

INCLUSÃO DE SUPERFÍCIES ESPECULARES EM RADIOSIDADE*

Hugo Ferreira
(DEEC-FEUP)

João Paulo Morais
(DEEC-FEUP)

A. Augusto de Sousa[†]
INESC/DEEC-FEUP, aasousa@porto.inescn.pt

Rui M. Bastos
INESC, rmb@bruna.inescn.pt

Fernando Nunes Ferreira
INESC/DEEC-FEUP, fnf@porto.inescn.pt

Sumário

Neste trabalho apresenta-se um método de inclusão de superfícies especulares puras (espelhos) em radiosidade. Trata-se de um método a aplicar no primeiro dos dois passos tipicamente utilizados nestes casos, correspondendo a um processamento tipo radiosidade pura, com uma extensão que permite o cálculo de factores de forma entre dois polígonos difusos com reflexões intermédias em espelhos.

O método parte da linearização do percurso da energia desde um “patch” difuso emissor, passando por um ou mais espelhos, até um vértice de um patch difuso receptor. Obtida essa linearização, demonstra-se que o delta-factor-de-forma é calculável de um modo semelhante ao caso em que não existem espelhos intercalares. Esta demonstração é feita primeiro com uma só reflexão e posteriormente adaptada ao caso de existirem várias reflexões numa sequência de vários espelhos.

* Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projecto IIRRA - “Interactive Increasing Realism Ray-Tracing Algorithm”, financiado pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, com o número de código PMCT/TIT/848.90.

[†] INESC
Pr. Mompilher 22 Telef. (02) 2094000
4000 PORTO Fax. (02) 2084172



1. Introdução

O algoritmo de radiosidade tem-se afirmado nos últimos anos como um dos melhores algoritmos de “rendering”. No entanto, apresenta alguns problemas cujas soluções, mais ou menos elaboradas e, variadas vezes, com recurso a aproximações, vão aparecendo nos meios científicos dedicados à matéria.

Um desses problemas é a inclusão de superfícies não Lambertianas. Em particular, as superfícies especulares puras, vulgarmente conhecidas por espelhos, tão bem processadas pelo algoritmo de ray-tracing, não são consideradas pelo algoritmo de radiosidade. Existem algumas publicações efectuadas no sentido de resolver o problema, vulgarmente com recurso a dois passos, radiosidade e ray-tracing.

Neste artigo, resume-se o estudo efectuado sobre o assunto e apresenta-se uma solução particular, compatível com anteriores desenvolvimentos efectuados no âmbito do grupo de Computação Gráfica e CAD do INESC.Porto, sobre um algoritmo de radiosidade de domínio público.

2. Algoritmo de Radiosidade

Uma superfície puramente difusa reflecte, em todas as direcções, uma fracção ρ da energia que sobre ela incide. Parte da energia reflectida, atingindo outra superfície, reflecte-se uma segunda vez e incide novamente na primeira, repetindo-se o processo. Esta interacção energética representa-se pela expressão 1, equivalente a um sistema de equações lineares cuja solução é o conjunto de valores de radiosidade B_i .

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij} \quad \text{Eq. 1}$$

Este é o princípio em que o algoritmo de radiosidade se baseia [1] e denomina-se radiosidade por “gathering” (um elemento de superfície ou “patch” recebe energia de todos os outros tal como a expressão 1 sugere). Mais recentemente, apareceu uma

alternativa, denominada radiosidade por “shooting”, também conhecida por “progressive refinement radiosity” que, em oposição ao caso anterior, distribui a energia de um “patch” pelos outros [2].

Num caso e no outro, a maior dificuldade encontrada no algoritmo está no cálculo dos factores-de-forma F_{ij} que são factores geométricos que representam a fracção de energia emitida por um “patch” i que chega a um “patch” j . Uma solução possível é a determinação de factores de forma por meio de um “Z-buffer” aplicado sobre um hemi-cubo. Muito usada nas primeiras versões de radiosidade, tem sido progressivamente abandonada por introduzir um efeito de “aliasing” na distribuição de energia.

Outra solução muito utilizada passa pela adopção de delta-factores-de-forma, calculados de uma área finita, aproximadamente circular, para uma área diferencial supostamente sobre um vértice de um patch [8]. Neste caso calcula-se a transferência de radiosidade de “patch” para vértice.

3. Inclusão de Superfícies Especulares

A descrição feita na secção anterior diz respeito ao tratamento dado pelo algoritmo de radiosidade a cenas compostas exclusivamente por superfícies puramente difusas ou Lambertianas. A inclusão em radiosidade de superfícies especulares, cuja reflexão é direccionada, é complexa e necessita de um tratamento adequado para os quatro mecanismos de transferência de energia: de especular para especular, de especular para difuso, de difuso para especular e de difuso para difuso [3]. Também as superfícies especulares tornam o algoritmo dependente do ponto de observação, pelo que são vulgares os métodos de dois passos.

Immel *et al.* [4] propõem um método que utiliza um cubo-global, discretizado em “pixels” pesados por uma função dependente do ângulo formado pelo plano do patch e o “pixel” amostrado.



No método de Wallace *et al.* [3], cada espelho é considerado como uma janela para uma imagem virtual. Assim, todos os “patches” emissores visíveis de um “patch” receptor, através desta janela ou directamente, transmitem-lhe a sua energia como se de uma transmissão difusa normal se tratasse. O cálculo dos respectivos factores de forma é feito por amostragem via hemi-cubo.

A proposta de Sillion e Puech [9] reformula o problema no quadro geral da equação de “rendering” [5]. Substitui o hemi-cubo por um plano paralelo ao “patch” e usa ray-tracing para o cálculo de factores-de-forma-extendidos.

4. Método Implementado

O grupo de Computação Gráfica e CAD do INESC-Porto tem vindo a desenvolver algum trabalho de investigação no âmbito do algoritmo de Radiosidade. Com base num pacote de software de domínio público, questões como a reconstrução de funções de iluminação e, em particular, a eliminação do efeito de “match band” foram assunto de publicações anteriores [6], [7].

No início deste trabalho foi decidido, por questões de coerência com os trabalhos anteriores, manter o algoritmo do tipo “shooting”, com cálculo de factores de forma “patch” para vértice (num dado instante, o “patch” difuso com a maior energia distribui-a, na forma de radiosidade B, pelos vértices dos outros “patches”).

Em [8], o factor-de-forma de uma área genérica (considerada como “patch” emissor) para uma área diferencial (vértice) calcula-se dividindo o emissor em N delta-áreas; efectua-se uma amostragem lançando um raio do vértice para cada sub-área e determinando a respectiva visibilidade δ_i (0 ou 1); o factor-de-forma total determina-se pelo somatório de todos os delta-factores-de-forma calculados em cada ponto de amostragem:

$$dF_{A_2-dA_1} = dA_1 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \frac{\cos\theta_{1i} \cdot \cos\theta_{2i}}{\pi \cdot r_i^2 + A_2 / N} \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

N = número de delta-áreas

A_2 = área da superfície emissora

dA_1 = área diferencial no vértice

r = distância entre o centro do disco e a área diferencial

θ_1 = ângulo formado pela normal à área diferencial e a recta que a une ao centro do disco

θ_2 = ângulo formado pela normal à superfície emissora e a recta que a une ao centro do disco

A radiosidade num vértice 1 devida a iluminação por uma fonte 2 é assim obtida (note-se a ausência da área diferencial dA_1):

$$B_1 = \rho_2 \cdot B_2 \cdot A_2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \frac{\cos\theta_{1i} \cdot \cos\theta_{2i}}{\pi \cdot r_i^2 + A_2 / N} \quad \text{Eq. 3}$$

onde:

B_1 = radiosidade num vértice do patch 1 devido à iluminação produzida pela fonte 2

B_2 = radiosidade do patch emissor 2 (fonte)

Na base de todo o cálculo encontra-se a divisão do patch emissor em delta-áreas, possuindo cada uma o formato de um disco (aproximação que permite obter expressões mais simples). O factor-de-forma global é o somatório (incluído em Eq. 3) de todos os delta-factores-de-forma calculados pela expressão:

$$dF_{A_2-dA_1} = dA_1 \cdot \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{\pi \cdot r^2 + A_2 / N} \quad \text{Eq. 4}$$

Quando se trata de transferir directamente energia entre dois patches difusos, a aplicação de Eq. 3 é mais ou menos imediata. Mais difícil se torna quando os dois patches se vêem mutuamente através de uma reflexão numa superfície especular. Neste caso, torna-se necessário determinar o percurso da energia e recalcular o correspondente factor-de-forma.

A determinação do percurso efectua-se por ray-tracing quando, durante o processo de “shooting”, o “patch” difuso E (emissor) encontra um outro S , especular puro



(espelho). Nesta situação, é enviado um raio unindo os centros de E e de S , reflecte-se na superfície deste último e, recursivamente, geram-se novos raios até que um “patch” difuso R (receptor) seja encontrado. Na figura 1 representa-se este processo (desenho a cheio) com um espelho.

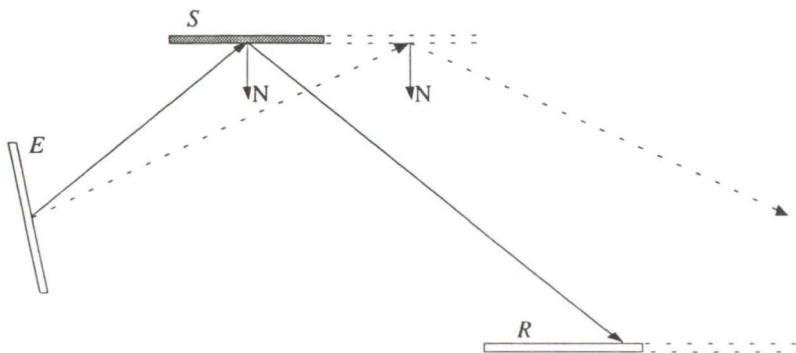


Fig. 1 - O patch emissor E “vê” o patch receptor R através do patch especular S .

A representação feita a tracejado na figura pretende mostrar a necessidade de dividir as superfícies especulares em patches de pequenas dimensões. Se tal não acontecer, o avanço de um patch em S provoca um forte desvio do raio reflectido e o patch final atingido pode vir a situar-se longe de R , o que necessariamente provoca um efeito de “aliasing” na distribuição de energia sobre a superfície de R . Contudo, em comparação com o método de cálculo de factores forma estendidos por meio de um hemi-cubo, que apresenta um efeito semelhante [9], este método torna-se vantajoso, dado que a granularidade da divisão pode ser controlada localmente, em cada superfície especular.

4.1 Reflexão Especular Única

Após ter sido determinado o patch difuso R que é visto pelo emissor E através de um espelho S , é necessário determinar os delta-factores-de-forma do “patch” E para cada vértice de R . Na figura 2 mostra-se o fluxo de energia correspondente.

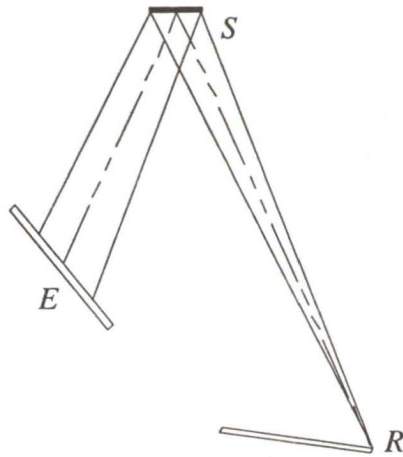


Fig. 2 - O fluxo de energia envolvendo os “patches” E (emissor) e S (espelho) e um de vértice de R (receptor).

De forma a tornar mais simples a visão do problema, o percurso de S para R substitui-se pela sua imagem em S . Admitindo que é grande a granularidade da divisão do espelho (as dimensões de S são muito inferiores às distâncias em causa), então os centros de E e S e o vértice de R são aproximadamente colineares. Após esta operação de linearização, o percurso energético toma o aspecto representado na figura 3.

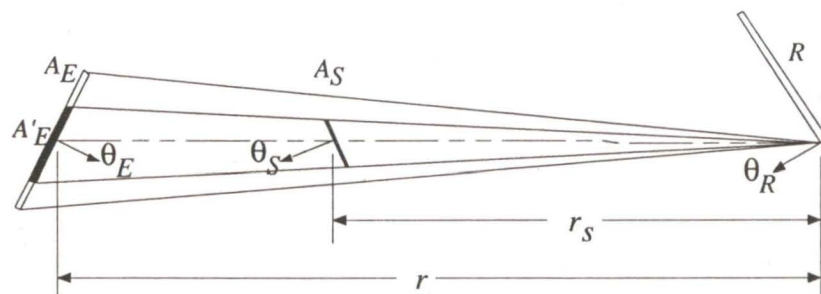


Fig. 3 - O percurso da energia de um patch para um vértice, depois de linearizado.

Da Eq. 4, considere-se apenas o factor $f=f_{DD}$ (com $\theta_E = \theta_2$, $\theta_R = \theta_1$, $A_E = A_2$ e $N=1$):

$$f = f_{DD} = \frac{\cos\theta_R \cdot \cos\theta_E}{\pi \cdot r^2 + A_E} \quad \text{Eq. 5}$$



Em conformidade com a figura 3, f_{DD} representa a componente do delta-factor-de-forma “difuso para difuso” que existiria se toda a área A_E do “patch” emissor fosse directamente visível pelo vértice de R (situação possível se o “patch” do espelho fosse maior), à distância r .

Dado que, do patch emissor, somente a área A'_E influencia a energia que o vértice recebe, então passamos a ter uma componente f atenuada de A'_E/A_E , ou seja:

$$f = f_{DD} \cdot \frac{A'_E}{A_E} \quad \text{Eq. 6}$$

Considere-se a linha recta que une os centros dos três “patches” (a tracejado, figura 3), definam-se os planos perpendiculares a essa linha que passam pelos centros dos patches E e S e projectem-se os patches sobre os respectivos planos. Designemos por A'_{Ep} e A_{Sp} as áreas projectadas respectivamente de A'_E e de A_S :

$$A'_{Ep} = A'_E \cdot \cos\theta_E ; \quad A_{Sp} = A_S \cdot \cos\theta_S \quad \text{Eq. 7}$$

Relacionando as áreas projectadas com as distâncias:

$$\frac{A'_{Ep}}{r^2} = \frac{A_{Sp}}{r_S^2} \quad \text{Eq. 8}$$

Obtemos, das expressões 6, 7 e 8:

$$f = f_{DD} \cdot \frac{A_S \cdot \cos\theta_S \cdot r^2}{A_E \cdot \cos\theta_E \cdot r_S^2} \quad \text{Eq. 9}$$

Esta expressão permite determinar o delta-factor-de-forma “patch” para vértice entre duas superfícies difusas, via um patch especular. O termo cosseno em denominador pode gerar situações de “overflow” pelo que é conveniente eliminá-lo. Substituindo f_{DD} pela sua expressão em Eq. 5, temos:

$$f = \frac{\cos\theta_R}{\pi \cdot r^2 + A_E} \cdot \frac{A_S \cdot \cos\theta_S \cdot r^2}{A_E \cdot r_S^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Com esta expressão é possível efectuar o “shooting” de radiosidade de um patch para um vértice. No entanto, um mesmo vértice R pertence tipicamente a dois ou mais “patches”, pelo que a aplicação directa da expressão anterior resulta em demasiada radiosidade depositada em cada vértice. Uma correcção simples (embora sujeita a algum erro) pode ser introduzida dividindo a radiosidade, calculada com base nas expressões anteriores, pelo número de “patches” que partilham o vértice em questão.

4.2 Sequência de Reflexões Especulares

Na secção anterior mostrámos o cálculo de factores de forma que permitem efectuar a transferência de radiosidade entre duas superfícies difusas (de um “patch” para um vértice), com reflexão num “patch” especular puro. Nesta secção mostra-se como, a partir das deduções efectuadas, se pode generalizar o cálculo para uma sequência de reflexões em vários especulares puros.

Sejam ω_S e ω os ângulos sólidos definidos pelo vértice R e, respectivamente, pelas áreas projectadas A_{Sp} e A_{Ep} (figura 3):

$$\omega_S \approx \frac{A_S \cdot \cos\theta_S}{r_S^2} ; \quad \omega \approx \frac{A_E \cdot \cos\theta_E}{r^2} \quad \text{Eq. 11}$$

Retomando a expressão 9 ficamos com:

$$f = f_{DD} \cdot \frac{\omega_S}{\omega} \quad \text{Eq. 12}$$

Linearize-se mais uma vez o percurso (figura 4) e, admitindo novamente que os centros dos “patches” envolvidos são aproximadamente colineares, defina-se um ângulo sólido para cada um dos “patches” emissor (ω) e especulares (ω_{Sk}).



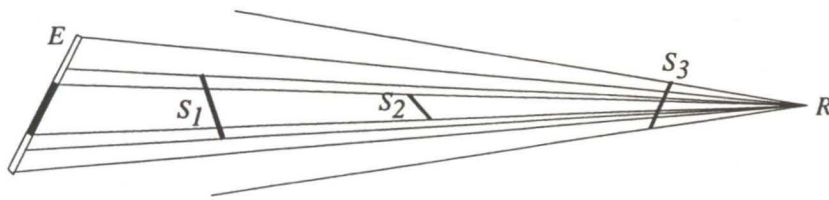


Fig. 4 - A transferência de energia de E para R é limitada pelo “patch” especular S_2

A energia libertada pelo “patch” emissor E que consegue atingir o vértice R é necessariamente limitada pelo menor desses ângulos sólidos (no exemplo da figura, somente a energia reflectida pelo “patch” especular S_2 consegue atingir o vértice R porque define o menor dos ângulos sólidos ω , ω_{S1} , ω_{S2} , ω_{S3}) e portanto,

$$f = f_{DD} \cdot \frac{\omega_{min}}{\omega}, \text{ com } \omega_{min} = MIN(\omega, \omega_{S1}, \omega_{S2}, \dots) \quad \text{Eq. 13}$$

5. Conclusões

O caracter eminentemente Lambertiano do algoritmo de radiosidade dificulta a inclusão de superfícies especulares. Por outro lado, o algoritmo ray-tracing possui características ótimas para o tratamento de tais superfícies. Uma abordagem a dois passos, juntando os dois algoritmos, tem sido apontada como uma solução possível.

Na sequência de trabalhos anteriores sobre radiosidade, apresentámos aqui um método que permite a inclusão de superfícies especulares puras (espelhos) em cenas a processar pelo algoritmo de radiosidade, com cálculo de delta-factores-de-forma “patch” para vértice, e recorrendo ao algoritmo de ray-tracing para a determinação do percurso da energia luminosa desde um “patch” emissor difuso, passando por um ou mais “patches” especulares, até atingir um “patch” receptor difuso. Deduziu-se a expressão matemática que permite determinar o valor aproximado dos delta-factores-de-forma englobando uma reflexão num espelho e estendeu-se o método para o caso de uma sequência de reflexões em vários espelhos.

As principais vantagens do método são a sua fácil aplicação em qualquer algoritmo de

radiosidade que funcione com base em delta-factores-de-forma calculados de “patch” para vértice e a sua eficiência que resulta do facto de ser necessário lançar um único raio luminoso de um “patch” emissor para um “patch” especular.

O maior inconveniente do método apresentado prende-se com o facto de as superfícies especulares necessitarem de ser discretizadas em “patches” de dimensões bastante pequenas quando comparadas com as outras superfícies. Tal deve-se ao efeito de “aliasing” que pode ocorrer no processo de “shooting” de radiosidade, devido às grandes variações de direcção dos raios de luz quando reflectidos por “patches” especulares de grandes dimensões.

Este problema do efeito de “aliasing” é comum a outros métodos conhecidos, baseados vulgarmente no hemi-cubo, para o cálculo de factores de forma. Pensamos que, no nosso caso, o “aliasing” pode ser mais facilmente atenuado, pois pode ser controlado localmente, aumentando a granularidade da divisão dos espelhos, em vez de aumentar a resolução do hemi-cubo. Como o aumento da distância dos espelhos para os outros objectos tende a aumentar o efeito de aliasing, podem adoptar-se granularidades diferentes para os vários espelhos, de acordo com a posição destes relativamente ao resto da cena. Uma subdivisão adaptativa é portanto uma extensão óbvia para solucionar o problema.

O aumento consequente do número de “patches” especulares não é, por si só, grande desvantagem, visto que reflectem imediatamente toda a energia que recebem. Não acumulando energia, não são nunca seleccionados como “shooters” e portanto não fazem aumentar o número de passos do algoritmo.

Também a simplificação de adoptar o menor ângulo sólido numa sequência de reflexões é algo incoerente quanto à energia libertada pelo “shooter” e recebida pelo “patch” difuso final. No entanto, o menor ângulo sólido é, na maioria das vezes, definido pelo primeiro espelho, pelo que o problema só se verifica em casos pontuais.



6. Referências

- [1] GORAL, C. M.; TORRANCE, K. E.; GREENBERG, D. P.; BATTAILE, B;
Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces;
Computer Graphics, (Julho 84), Vol. 18, Nr. 3.
- [2] COHEN, M.; CHEN, S.; WALLACE, J.; GREENBERG, D.;
A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation;
Computer Graphics (Agosto 88), Vol. 22, Nr. 4.
- [3] WALLACE, J. R.; COHEN, M. F.; GREENBERG, D. P.;
*A Two-pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray-Tracing
and Radiosity Methods*;
Computer Graphics (Julho 87), Vol. 21, Nr. 4.
- [4] IMMEL, D. S.; COHEN, M.; GREENBERG, D. P.;
A Radiosity Method for Non-diffuse Environments;
Computer Graphics, (Agosto 86), Vol. 20, Nr. 4.
- [5] KAJIYA, J.J.;
The Rendering Equation;
Computer Graphics, Vol. 20, Nº 4, Agosto 1986
- [6] BASTOS, Rui M.; BARANOSKI, Gladimir V.; SOUSA, A. Augusto;
FERREIRA, F. Nunes;
Uma Alternativa para evitar o Efeito de Mach Band em Radiosidade;
5º Encontro Português de Computação Gráfica, Aveiro, Fevereiro 1993.
- [7] BASTOS, Rui M.; SOUSA, A. Augusto; FERREIRA, F. Nunes;
*Reconstruction of Illumination Functions Using Bicubic Hermite
Interpolation*;
4th EUROGRAPHICS Workshop on Rendering, Paris, Junho 93.
- [8] WALLACE, John R.; ELMQUIST, Kells A.; HAINES, Eric A.;
A Ray-Tracing Algorithm for Progressive Radiosity;
Computer Graphics (Julho 89), Vol. 23, Nr. 3.
- [9] SILLION, F.; PUECH, C.;
A General Two-pass Method Integrating Specular and Difuse Reflection;
Computer Graphics (Julho 89), Vol. 23, Nr. 3.