

# Simulação de som em salas

Thilo Koch  
Grupo Computação Musical - IME - USP

10/11/2014

1 Introdução

2 Traçado estocástico de raios / Ray tracing

3 Modelo de fontes virtuais / Image source model

4 Modelos híbridos

# Simulação

- Simulação para que? experimentação, previsão (planejamento)
- Propriedades acústicas de ambientes / salas:
  - resposta impulsiva,
  - tempo de reverberação, decaimento inicial,
  - inteligibilidade, clareza, impressão espacial.
- Nos tempos pré-computação: aproximação pela experiência prática, modelos miniaturizados (ultra som).

Inteligibilidade - Primeiras reflexões ajudam na inteligibilidade da fala

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Clareza

*Para música:  $C_{80}$ , para fala  $C_{50}$*

Impressão espacial - Primeiras reflexões aumentam impressão espacial

$$D = \frac{\int_{5ms}^{80ms} (p \cos \vartheta)^2(t) dt}{\int_5^{80ms} p^2(t) dt}$$

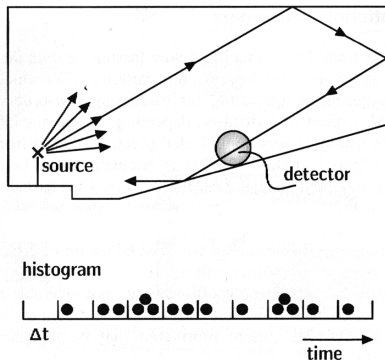
# Traçado estocástico de raios / *Ray tracing*

Pressuposto do modelo:

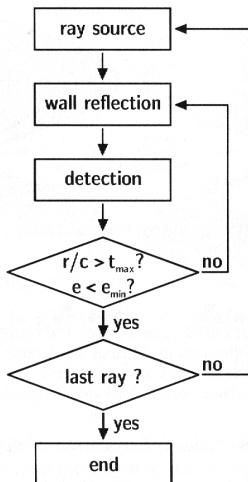
- Som é formado por partículas
- Raio de som: linha de transporte de partículas sonoras
- Propriedades das partículas:
  - Energia - que sofre atenuação e absorção ao longo do raio ( $E$ )
  - Velocidade ( $c=340\text{m/s}$ ) direcionada ( $\vec{v}$ )
- Paredes são polígonos com coeficientes de reflexão e espalhamento ( $\underline{R}$ ,  $S$ )
- Detectores são esferas (com raio  $r_d$ )

# Visão geral

- Fonte sonora emite impulso de partículas em todas as direções (diretividade de fontes é simulada pela densidade angular de partículas)
- Reflexão na parede: mudança de direção e absorção para cada partícula individualmente
- Detecção: registra partículas que "batem" no detector com os respectivos tempos de chegada e energias



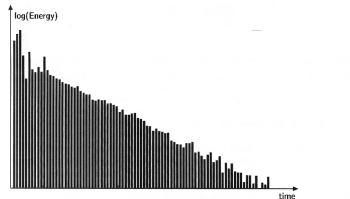
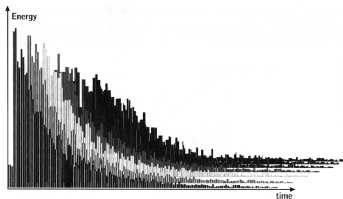
# O algoritmo



- para cada partícula / raio (N)
- Reflexão na parede:
  - Testar para todas paredes se o raio coincide (teste ponto no polígono)
  - Aplicar absorção da parede ( $\underline{R} * E_0$ )
  - Calcular nova direção especular (adicional: espalhamento aleatório)
- Detecção:
  - distância perpendicular entre raio sonoro e detector < raio do detector → impacto
  - registrar no *timeline*
- $t_{max}$ : tamanho da resposta impulsiva
- $e_{min}$ : limiar de energia
- variação: aniquilação na parede

# Apresentação de resultados

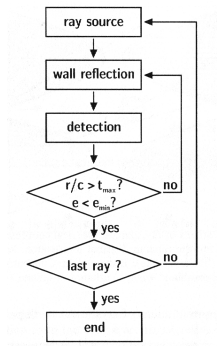
- Histograma das "chegadas" com as respectivas energias relativas
- → resposta impulsiva (IR)
- repetir para todas faixas de frequência de interesse
- Resolução razoável na faixa de milisegundos
- a partir da resposta impulsiva podem ser calculados os valores das propriedades acústicas



# Reprodutibilidade e Erro

- Obviamente: aumentar  $N \rightarrow$  menos erro por flutuações estocásticas, melhor reprodutibilidade
- variação:  $\sigma_E = 4.34 \sqrt{\frac{V}{N\pi r_d^2 c \Delta t}}$  (método de multiplicação de energia)
- Erros e limites sistemáticos do modelo:
  - dados de entrada: modelo da sala, coeficientes de absorção e espalhamento
  - modelo geométrico de ondas sonoras (frequência de Schroeder,  $\lambda \ll$  tamanho da sala)

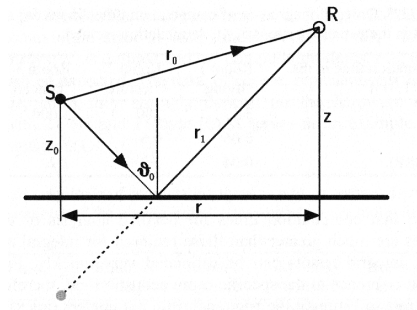
# Custos computacionais



Custos computacionais:

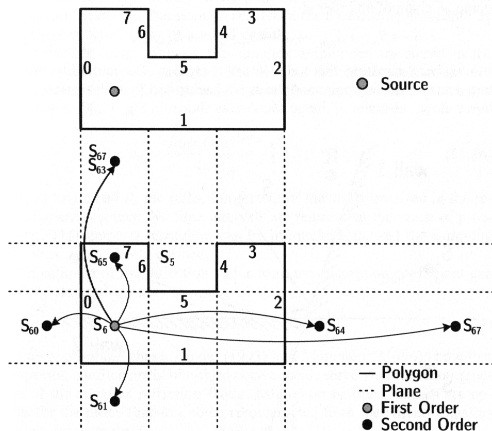
- laço interno:  $\tau \approx n_p t_p + n_d t_d + t_c$
- laço externo:  $t_{calc} = N \bar{n} t_{max} \tau$
- $\bar{n}$  = número médio de reflexões que uma partícula sofre por segundo
- otimizações: particionamento do espaço (por exemplo *Binary Space Partitioing* - BSP)

# Modelo de fontes virtuais / *Image source model*



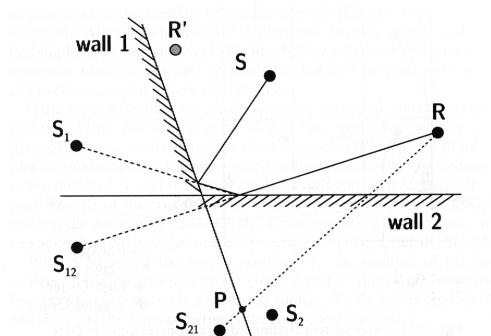
- Observação: posição percebida da fonte refletida é a posição espelhada atrás da parede
- Válido apenas para paredes lisas (do ponto de vista da onda sonora) porque o modelo não trata de espalhamento
- Cramer (1948): primeiro modelo com salas geometricamente simples; Allen-Berkley / Borish (1979 / 1984): para poliedros arbitrários

# O algoritmo



- 1 Criar as fontes virtuais espelhadas em todas as paredes
- 2 Testar audibilidade das fontes
- 3 Criar a partir dessas fontes virtuais (audíveis) as fontes virtuais de ordem maior
- 4 Repetir os passos 2 e 3 até a distância entre as fontes virtuais e o ouvinte  $> t_{max}C$

# Teste de audibilidade



- 1 Testar para cada fonte virtual
- 2 Teste: a linha que conecta fonte virtual com ouvinte cruza o plano do último espelhamento dentro da sala?
- 3 → teste "ponto no polígono" (*point-in-polygon test*)
- 4 estratégias de particionamento do espaço podem ser aplicadas

# Os resultados

Para obter a resposta impulsiva tem que registrar cada fonte no histograma.

- $E = E_0 \prod_{k=1}^N R_k$
- $t_{atraso} = r_{FO}/c$
- resolução temporal pode ser escolhida livremente
- sem difração e espalhamento, não considera obstáculos / objetos nas salas

Custos computacionais:

- número de fontes virtuais cresce exponencialmente com o número de fontes virtuais audíveis cresce  $\propto t^3$  (Cramer 1948)
- para cada fonte  $\propto n_p t_{point-in-poligon}$
- para salas retangulares o teste não é necessário
- traçado determinístico de raios para acelerar teste de audibilidade (por ex. *pyramid tracing*)

# Incertezas sistemáticas

Os modelos são válidos para:

- salas grandes, incidências não-rasantes
- coeficientes de absorção pequenos
- sinais de banda larga (não temos fases no modelo)

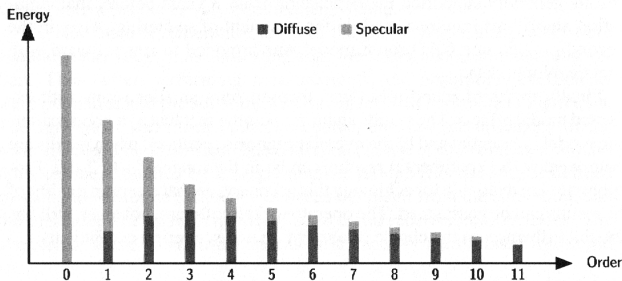
Comparação:

- Modelos determinísticos: modela bem as primeiras reflexões, limitações de implementação (por ex.: espalhamento)
- Modelos estocásticos: resolução temporal pequena (custosa) mas considera espalhamento

# Modelos híbridos

Combinar métodos:

- reverberação inicial com modelo de fontes virtuais
- reverberação tardia com traçado estocástico de raios (ou outros métodos)



Conversion of specularly into diffusely reflected sound energy, illustrated by an example (after (Kuttruff 1995))



- Vorländer, Michael: **Auralization**, Berlin Heidelberg, Springer, 2008.
- Costa, Ennio Cruz da: **Acústica técnica**, São Paulo, Blucher, 2003.

Muito obrigado!