes efectuados mostraram que cerca de 4096 amostras de importância são adequadas, desde que não existam fontes de luz pequenas ou muito afastadas; no entanto, qualquer que seja o valor adoptado, há sempre alguma probabilidade não-desprezável de não se detectarem fenómenos direccionais em ângulos sólidos reduzidos.

A condição final também é relevante, dado que as amostras devem cobrir o mais uniformemente possível o conjunto de direcções em torno do ponto, a fim de se evitarem amostragens tendenciosas. O problema de determinar as N “melhores” direcções distribuídas em torno de um ponto é equivalente ao problema de encontrar os N “melhores” pontos distribuídos sobre a superfície da esfera unitária [Saff97]. No entanto, um problema aparentemente tão simples não tem solução analítica, pelo que foi necessário implementar uma heurística de geração de N pontos distribuídos sobre a esfera unitária, usando-se como critério de distribuição a minimização da variância da distância geodésica entre pontos. A heurística utiliza uma versão especializada do método de *simulated annealing* para gerar distribuições quasi-óptimas de N pontos (Figura 10).

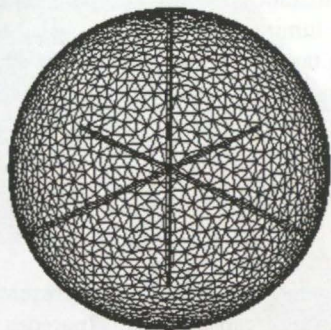


Figura 10 – 4096 direcções “bem distribuídas”

6.2.2 Coerência e aceleração

As vantagens da exploração da coerência da interreflexão difusa são aplicáveis a todos os tipos de cenas e produzem reduções significativas dos tempos de processamento. Em termos da implementação do algoritmo proposto na Figura 6, o uso desta técnica de *cache* de dados do *RADIANCE* permite reduzir a complexidade computacional da função custo ao nível dos cálculos radiométricos (entidades 4 e 5 da Figura 11).

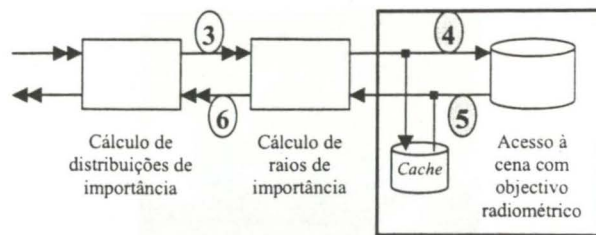


Figura 11 – *Cache* de importância integral indirecta

Muitos problemas de design de iluminação necessitam da determinação de distribuições de importância em torno de pontos. Em volumes desobstruídos, dois raios de importância paralelos e próximos entre si têm grande probabilidade de representar a mesma importância, pelo que as distribuições de importância em dois pontos próximos têm uma grande probabilidade de serem semelhantes. Esta coerência de distribuições de importância pode ser explorada através de uma *cache* de dados, em que cada elemento da *cache* é uma distribuição de importância em torno de um ponto, resultando na cadeia de cálculos da Figura 12 (técnica de aceleração descrita em [Costa99]).

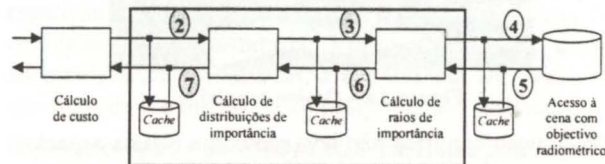


Figura 12 – *Cache* de distribuições de importância

Aquando do cálculo de uma distribuição de importância num ponto, procura-se essa distribuição na *cache* – caso exista ou haja distribuições muito próximas, o cálculo fica concluído; senão, determina-se um conjunto de pontos vizinhos existentes na *cache* e, para cada ponto candidato, utilizam-se valores de importância elementar em direcções “próximas” da direcção que une os pontos. Se, após esgotar esses pontos, a distribuição de importância pretendida está totalmente determinada, o cálculo fica concluído; senão, recorre-se ao *RADIANCE* para computar as importâncias elementares em falta. Esta técnica é parametrizada por uma distância de vizinhança que correlaciona o grau de aceleração de desempenho versus o erro de aproximação no cálculo de distribuições de importância.

6.3 Resultados

Apresentam-se de seguida os resultados de simulações de design de iluminação para dois exemplos baseados em casos reais. O primeiro exemplo é do tipo escritório (*Naval Research Center*, EUA) e o segundo é um *hall* (inspirado por um *hall* existente na FAUP).

6.3.1 Exemplo A

A cena possui cerca de 10500 objectos (principalmente polígonos), sendo alguns materiais de superfície especulares. O espaço é formado por 6 células de trabalho e corredores. Cada célula é rodeada de painéis verticais e possui uma secretária em forma de L, sobre a qual estão um monitor de computador, algumas gavetas e outros pequenos objectos (Figura 13).

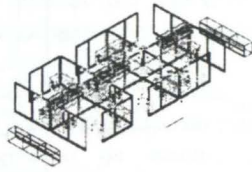


Figura 13 – Geometria

A Figura 14 apresenta uma imagem gerada a partir de uma solução convencional, obtida a partir de métodos empíricos: iluminação ambiente através de arranjo rectangular de luminárias com reflector difuso plano, localizadas no tecto.



Figura 14 – Design empírico

Esta solução empírica não leva em conta alguns aspectos importantes de design:

- Melhor localização das luminárias para efeitos de iluminação ambiente;
- Redução de efeitos de ofuscamento em utilizadores sentados em frente aos ecrãs;
- Fronteiras de sombra nos tampos das secretárias;
- Adequação do tipo de luminárias.

Seria desejável que as soluções de iluminação fossem calculadas com a inclusão destes elementos de design no início do processo de design. Para tal, devem ser definidos objectivos de iluminação adequados:

- Maximização da iluminação nos tampos – emissores de importância;
- Redução do ofuscamento – emissores de importância;
- Restrições de cada luminária – constrições geométricas;
- Restrições de todas as luminárias – constrições geométricas.

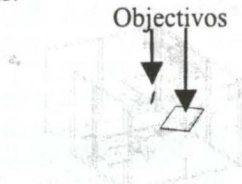


Figura 15 – Objectivos de design

Para simular os efeitos de ofuscamento, associam-se os emissores de importância às faces dos utilizadores, modelados através de polígonos pequenos; para modelar adequadamente a iluminação nos tampos usam-se

polígonos rectangulares maiores (Figura 15).

A solução apresentada na Figura 16 foi calculada com um arranjo alternativo: 5 luminárias do tipo fluorescente com caixa reflectora difusa alinhadas em fila sobre o centro da cena. Os parâmetros de design são:

- x, y – posição da luminária mais à esquerda (em cima da célula mais à esquerda);
- d_1, d_2, d_3, d_4 – espaçamento entre luminárias sucessivas (entre 1.5m e 2.5m).

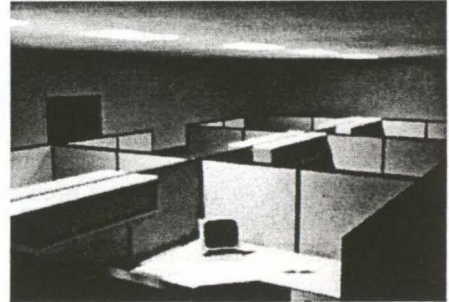


Figura 16 – Design otimizado

A orientação e altura das luminárias foi fixada. Assim, este problema de design de iluminação corresponde a um problema de optimização global dos 6 parâmetros referidos. Como cada luminária possui uma área considerável, não pode ser aproximada por apenas um ponto na determinação da importância recebida; assim, cada luminária é amostrada em 4 pontos da sua face emissora. Em cada iteração de optimização computa-se a importância recebida em 40 pontos (5 luminárias vezes 4 pontos vezes 2 emissores de importância). O valor final da função custo tem uma contribuição positiva por parte dos tampos (pretende-se maximizar iluminação) e uma negativa por parte das faces (pretende-se evitar ofuscamento), sendo a relação entre as contribuições definida pelo utilizador. O resultado patente na Figura 16 é verosímil: as luminárias estão onde seria esperado e a iluminação nos tampos é homogénea. Em cerca de 2300 iterações, o emprego da técnica de aceleração baseada numa *cache* de distribuições de importância reduziu o tempo de processamento para 30% e o número de cálculos de importância para 11% (5200000 de cálculos de importância elementar).

6.3.2 Exemplo B

A geometria patente na Figura 17 representa uma sala inspirada por um espaço real (paredes curvas e iluminação totalmente indirecta).

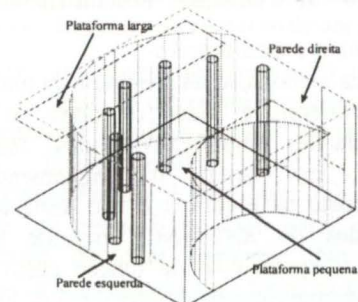


Figura 17 – Geometria

O objectivo do design de iluminação é iluminar indirectamente o centro da sala (a uma altura de 1.5m), usando para tal quatro luminárias tipo foco orientadas para o tecto (o qual não é horizontal). Para tal, definem-se vários polígonos representativos desses objectivos como emissores de importância. As posições e orientações das 4 luminárias são restringidas em função da sua localização na sala. O problema de optimização correspondente deverá determinar os valores óptimos de 20 parâmetros (3 coordenadas e 2 direcções vezes 4 luminárias). Em situações deste tipo (pretende-se maximizar iluminação), o problema pode ser decomposto em 4 subproblemas, cada um relativo a uma luminária (3 coordenadas e 2 direcções), e resolvido separadamente. A Figura 18 apresenta uma função custo adequada (calculam-se as distribuições de importância devidas às fontes de importância modeladas e o valor da função custo é a soma pesada dessas contribuições; os pesos são definidos pelo designer).

```

1. # (x1,x2,x3):posições (x4,x5):direcções
2. if Angle(Dir(x4,x5),(0,0,1))>45° return FAILURE
3. WIL1=Importance(SceneI1,x1,x2,x3,x4,x5)
4. WIL2=Importance(SceneI2,x1,x2,x3,x4,x5)
5. WIL3=Importance(SceneI3,x1,x2,x3,x4,x5)
6. return -(1.0*WIL1+ 2.0*WIL2+ 2.0*WIL3)
    
```

Figura 18 – Função custo

A Figura 19 mostra o modo como a solução evoluiu, para uma das luminárias pretendidas (o plano quadriculado é a plataforma pequena da Figura 17 e as setas 3D representam as soluções sucessivamente encontradas). Da análise da Figura 19 conclui-se que as soluções tendem a evoluir para uma configuração óptima, ie, a luminária pretendida deverá localizar-se no centro da plataforma e ser orientada para o tecto, por forma a maximizar a emissão de luz para o chão da sala.

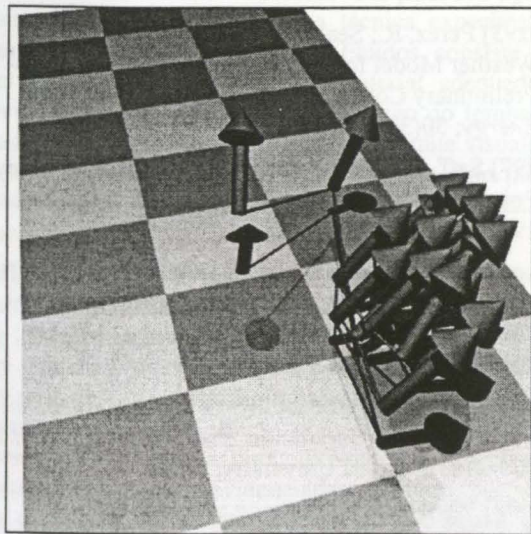


Figura 19 – Evolução de soluções

Na Figura 20 apresenta-se uma imagem gerada com os parâmetros “óptimos” obtidos e com curvas de nível de iluminância (na imagem vêem-se duas das luminárias determinadas). A disposição das curvas de nível parece confirmar a satisfação dos objectivos de design.

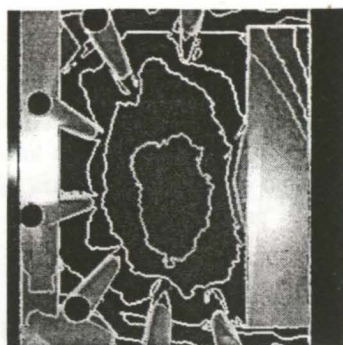


Figura 20 – Solução com curvas de nível de iluminância

6.4 Validação

A metodologia de design de iluminação baseada em objectivos com recurso ao transporte de importância é válida se as condições apresentadas na secção 4.2 e as premissas associadas ao modelo óptico do *RADIANCE* forem respeitadas. O uso de um método heurístico de optimização global não invalida a metodologia, apenas não garante que a solução final obtida seja a óptima. O modo de aumentar a confiança na solução baseia-se na repetição da pesquisa de soluções até que a variância dos resultados seja satisfatória. Em problemas de design adequadamente formulados, a experiência tem mostrado que mais de 5 e menos de 10 pesquisas são suficientes.

O modelo óptico do *RADIANCE* baseia-se num modelo geométrico da óptica: ignoram-se efeitos ondulatórios, a luz é monocromática e o meio não participa nos fenómenos radiantes. Estas restrições são irrelevantes na maior parte dos problemas de design de iluminação do mundo real. Para além da validade teórica do *RADIANCE* em problemas comuns do mundo real, alguns estudos de validação prática ([Ward92] [Mardaljevic95] [Larson98]) mostraram que a validade física realmente existe (apesar do *RADIANCE* ser uma mistura complexa de técnicas determinísticas e estocásticas). Um factor que pode afectar a validade da implementação é a técnica de aceleração descrita na secção 6.2.2. No entanto, quando o parâmetro de vizinhança dessa técnica é inferior ao valor de discretização de posição, testes experimentais mostraram que o erro de aproximação é desprezável.



Figura 21 – Solução esperada versus correcta

Os resultados obtidos nos exemplos apresentados são verosímeis e parecem estar de acordo com o esperado. Porém, a aparente trivialidade dos exemplos é enganadora, dado que o comportamento da luz não é fácil de prever. A Figura 21 mostra um exemplo simples (o

tampo é uma fonte hemisférica de importância e pretende-se uma luminária do tipo foco, perto de uma parede, que maximize a iluminação no tampo). A solução esperada seria ter a luminária sobre a vertical do centro do tampo; no entanto, a melhor solução localiza-se num ponto sobre o tampo em que se maximiza a importância reflectida pela parede (difícil de determinar analiticamente).

7. CONCLUSÕES

Este artigo descreve um algoritmo e uma implementação que ajuda a resolver problemas de iluminação através da especificação dos objectivos de iluminação como dados de entrada do processo de design. O algoritmo é capaz de pesquisar o universo de soluções a fim de determinar soluções "óptimas". O aspecto mais inovador é a transformação de um problema de design num problema de optimização global, através da introdução de objectos emissores "fictícios" e de uma função custo relacionada com os objectivos do problema. O ciclo de pesquisa utiliza um algoritmo de transporte da luz validado, o que garante a correcção radiométrica dos cálculos. Outro aspecto inovador foi o desenvolvimento de uma técnica de aceleração de cálculo que produziu aumentos significativos de desempenho. Os exemplos apresentados mostram que os resultados concordam com a evidência empírica.

7.1 Trabalho Futuro

Para tornar mais geral a aplicação da metodologia usada (a problemas de geometria variável, por exemplo), será necessário melhorar ou descobrir algoritmos de transporte da luz capazes de reaproveitar melhor os cálculos anteriores, investigar novas técnicas de aceleração que explorem a coerência e também procurar métodos de optimização global mais robustos e eficientes. Nesse sentido, estão em curso actividades de investigação no âmbito de mestrado cujos objectivos são:

- Desenvolver novas técnicas de aceleração de cálculo do transporte da luz, baseadas em ideias descritas em [Larson98b].
- Desenvolver métodos de determinação dos cálculos a refazer quando as condições iniciais são alteradas (alterações de geometria, materiais de superfície, etc).

Como resultado dessas actividades, espera-se integrar esses desenvolvimentos no algoritmo descrito neste artigo.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores os comentários e as críticas efectuadas.

9. REFERÊNCIAS

- [Barker97] Barquer, T.; Lighting (Lighting Design in Architecture); *Concepts in Practice Collection*; Batsford, London; 1997.
- [CIE73] CIE; Standardization of Luminance Distribution on Clear Skies; Publication number 22; Paris, CIE; 1973.
- [Costa98] Costa, A.C.; Sousa, A.A.; Ferreira, F.N.; Design de Iluminação; 8º Encontro Português de Computação Gráfica; Coimbra; 1998.
- [Costa99] Costa, A.C.; Sousa, A.A.; Ferreira, F.N.; Lighting Design: a Goal Based Approach Using Optimization; *Rendering Techniques '99*, 317-328, D. Lichinski & G. W. Larson (eds.); *Springer Computer Science*, Springer Verlag, Viena; 1999.
- [Ingber98] Ingber, L.; Adaptive Simulated Annealing; <ftp://ftp.ingber.com/pub>; Lester Ingber Research; 1993-1999.
- [Kawai93] Kawai, J.K.; Painter, J.S.; Cohen, M.F.; Radioptimization - Goal Based Rendering; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, 147-154; SIGGRAPH; 1993.
- [Larson98] Larson, G.; Shakespeare, R.; Rendering with RADIANCE (The Art and Science of Lighting Visualization); Cap. 10-13; Morgan Kaufmann, New York; 1998.
- [Larson98b] Larson, G.; The Holodeck: A Parallel Ray Caching Rendering System; *Proceedings of the Second Eurographics Workshop on Parallel Graphics and Visualisation*; 1998.
- [Mardaljevic95] Mardaljevic, J.; Validation of a Lighting Simulation Program under Real Sky Conditions; *Lighting Resl Technol.*, 27(4), 181-188; 1995.
- [Marks97] Marks, J.; Andalman, B.; Beardlsey, P.A.; Freeman, W.; Gibson, S.; Hodgins, J.; Kang, T.; *et al*; Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, 389-400; SIGGRAPH; 1997.
- [Perez93] Perez, R.; Seals, R.; Michalsky, R.; All Weather Model for Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation; *Solar Energy*; 50(3), 235-245; 1993.
- [Saff97] Saff, E.B.; Kuijlaars, A. J.; Distributing Many Points on a Sphere; *The Mathematical Intelligencer*, 19(1); 1997.
- [Schoeneman93] Schoeneman, C.; Dorsey, J.; Smits, B.; Arvo, J.; Greenberg, D.; Painting with Light; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, 143-146; SIGGRAPH; 1993.
- [Veach97] Veach, E.; Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation; PhD Thesis, Chapter 7, 201-218; Stanford University; 1997.
- [Ward92] Ward, G.J.; Measuring and Modeling Anisotropic Reflection; *Computer Graphics*; Chicago; 1992.
- [Ward94] Ward, G.J.; The Radiance Lighting Simulation and Rendering System; *COMPUTER GRAPHICS Proceedings*, 459-472; SIGGRAPH; 1994.