

**O MÉTODO RADIOSIDADE
EM UM AMBIENTE DE SÍNTESE DE
IMAGENS FOTO-REALÍSTICAS**

Mário de Seixas Queiroz
(DCA-FEE- UNICAMP)

Léo Pini Magalhães
(DCA-FEE- UNICAMP)

Página em branco na versão original impressa.

O Método Radiosidade em um Ambiente de Síntese de Imagens Foto-Realísticas

Mário de Seixas Queiroz
Léo Pini Magalhães

Departamento de Engenharia de Computação e
Automação Industrial
Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP, CP 6101
CEP 13081 - Campinas - SP
e-mail: mario@leblon.fee.unicamp.ansp.br, leopini@ccvax.unicamp.ansp.br
fax : (0192) 39-1395. fone : (0192) 39-7372

Abstract

This paper presents the radiosity method as part of a photorealistic image synthesis environment called PROSIM - Photorealistic Image Synthesis and Prototyping. The basic theory of the radiosity method, as well as some of its extensions, are presented. The implementation of such methods are discussed and finally, some results are shown, in order to demonstrate the potential of the radiosity approach.

I Introdução

Nos últimos anos, a síntese de imagens foto-realísticas vem sofrendo acentuados avanços com a introdução de diversos métodos cujos resultados tem se mostrado muito bons. Dentre estes métodos dois se destacam por apresentarem imagens de excelente qualidade, são eles o método Ray-Tracing e o método Radiosidade.

O método Ray-Tracing foi introduzido por Whitted, em 1980 [Whit80]. O método Ray-Tracing tem como principais qualidades a correta simulação das componentes especulares da iluminação e a possibilidade de modelagem dos ambientes através de primitivas CSG. Suas desvantagens são a dificuldade na simulação de componentes difusas da iluminação, a apresentação de sombras sem levar em conta iluminação indireta e, principalmente, a dependência intrínseca com a posição do observador.

O método Radiosidade proposto, em 1984, por Goral et al [Gora84], tem como objetivo simular as interreflexões difusas em ambientes fechados e está fundamentado em técnicas utilizadas em transferência de calor por radiação. As principais qualidades do método são a independência com relação à posição do observador e a possibilidade de utilização de fontes de luz extensas, bem como a correta simulação dos efeitos da iluminação difusa. A sua maior desvantagem consiste na dificuldade na simulação de reflexões e transmissões especulares.

Com o objetivo de estudar estes e outros métodos existentes, bem como proporcionar um ambiente de apoio à criação e desenvolvimento de seqüências de animação utilizando computação gráfica, iniciou-se na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, um projeto denominado PROSIM - Prototipação e Síntese de Imagens Foto-Realísticas [Bann89]. No âmbito do PROSIM, o Sistema Radiosidade representa os esforços realizados a partir do estudo e implementação do método Radiosidade.

Neste sentido, o presente trabalho visa apresentar os resultados obtidos com o Sistema Radiosidade, que conta atualmente com três versões implementadas. Apresentaremos, inicialmente, a teoria básica do método Radiosidade. Em seguida, discutiremos as técnicas de cálculo de form-factors e algumas extensões que visam a melhoria da qualidade e do desempenho do método. Finalmente, a implementação do Sistema Radiosidade, bem como alguns resultados e comentários serão apresentados.

II A Teoria

O Método Radiosidade descreve a distribuição da iluminação difusa em um ambiente, através do estudo da transferência de energia luminosa entre os diversos componentes do ambiente. As suposições básicas do método são:

- o ambiente é fechado;
- as superfícies que compõem o ambiente são discretizadas em polígonos planos;
- toda emissão e reflexão dentro do ambiente é idealmente difusa, ou seja, a energia luminosa é refletida e/ou emitida com a mesma intensidade em todas as direções.

II.1 Equacionamento

Inicialmente, vamos introduzir alguns termos:

- Patch: Polígono plano no qual as superfícies são discretizadas.
- Radiosidade: (B) Energia que emerge de um patch. É a quantidade básica que se deseja calcular para cada patch do ambiente. (Energia por unidade de área por unidade de tempo);
- Emissão: (E) Energia emitida pelo próprio patch, como no caso das fontes de luz. (Energia por unidade de área por unidade de tempo);
- Coeficiente de reflexão: (ρ) Fração da energia que é refletida pelo patch. (adimensional, $0 < \rho < 1$);
- Form-Factor: (F) Fração de energia que emerge de um patch e incide em outro. (adimensional, $0 \leq F \leq 1$).

A partir destes termos podemos definir o que é a radiosidade de um patch.

A luz que emerge de um patch depende da luz que ele emite, somada à luz que ele reflete. A luz refletida depende, por sua vez, da luz que emerge de todos os outros patches do ambiente. Uma fração da luz que emerge dos outros patches pode atingir o patch em questão. Esta fração depende da posição relativa entre os patches, o form-factor, e do coeficiente de reflexão do patch. Este relacionamento pode ser descrito pela seguinte equação:

$$(1) \quad B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^N B_j F_{ij}, \text{ para } i = 1, \dots, N.$$

onde:

B_i : energia radiante (luz) que emerge da superfície i ,

E_i : energia radiante emitida pela superfície i ,

ρ_i : reflectividade difusa da superfície i ,

F_{ij} : fração da energia emergente da superfície j que atinge a superfície i , 'form-factors',

N : número de superfícies que compõem o ambiente.

Assume-se que a radiosidade, a emissão e o coeficiente de reflexão não variam dentro dos patches.

II.2 Formulação Matricial e Solução

Claramente, a radiosidade de cada patch do ambiente é dependente das radiosidades de todos os outros patches. Isto resulta em um sistema de equações lineares, cuja ordem depende da quantidade de patches no ambiente.

Matricialmente temos:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \cdots & -\rho_1 F_{1N} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & \cdots & -\rho_2 F_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\rho_N F_{N1} & -\rho_N F_{N2} & \cdots & 1 - \rho_N F_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix}$$

É importante notar algumas propriedades especiais da matriz acima.

- O form-factor de um patch em relação a ele mesmo é sempre zero, pois pelo fato do patch ser um polígono plano, nenhuma fração da energia que emerge deste patch o atinge;
- A soma dos form-factors de um patch em relação aos outros patches do ambiente deve, por definição, ser igual à unidade;
- O coeficiente de reflexão de um patch é sempre menor que um.

Estas propriedades garantem que a matriz é estritamente diagonal dominante, assim o Método iterativo de Gauss-Seidel é bastante indicado para a resolução deste sistema, pois a convergência da solução está garantida.

A cor do objeto é normalmente definida pela sua emissão e seu coeficiente de reflexão em algumas faixas de comprimento de onda (normalmente vermelho, verde e azul), assim o sistema linear deve ser resolvido para cada uma das faixas de interesse. Os form-factors, contudo, são sempre os mesmos, dado que eles são função apenas da geometria do ambiente e, conseqüentemente, independentes de qualquer consideração de cor.

II.3 Visualização

Uma vez determinadas as radiosidades dos patches requer-se a apresentação da imagem em um terminal gráfico. Neste ponto e, somente neste, é necessário definir um observador e uma tela de projeção. Permitindo, assim, que seqüências animadas da mesma cena possam ser visualizadas sem que o ambiente seja reprocessado a cada mudança de posição do observador.

Como a radiosidade é assumida constante ao longo dos patches, um algoritmo de shading é necessário durante o processo de visualização. O Algoritmo de Gouraud é bastante efetivo neste caso, pois somente efeitos de iluminação difusa estão sendo considerados.

III Cálculo de Form-Factors

Como foi descrito, o form-factor descreve a fração da energia que emerge de uma superfície e incide diretamente em outra superfície. O form-factor entre duas superfícies distintas é calculado a partir da seguinte equação:

$$(3) \quad F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi r^2} dA_j dA_i$$

onde: ϕ é o ângulo entre a normal à superfície e a linha que as une.

Por se tratar de uma integral dupla de superfície, a equação não possui uma solução analítica geral. Existe, entretanto, um conjunto de fórmulas que fornecem o form-factor entre superfícies de formatos e em orientações particulares. Para os casos mais complexos, diversos métodos numéricos foram desenvolvidos.

III.1 Algoritmo do Hemi-Cubo

Dentre os métodos numéricos desenvolvidos, um em particular se tornou bastante popular, o método do hemi-cubo [Cohe85]. Este método tem sua origem em um procedimento geométrico conhecido como Análogo de Nusselt [Spar78], que se propõe a calcular o form-factor entre um elemento de área dA e um polígono plano P . O procedimento proposto consiste, inicialmente, no posicionamento de um hemisfério de raio unitário em torno do elemento de área dA , orientado em torno da normal de dA . O polígono P é, então, projetado radialmente na superfície do hemisfério e da superfície do hemisfério, ortogonalmente na base do hemisfério. A fração da área do círculo coberta pela projeção de P é igual ao form-factor entre dA e P .

O método do hemi-cubo sugere o posicionamento de um hemi-cubo (metade de um cubo) em torno de um patch P_i do ambiente. Cada lado do hemi-cubo é subdividido em células regulares, onde

cada célula define uma direção e um ângulo sólido elementar. A cada célula é, então, associado um form-factor elementar. Ao se projetar um outro patch P_j nas faces do hemi-cubo, a somatória dos form-factors elementares correspondentes às células cobertas pela projeção, define o form-factor entre os patches em questão.

O método do hemi-cubo, embora eficiente permitindo calcular form-factors entre superfícies com geometrias complexas, possui duas importantes falhas.

Primeiramente, desde que somente a integral interna de (3) é avaliada, imprecisões não desprezíveis podem ocorrer se o tamanho de P_i for grande em relação à distância $P_i - P_j$. Esta falha pode ser parcialmente contornada repetindo-se o método em vários pontos de P_i e tomando-se a média dos form-factors calculados. Parcialmente, pois, se os patches estão muito próximos este procedimento exigirá que o método seja repetido em um número excessivo de pontos, aumentando muito o tempo de processamento da imagem.

Em segundo lugar, como o hemi-cubo subdivide o hemisfério em pequenos ângulos sólidos regularmente espaçados, problemas de aliasing podem ocorrer. Patches pequenos podem ser projetados em apenas uma ou duas células do hemi-cubo, ou ainda, não ser projetados se a resolução do reticulado das faces do hemi-cubo não for compatível, causando imprecisões no cálculo dos form-factors. Estes problemas podem ser melhorados aumentando-se a resolução do hemi-cubo, entretanto outros métodos são necessários à medida que se aumenta a complexidade dos ambientes.

III.2 Algoritmo Híbrido

A preocupação com a qualidade dos form-factors calculados utilizando-se o método do hemi-cubo levou Baum, a propor, em 1989 [Baum89], um método, onde os form-factors são calculados via hemi-cubo nos casos onde os patches estão suficientemente distantes ou, caso contrário, através de um algoritmo híbrido onde a integral interna de (3) é avaliada analiticamente através de uma fórmula desenvolvida com base no teorema de Stokes e a integral externa é avaliada numericamente utilizando-se o hemi-cubo para determinar a visibilidade entre os patches.

III.3 Outros Métodos

Outros métodos tem sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos com o intuito de melhorar o cálculo de form-factors. Dentre os métodos propostos, os que mais tem se destacados são aqueles que estão baseados na técnica de ray-tracing [Mall88], [Sill89] e [Wall89].

Recentemente, Baranosky [Bara91], em sua tese de mestrado apresentou um novo método onde é possível o cálculo de form-factors entre superfícies curvas convexas.

IV EXTENSÕES AO MÉTODO RADIOSIDADE

Nesta seção, algumas extensões, que procuram manter o caráter puramente difuso do método Radiosidade são apresentadas.

IV.1 Algoritmo de Sub-estruturação e subdivisão adaptativa

Cohen, em 1986 [Cohen86], procurando refinar a qualidade do sombreado em ambientes com superfícies oclusas, propôs um algoritmo eficiente onde as regiões com altos gradientes de radiosidade são adaptativamente subdivididas. Neste algoritmo, o ambiente é subdividido inicialmente em poucos patches, que atuarão como iluminadores do ambiente. Determina-se, então as radiosidades destes patches, aqueles que possuírem um gradiente de intensidade superior a um valor predeterminado são subdivididos mais refinadamente, e as radiosidade de novo patches são calculadas a partir da solução inicial já calculada, reduzindo assim, os custos computacionais de cálculo de novos form-factors e novas resoluções do sistema linear. Cohen inclui, também, um algoritmo que permite uso de texturas no método Radiosidade.

IV.2 Efeitos de Transmissão Difusa

Nesse mesmo ano, Rushmeier [Rush86] introduziu no método Radiosidade, uma extensão que permite o correto modelamento de superfícies difusas transparentes. Rushmeier define um novo form-factor,

que consiste da fração de energia luminosa que atinge o patch transparente pelo lado de trás. Na prática, esse novo form-factor é calculado da mesma maneira que os form-factors tradicionais, com a diferença de que o hemi-cubo é posicionado no lado de trás do patch. Com isto, a equação 1 é reescrita e assume a seguinte forma:

$$(4) \quad B_i = E_i + \sum_{j=1}^N [\rho_i F_{ij} + \tau_i T_{ij}] B_j$$

onde:

τ_i = transmissividade difusa do patch i ,

T_{ij} = form-factor de transmissão.

A resolução do sistema linear e a visualização são feitas da mesma maneira que no algoritmo tradicional.

IV.3 Algoritmo de Refinamento Progressivo

Até 1988, todas as implementações do método Radiosidade baseavam-se no cálculo das radiosidades segundo o padrão proposto por Goral. Neste ano, Cohen [Coh88] apresentou uma nova forma de implementação do método, onde o cálculo das radiosidades nas superfícies passou a ser feito em função das radiosidades que são emitidas por uma superfície e não mais em função das que são recebidas pela mesma. Com essa nova implementação, Cohen conseguiu reduzir drasticamente a quantidade de memória necessária ao armazenamento dos form-factors. Ainda mais, com os form-factors sendo calculados progressivamente, surgiu a possibilidade de se visualizar a imagem durante o processo, conseguindo com isso um acompanhamento contínuo e gradual da formação da imagem até o resultado final, permitindo a utilização do método em aplicações que requeiram interatividade.

V O Sistema Radiosidade

Nesta seção, apresentamos, inicialmente, uma descrição mais detalhada do ambiente PROSIM, em seguida, apresentamos um breve histórico do Sistema Radiosidade. Uma descrição geral da implementação do sistema é, então, discutida e, finalmente alguns resultados são apresentados.

V.1 O Ambiente PROSIM

O PROSIM pretende especificar e implementar um sistema flexível, que possa ser utilizado em atividades didáticas, de pesquisa e eventualmente comerciais.

A partir da cena imaginada, o usuário modela-a através da interface interativa. Esta interface é composta do Sistema de Modelagem Geométrica e de Atributos e do Sistema de Pré-Visualização. O Sistema de Modelagem permite ao usuário posicionar e definir atributos (cor, textura, transparência, etc...) dos objetos que compõem a cena e o Sistema de Pré-Visualização fornece uma estimativa rápida do posicionamento dos objetos na cena.

A modelagem dos objetos é feita a partir de primitivas (esfera, cone, cilindro, cubo, etc...) construindo-se uma árvore CSG. Estes dados podem ser então convertidos para uma representação B-Rep, dependendo do método de síntese de imagem que se deseja utilizar.

Uma vez modelada a cena, o conjunto de dados que a representam são transferidos a um dos Sistemas de Síntese de Imagens: Radiosidade, Ray-Tracing (+ phong, ...) e Scan-Line (+ phong, gouraud, ...). Estes sistemas implementam os métodos de síntese de imagens de mesmo nome, que são os responsáveis pelas imagens fotorealísticas.

Os Sistemas de Visualização processam as imagens para que estas possam ser adequadamente visualizadas nos dispositivos gráficos existentes.

A arquitetura modular do PROSIM possibilita a inclusão de novos sistemas e, também, a sua adequação às diversas aplicações que queiram utilizá-lo.

V.2 O Desenvolvimento do Sistema Radiosidade

O Sistema Radiosidade conta, atualmente, com três versões distintas, cada qual implementando uma das diferentes extensões apresentadas no item IV. Todas as implementações foram desenvolvidas em linguagem C, utilizando estações SunSparc.

Versão 1.5 A primeira versão do Sistema Radiosidade foi baseada no Algoritmo do Hemi-cubo [Cohe85], tendo o intuito de ser uma versão experimental, que possibilitasse a verificação das dificuldades computacionais envolvidas, bem como a validação dos resultados a serem obtidos. Esta primeira versão permitiu um excelente aprendizado e entendimento dos algoritmos e processos computacionais exigidos pelo método Radiosidade. Os resultados obtidos, embora simples, foram bastante positivos, conforme pode ser verificado nas imagens (1a e 1b).

Versão 2.0 Com base na qualidade das imagens obtidas com a versão experimental, decidiu-se pela continuidade do estudo do método, procurando-se, então, uma melhoria na qualidade das imagens a serem produzidas, com vistas a integração definitiva do sistema ao PROSIM. Neste sentido, optou-se pela implementação do algoritmo de sub-estruturação e subdivisão adaptativa [Cohe86], com a inclusão de efeitos de transmissão difusa [Rush86]. Uma descrição mais detalhada desta implementação pode ser encontrada em [Quei91a]. Os resultados obtidos apresentaram um grau de qualidade excelente, como pode ser notado nas imagens (2a, 2b e 2c).

Versão 3.0 A terceira versão do sistema foi implementada com o intuito de um estudo mais aprofundado do método Radiosidade. Para tanto, o algoritmo de Refinamento Progressivo [Cohe88] foi escolhido por apresentar uma metodologia nova, que permitia a produção de imagens de alta complexidade, que até então não poderiam ser produzidas. No algoritmo de refinamento progressivo, a utilização do algoritmo do hemi-cubo acarreta imprecisões no cálculo dos form-factors devido à frequente violação da suposição de proximidade. Assim, para contornar este problema, optou-se pela implementação do algoritmo híbrido [Baum89]. Em [Quei91b] pode ser encontrada uma descrição mais detalhada desta implementação. Os resultados obtidos, imagens (3a, 3b e 3c), provam por si só a qualidade dos algoritmos.

V.3 Descrição da Implementação do Sistema

Entrada de Dados Todas as três versões utilizam o mesmo tipo de entrada de dados, que consiste de um arquivo texto contendo uma descrição do ambiente, através de uma pequena linguagem utilizada por todos os sistemas de visualização existentes no PROSIM. A descrição geométrica dos objetos componentes da cena é feita por meio de uma representação B-rep tipo half-edge modificado [Made90].

Estrutura Interna de Dados O Sistema Radiosidade utiliza internamente uma descrição do ambiente através de polígonos triangulares ou quadrangulares. Em cada versão estão definidas diferentes estruturas de dados, de acordo com as necessidades envolvidas em cada implementação, mantendo, contudo, a mesma descrição geométrica do ambiente entre as diferentes versões. As versões 2.0 e 3.0 compartilham estruturas muito semelhantes, consistindo em uma árvore, onde cada nó é um vetor e, cada elemento deste vetor aponta para um subnó distinto. No caso da versão 1.5, temos simplesmente um vetor de polígonos.

Estrutura de Processamento As três versões estão divididas nos seguintes módulos:

- Módulo de pré-processamento - responsável pela entrada de dados e pelo processamento de subdivisões de polígonos.
- Módulo de cálculo de form-factors - responsável pelas diversas etapas do cálculo de form-factors.
- Módulo de resolução do sistema linear - responsável pela preparação e resolução do sistema linear¹.
- Módulo de visualização - responsável pela apresentação do ambiente processado em terminais gráficos.

A estrutura modular do sistema além de possibilitar o reaproveitamento de parte do código implementado em versões anteriores, conduz à manutenção da estrutura intrínseca dos algoritmos.

¹módulo não existente na versão 3.0

Visualização Como as radiosidades são assumidas constantes ao longo dos patches, é necessário que sejam determinadas as radiosidades nos vértices dos patches, para que um algoritmo de shading possa ser utilizado. Nas três implementações o mesmo procedimento é adotado para a determinação das radiosidade nos vértices do patches.

Inicialmente, é criada uma lista com as relações de adjacência entre vértices e patches. A partir desta lista e tendo as radiosidades dos patches calculadas, a radiosidade em um vértice é determinada através da interpolação linear das radiosidades dos patches vizinhos a este vértice.

Uma vez, determinadas as radiosidades nos vértices, um processo de interpolação bilinear é implementado para a determinação das cores de cada porção visível do ambiente, para uma dada posição de observação.

V.4 Resultados

Os resultados apresentados abaixo, embora, um tanto simples, representam muito bem as potencialidades do método.

Versão 1.5 Dois ambientes foram processados utilizando esta versão do sistema. O primeiro consiste de um cubo centrado em outro cubo que serve de fechamento para o ambiente (imagem 1a). A fonte de luz está na parte superior do cubo externo. O segundo ambiente consiste de uma bola apoiada em um pedestal, com a fonte de luz posicionada na face frontal (não visível) (imagem 1b).

Versão 2.0 Desta versão, apresentamos três ambientes. O primeiro consiste de um cubo dentro de outro, assim como acima (imagem 2a). O segundo consiste de uma pirâmide de base quadrada e oca. As faces da pirâmide são difusamente transparentes e, a fonte de luz está na base interna da pirâmide (imagem refim2b). O terceiro ambiente consiste de uma sala simples com uma mesa, uma estante e um abat-jour sobre a mesa, além de duas luminárias no teto (imagem 2c).

Versão 3.0 Outros três ambiente são apresentados. O primeiro, consiste, novamente, em um cubo dentro de outro. Utilizamos este ambiente para mostrar a convergência do algoritmo de refinamento progressivo (imagem 3a). O segundo ambiente consiste em dois paralelepípedos posicionados em ângulo, a fim de realçar os efeitos de sombreamento. Uma vista frontal e uma vista lateral são apresentadas (imagem refim3b). O terceiro ambiente, é o mesmo ambiente que na imagem 2c, com pequenas alterações (imagem 3c).

É importante notar a melhoria da qualidade das imagens a medida que o sistema foi sendo aprimorado, incorporando melhores efeitos ópticos e cálculos mais precisos de form-factors.

VI Cometários finais

O método Radiosidade tem provado simular corretamente as interreflexões difusas em ambientes fechados, possibilitando a síntese de imagens com alto grau de realismo e que não poderiam ser modeladas utilizando-se os métodos já existentes. Apesar de suas qualidades, o método tradicional ainda possui uma série de dificuldades como a lentidão no cálculo de form-factors, a precisão da imagem depende da discretização do ambiente, além de ser somente aplicável a ambientes estáticos.

As extensões que vêm sendo introduzidas permitiram diversos avanços na obtenção de imagens de melhor qualidade, principalmente com a remoção da restrição de que as superfícies sejam perfeitamente difusas. Outras extensões tem procurado reduzir os altos custos computacionais existentes no método tradicional, principalmente no tocante ao cálculo dos 'form-factors'.

Apesar da qualidade das imagens já obtidas, o método RADIOSIDADE ainda não apresenta imagens suficientemente realistas, em função dos problemas de 'aliasing' devido ao relaxamento das hipóteses básicas dos algoritmos de cálculo de form-factors, às dificuldades de modelar a participação do meio de transporte da luz e também a dificuldade de se modelar diversos fenômenos naturais ou ambientes cuja geometria ou topologia não sejam constantes.

Para finalizar, deve-se frisar que, tendo o método RADIOSIDADE uma base física precisa através do modelamento correto da propagação da luz, este certamente servirá de base a novos modelos de iluminação global, que simulem as distribuições espectrais e espaciais da energia luminosa e que sejam também fisicamente válidos.

Apesar das deficiências existentes nos algoritmos implementados, o Sistema Radiosidade vem permitindo um excelente estudo dos processos teóricos e práticos envolvidos, bem como está proporcionando mais uma ferramenta para a síntese de imagens realísticas. Pretendemos continuar a desenvolver novas implementações do sistema, com o intuito principal de aperfeiçoar as técnicas de cálculo de form-factors.

VII Agradecimentos

Este trabalho só foi possível graças ao apoio da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através de concessão de auxílio a nível de iniciação científica - processo 89/2223-6. Gostariamos de agradecer ao projeto ETHOS pela cessão dos equipamentos Sun-Sparcstation, durante o início do desenvolvimento deste projeto. Agradecemos também a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Referências

- [Bann89] Bannwart, C.Z. et al., "PROSIN - Projeto em Síntese de Imagens", *Anais do II SIBGRAPI*, pp 395-400, 1989.
- [Bara91] Banarosky, G. V. G., "Aplicação de Radiosidade à Síntese de Imagens de Objetos Formados por Superfícies Curvas", Dissertação de Mestrado, UFRGS-PGCC, Porto Alegre, abril, 1991.
- [Baum89] Baum, D. R. et al., "Improving Radiosity Solutions Through the use of Analytically Determined Form-Factors", *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, 23(3):325-334, 1989.
- [Cohe85] Cohen, M. F. and D. P. Greenberg, "The Hemi-Cube, A Radiosity Solution for Complex Environments", *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, 19(3):31-40, 1985.
- [Cohe86] Cohen, M. F. et al., "An Efficient Radiosity Approach for Realistic Image Synthesis", *IEEE - Computer Graphics and Applications*, 6(2):26-35, 1986.
- [Cohe88] Cohen, M. F. et al., "A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation", *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, 22(4):75-84, 1988
- [Gora84] Goral, C. M. et al., "Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces", *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, 18(3):213-222, 1984.
- [Gour71] Gouraud, H., "Computer Display of Curved Surfaces", *Communications of the ACM*, 18(6):311-317, 1975.
- [Made90] Madeira, H., "Modelagem Geométrica Através de estruturas Half-Edge", Relatório Técnico, DCA-FEE-UNICAMP, 1990.
- [Mall88] Malley, T. J. V., "A Shading Method for Computer Generated Images", Master's Thesis, The University of Utah, 1988.
- [Quei91a] Queiroz, M. S., "Sistema Radiosidade: Documentação de Implementação - Versão 2.0", Relatório Técnico, DCA-FEE-UNICAMP, 1990
- [Quei91b] Queiroz, M. S., "Sistema Radiosidade: Documentação de Implementação - Versão 3.0", Relatório Técnico, DCA-FEE-UNICAMP, 1990
- [Rush86] Rushmeier, H. E., "Extending the Radiosity Method to Transmitting and Specularly Reflecting Surfaces", Master's Thesis, Cornell University, Ithaca NY, 1986.
- [Spar78] Sparrow, E. M. and R. D. Cess, *Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corp, Washington DC, 1978.
- [Sill89] Sillion, F. and C. Puech: "A General Two-Pass Method Integrating specular and diffuse reflection", *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, 23(3):335-344, 1989.
- [Wall89] Wallace, J. R., K. A. Elmquist and E. A. Haines: "A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity", *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, 23(3):315-324, 1989.
- [Whit80] Whitted, T., "An Improved Illumination Model for Shaded Display", *Communications of the ACM*, 23(6):343-349, 1980.



Imagem 1: (a. - esquerda) cubo dentro de outro 1.; (b. - direita) bola sobre pedestal.



Imagem 2: (a. - topo esquerda) cubo dentro de outro 3.; (b. - topo direita) piramide transparente; (c. - centro) mesa com abat-jour 1.

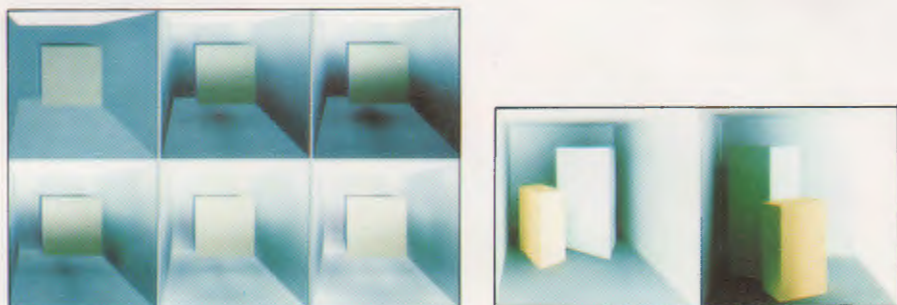


Imagem 3: (a. - topo esquerda) cubo dentro de outro - sequência de convergência 2.; (b. - topo direita) dois cubos em ângulo; (c. - centro) mesa com abat-jour 2.