Reach Next Level

CEDEC 2015

球面ガウス関数を極める

-動的間接照明の高速近似-

株式会社スクウェア・エニックス

徳吉 雄介

本講演の目的

- 照明の計算を高速に近似するための
- 球面ガウス関数という便利な道具のご紹介

対象者：

既にレンダリングの**基礎知識を持っていて**

さらに高速な近似法について知りたい人

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

本日の流れ

- 球面ガウス関数について説明
  - 球面ガウス関数の基礎
  - レンダリングへの応用
- 動的間接照明（弊社の発表論文を解説）
- 論文の技術を単純化した実装の紹介

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

解説する論文

- *“Virtual Spherical Gaussian Lights for Real-time Glossy Indirect Illumination”* [Tokuyoshi15]
  - 完全に動的な間接照明
  - Pacific Graphics 2015で発表予定
  - 後日Webで公開予定
    - http://jp.square-enix.com/info/library/

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Video



論文の実装



単純化した実装

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

1 **球面ガウス関数の基礎**
2 レンダリングへの応用
3 動的間接照明
4 単純化した実装のご紹介
5 まとめ

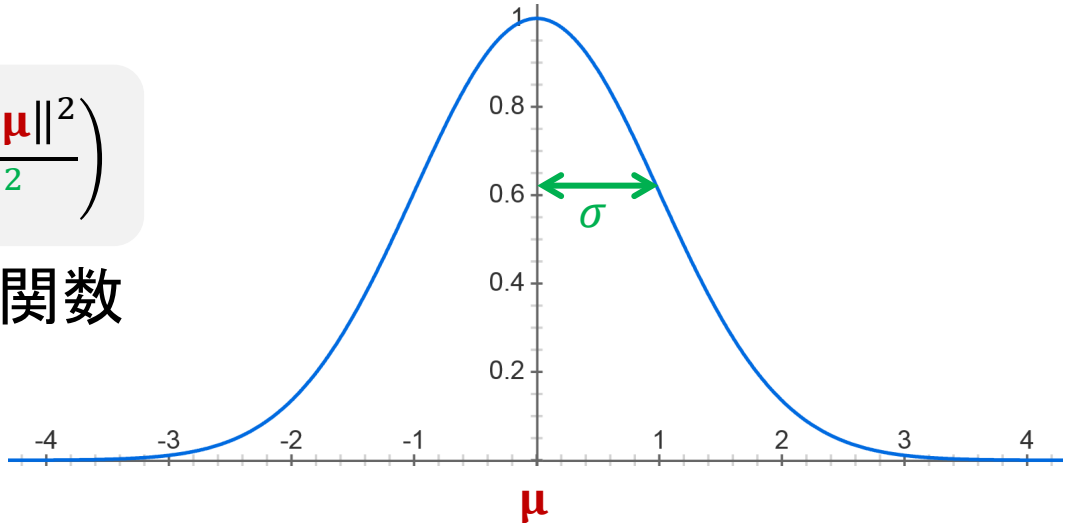
球面ガウス関数の基礎

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

ガウス関数

$$g(\|\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}\|,\sigma^2)=\exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

平均$\boldsymbol{\mu}$、分散σ^2の釣鐘型関数



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

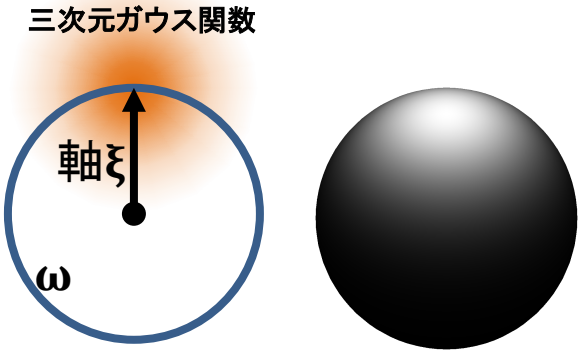
球面ガウス関数(SG)とは？

- ガウス関数の領域を単位ベクトルに制約

$$G(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}, \lambda) = g\left(\|\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\xi}\|, \frac{1}{\lambda}\right)$$

軸
（平均）

鋭さ
(分散の逆数)

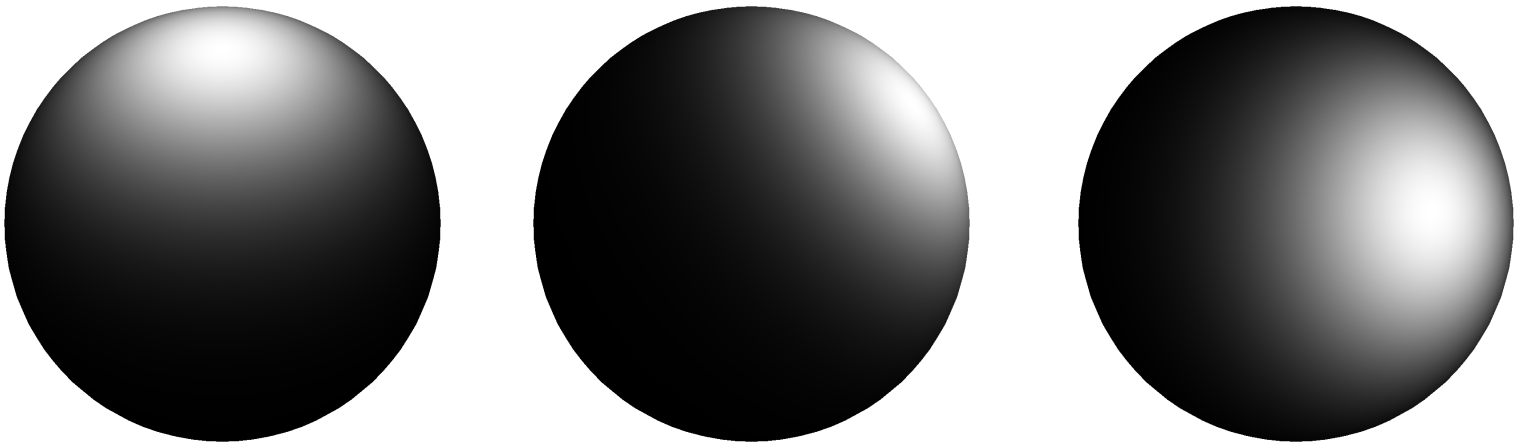


※正規化するとvon Mises-Fisher分布

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

SGローブの軸

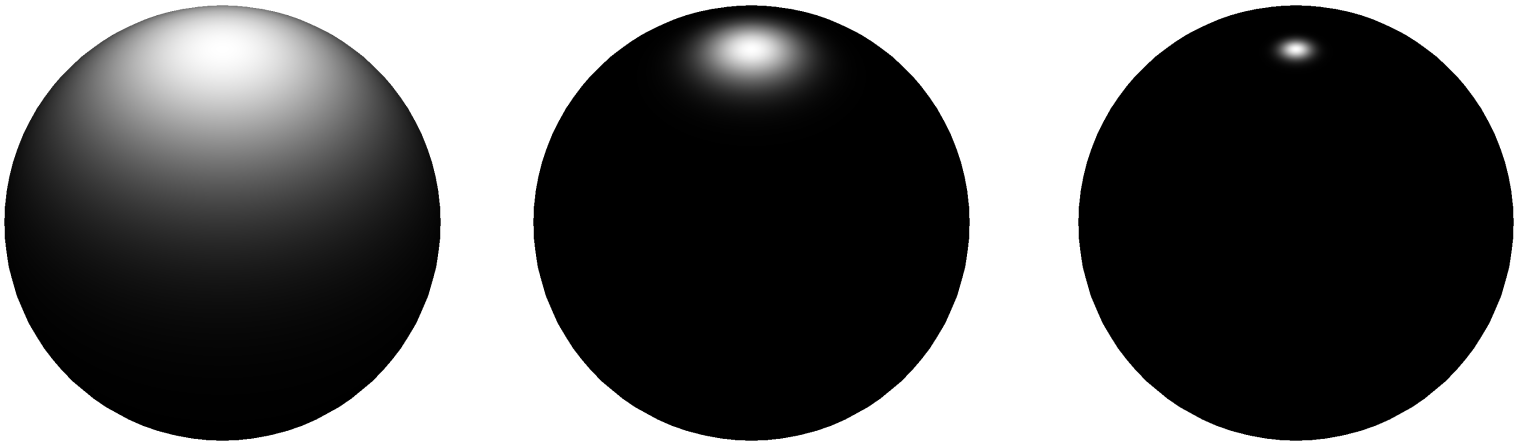
$$G(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}, \lambda)$$



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

SGローブの鋭さ

$G(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}, \lambda)$

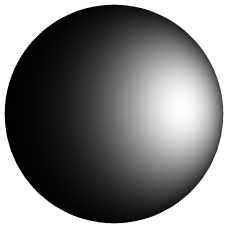
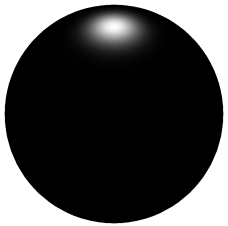
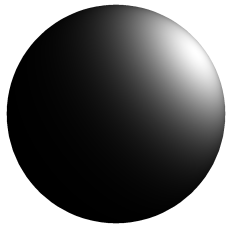


$\lambda = 10$　　$\lambda = 100$　　$\lambda = 1000$

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

SGローブの線形和

- 球面上の関数を近似可能

$$\sum_{i}^{N} c_i G_i(\boldsymbol{\omega}) = c_0 \times$$  $$+c_1 \times$$  $$+c_2 \times$$  $$+\cdots$$

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

解析的に解ける計算

$$G_1(\boldsymbol{\omega})G_2(\boldsymbol{\omega})$$

$$= e^{\|\xi_m\|-\lambda_1-\lambda_2} G\left(\boldsymbol{\omega}, \frac{\xi_m}{\|\xi_m\|}, \|\xi_m\|\right)$$

$$\xi_m = \lambda_1\xi_1 + \lambda_2\xi_2$$

積

$$\int_{S^2} G(\boldsymbol{\omega})\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}\left(1 - e^{-2\lambda}\right)$$

積分

$$\int_{S^2} G_1(\boldsymbol{\omega})G_2(\boldsymbol{\omega})\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$

$$= \frac{4\pi \sinh(\|\xi_m\|)}{e^{\lambda_1+\lambda_2}\|\xi_m\|}$$

積の積分

照明計算を近似するのに使える！

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

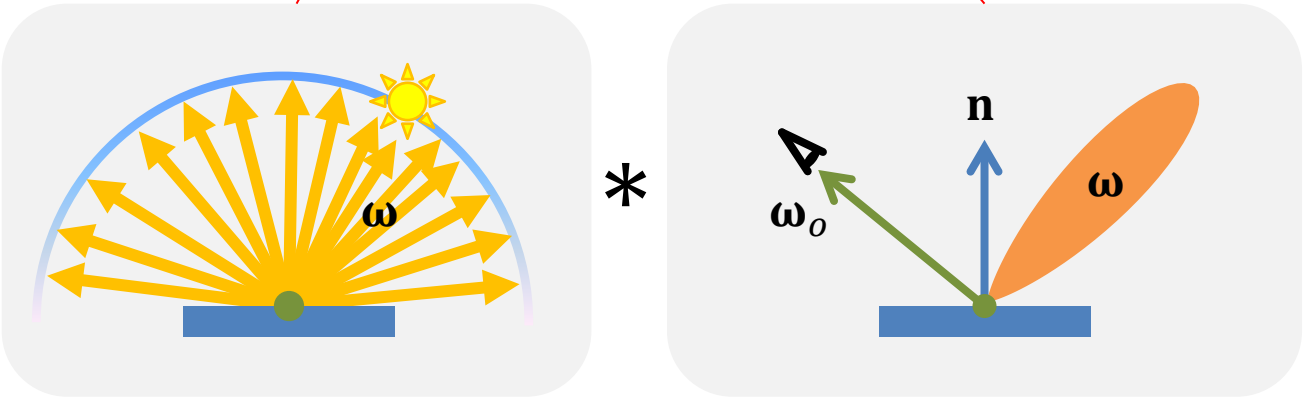
1 球面ガウス関数の基礎
2 **レンダリングへの応用**
3 動的間接照明
4 単純化した実装のご紹介
5 まとめ

レンダリングへの応用

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

レンダリング方程式 [Kajiya86]

$$L(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{S^2} L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \rho(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_o) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}, 0) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$



入射光　　反射ローブ

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

レンダリング方程式 [Kajiya86]

$$L(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{S^2} L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \rho(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_o) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}, 0) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$





球面上の積の積分

入射光

反射ローブ

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

レンダリング方程式 [Kajiya86]

$$L(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{S^2} L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \rho(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_o) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}, 0) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$

$$\sum_i^N c_i G_i(\boldsymbol{\omega}) \quad * \quad \sum_j^M c_j G_j(\boldsymbol{\omega})$$

入射光　　反射ローブ

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

球面調和関数との違い

☺ 高周波を効率良く近似可能

– 鋭い鏡面反射や鋭い入射光を表現できる

☹ 計算時間が$O(MN)$

– 基底数MかNどちらかは少なくした方が良い

$$\sum_{i}^{N} c_i G_i(\boldsymbol{\omega}) \quad * \quad \sum_{j}^{M} c_j G_j(\boldsymbol{\omega})$$

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

反射ローブのSG近似

- SGの数は少なくしたい
- Diffuse-Specular BRDFでは**ふたつのSG**で近似
  - 拡散反射用に１個
  - 鏡面反射用に１個

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

拡散反射ローブのSG近似

- ランバートモデルを仮定
- ローブの軸は法線
- ローブの鋭さ$\lambda_d \approx 2$
- 係数はエネルギーを保存するように

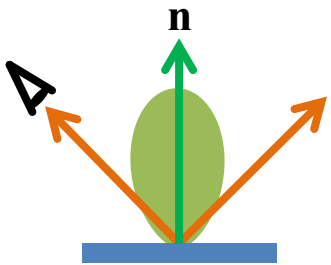
$$\frac{R_d}{\pi}\max(\boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{n},0) \approx R_d \frac{G(\boldsymbol{\omega},\mathbf{n},\lambda_d)}{\int_{S^2} G(\boldsymbol{\omega}',\mathbf{n},\lambda_d)\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}'}$$

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

鏡面反射ローブのSG近似 [Wang09]

- まず最初に法線分布関数をSG近似
  - 釣鐘型法線分布はSGひとつで近似可能
  - ローブの軸は法線、ローブの鋭さはモデル依存

$$D(\boldsymbol{\omega}_h) \approx G(\boldsymbol{\omega}_h, \mathbf{n}, \lambda_h)$$



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

法線分布関数の鋭さ λ_h

Phong分布

λ_h =Phong指数

Beckmann分布
GGX分布

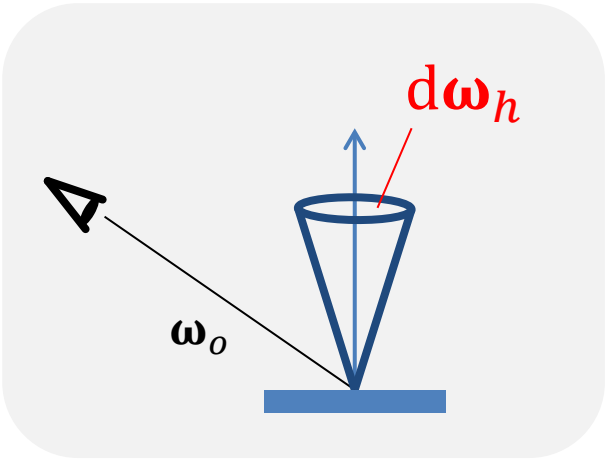
$$\lambda_h = \frac{2}{(\text{粗さパラメータ})^2}$$

※GGXについては粗めの近似

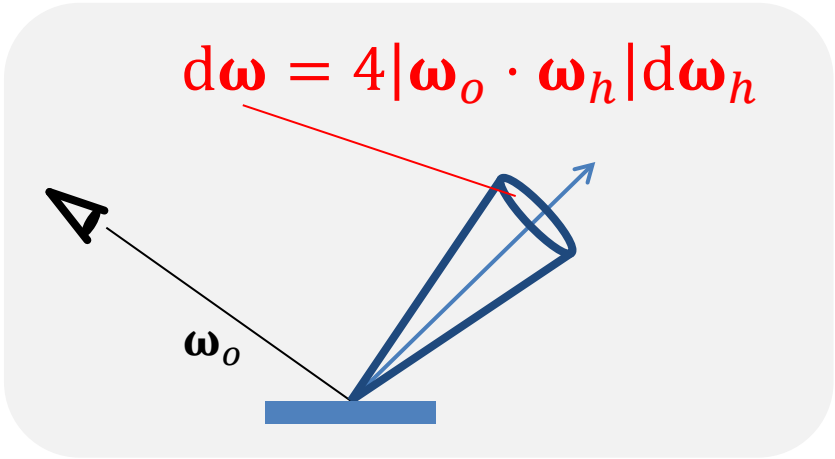
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

法線分布から反射方向分布へ

- 視線の入射角が浅いほど反射ローブは鋭く



法線分布



反射方向分布

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

法線分布から反射方向分布へ

- 完全鏡面反射方向を基準に近似



$$G(\boldsymbol{\omega}_h, \mathbf{n}, \lambda_h) \approx G\left(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}_s, \frac{\lambda_h}{4|\boldsymbol{\omega}_o \cdot \mathbf{n}|}\right)$$

※球面ワーピングと呼ばれる [Wang09]

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

法線分布以外の要素

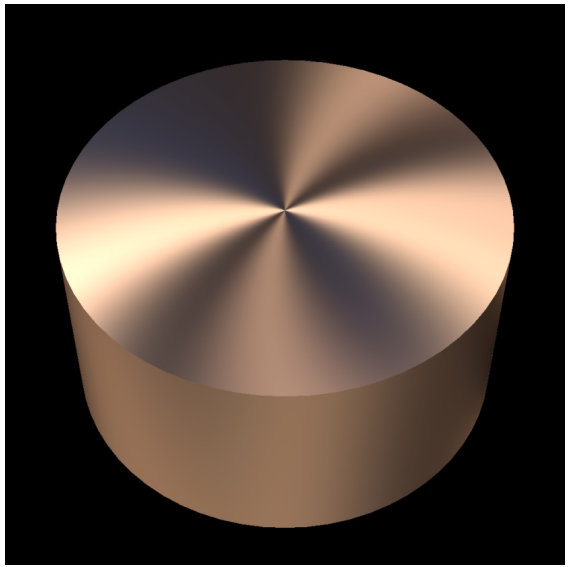
- フレネルやmasking-shadowing function等
- 十分に低周波(≈定数)と仮定
- 積分の外に出す [Wang09]

$$\int_{S^2} c(\boldsymbol{\omega}) G_i(\boldsymbol{\omega}) G_j(\boldsymbol{\omega})\, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega} \approx c(\boldsymbol{\xi}') \int_{S^2} G_i(\boldsymbol{\omega}) G_j(\boldsymbol{\omega})\, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$

ふたつのローブ積の軸 [Xu14]
or どちらか片方のローブの軸

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

異方性球面ガウス関数(ASG) [Xu13]



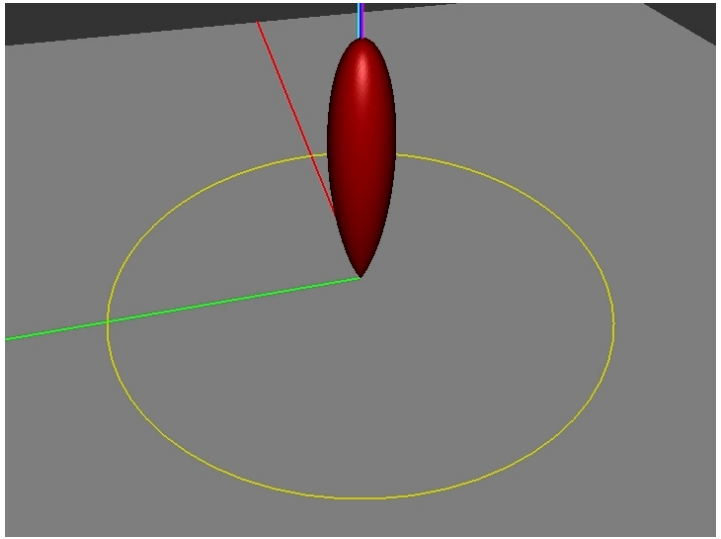
異方性BRDF



ASGで表現

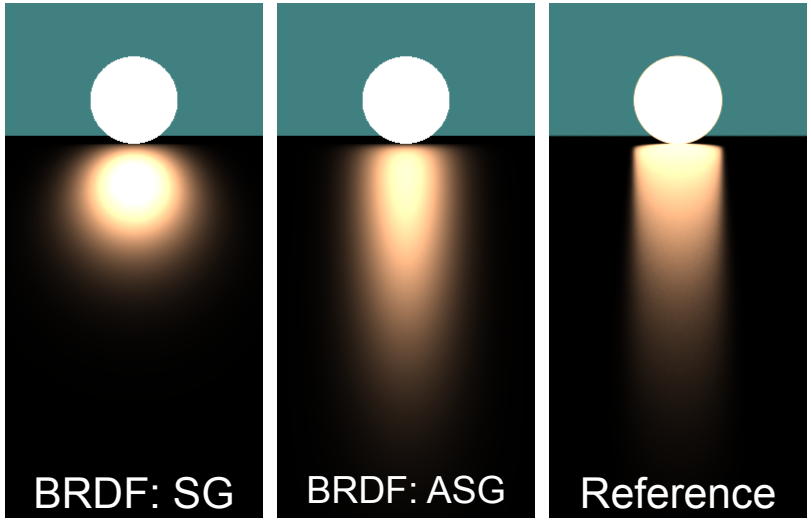
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

等方性BRDFの反射ローブ



等方性BRDFでも反射ローブは異方性

ASGで表現可能



映り込みが長く伸びる現象に対応

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

異方性の鋭さ

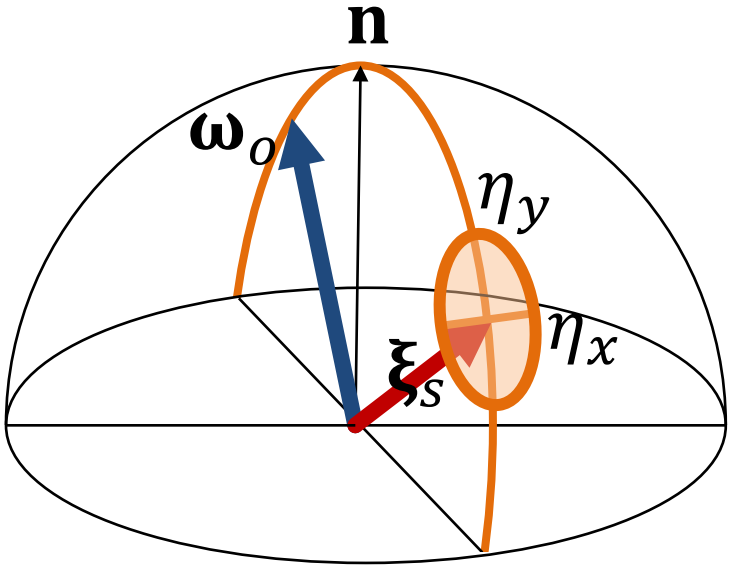
等方性BRDFの場合

横の鋭さ: $\eta_x = \dfrac{\lambda_h}{8(\boldsymbol{\omega}_o \cdot \mathbf{n})^2}$

入射角が浅い程横幅は狭くなる

縦の鋭さ: $\eta_y = \dfrac{\lambda_h}{8}$

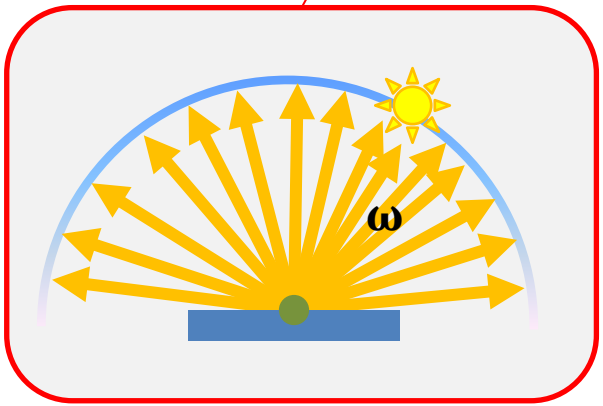
縦の長さは入射角に依存しない



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

レンダリング方程式

$$L(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{S^2} L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \rho(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_o) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}, 0) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$



$*$

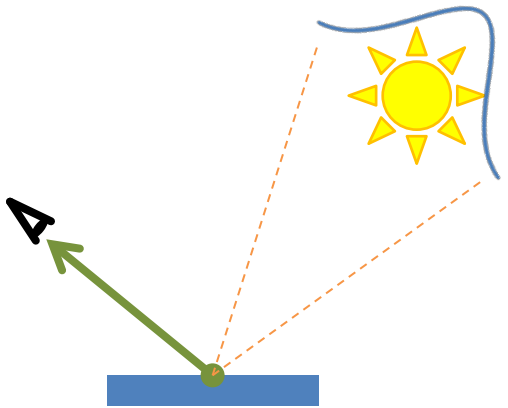
$$\sum_{j}^{2} c_j G_j(\boldsymbol{\omega})$$

入射光　　反射ローブ

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

入射光の球面ガウス関数表現

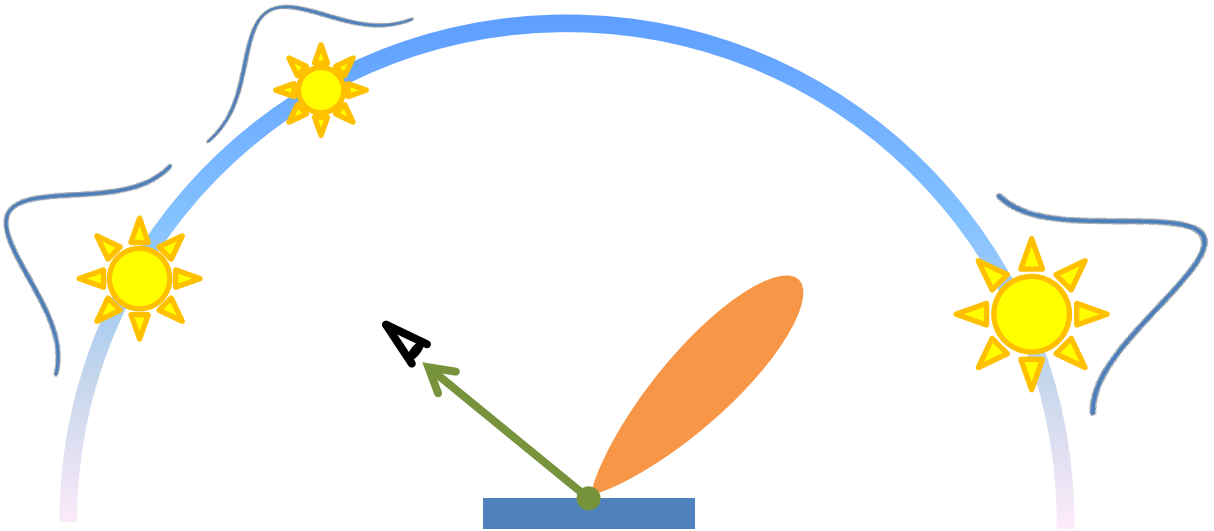
- 直接照明
  - 光源をSGを使って表現
  - SG lightと呼ばれる [Yan12]



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

静的環境マップ

- 複数のSG lightで近似
- 事前計算でフィッティング [Tsai06]



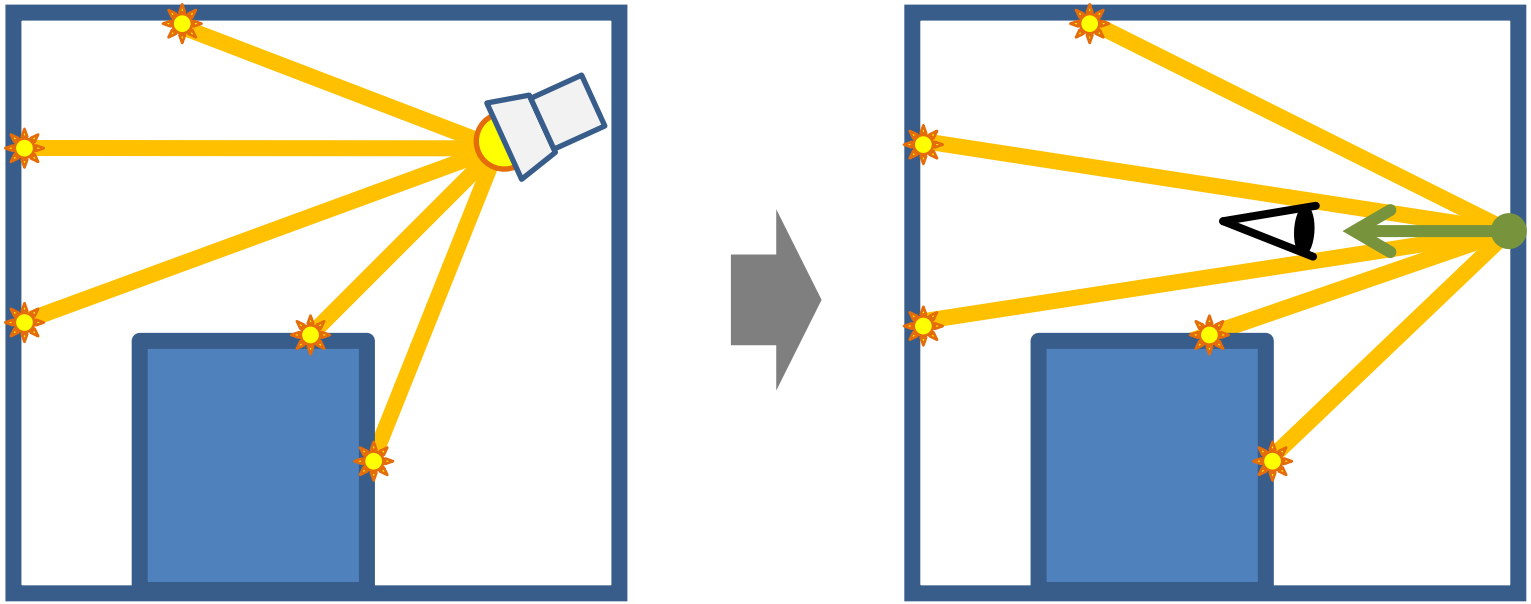
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

1 球面ガウス関数の基礎
2 レンダリングへの応用
3 動的間接照明
4 単純化した実装のご紹介
5 まとめ

動的間接照明

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Virtual Point Lights (VPLs) [Keller97]



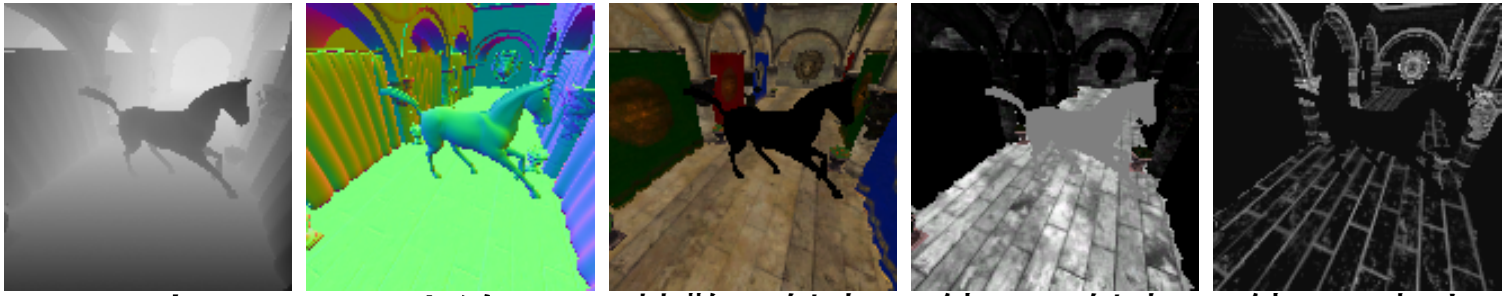
光源からVPLを放出

VPLの光の寄与を計算

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VPLの生成

- Reflective shadow maps [Dachsbacher05]
- 各ピクセル=VPL



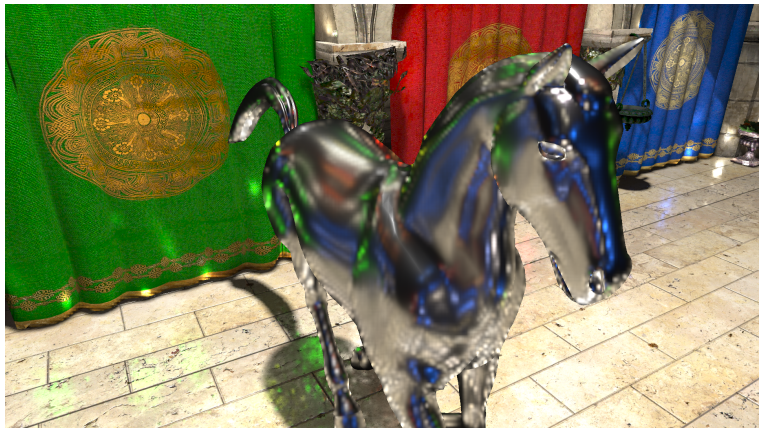
VPLの位置

VPLの放射強度を計算するのに使用

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VPLの問題

- 生成された膨大なVPL数
  - 全部使うのは非効率的
- 少数をサンプリング？
  - アーティファクト
  - フリッカリング
  - 特に鏡面反射で顕著



VPLによるアーティファクト

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VPLの問題

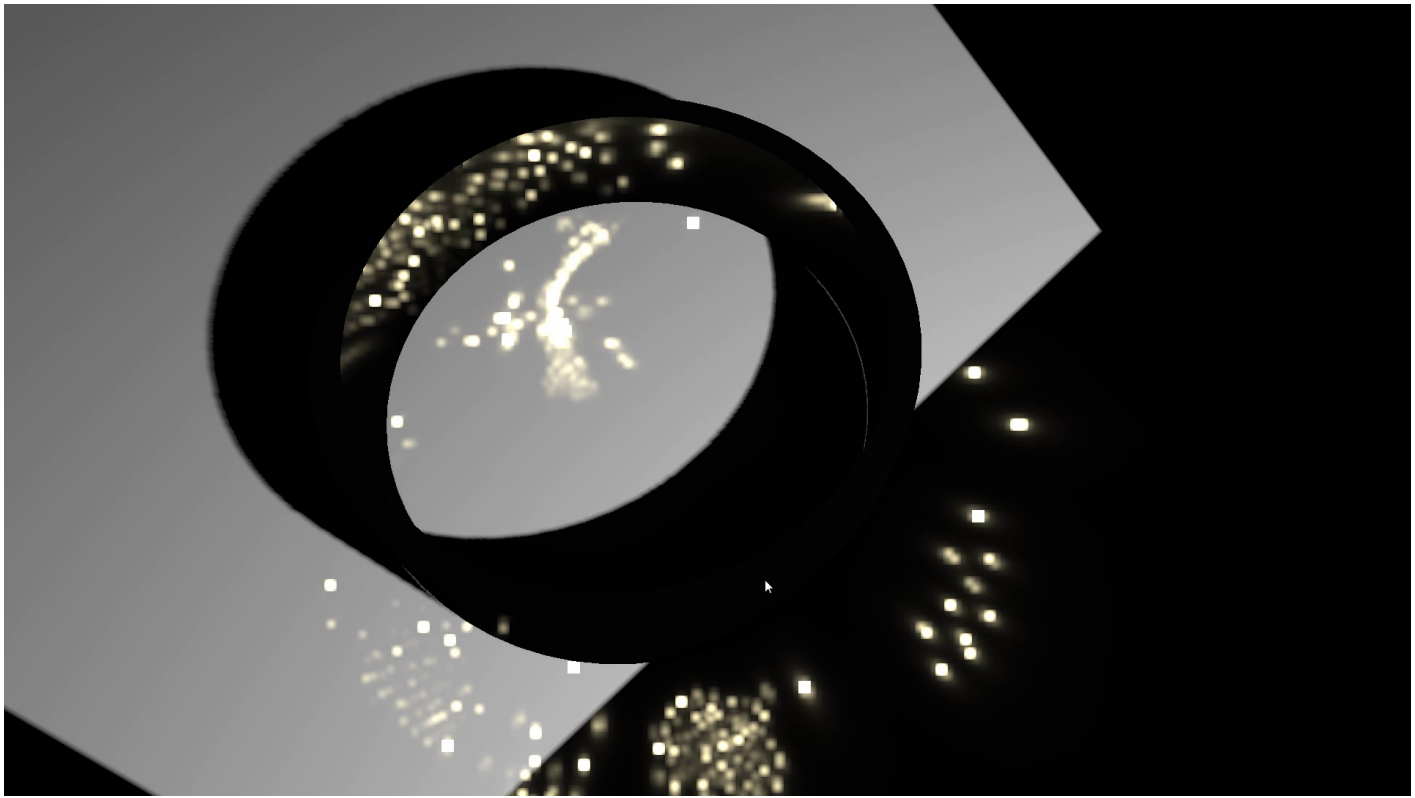
- 生成された膨大なVPL数
  - 全部使うのは非効率的
- 少数をサンプリング？
  - アーティファクト
  - フリッカリング
  - 特に鏡面反射で顕著



輝度をクランプすると
暗くなる

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

コースティクス



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

解決法

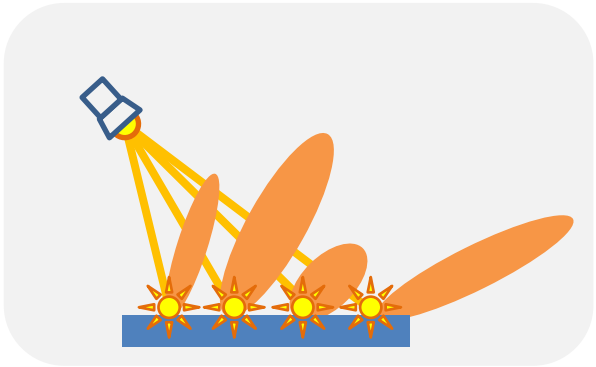
- Virtual SG Lights (VSGLs) [Tokuyoshi15]
- VPLの集合を**大雑把**に近似
  - 位置の密度: ガウス分布
  - 放射強度: 球面ガウス関数 (SG)



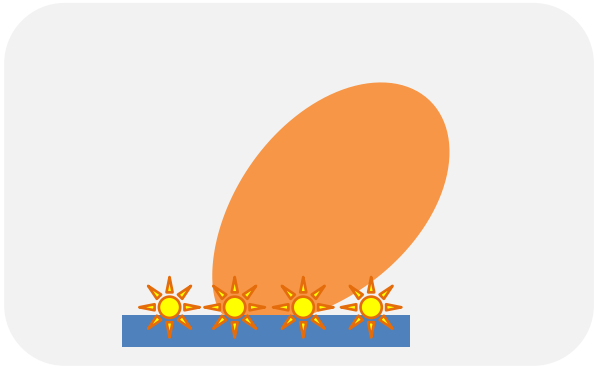
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

放射強度のSG近似

- VSGLの放射強度 = VPLの放射強度の総和



各VPLの放射強度（∝反射ローブ）
をSGで近似



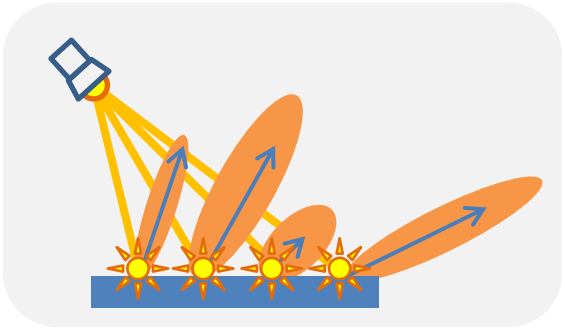
総和を単一のSGで近似

エネルギーの総和×方向分布の平均

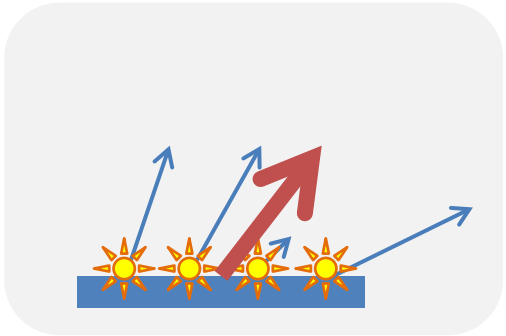
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

方向分布の平均

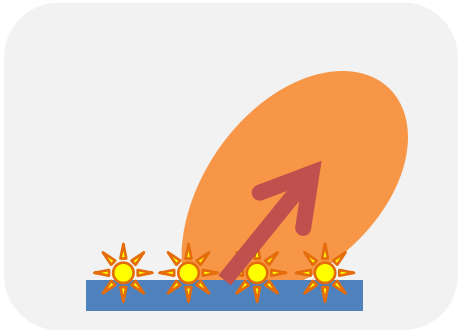
- Toksvig filter [Toksvig05]
  - 正規化したSGにも適用可能



VPL毎に平均ベクトルを計算
(Toksvigだと簡単)



全VPLで平均

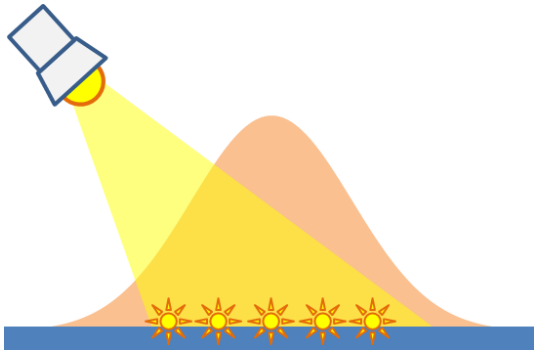


平均ベクトルから分布を推定

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

位置の分布

- 等方性ガウス分布で近似
  - 位置の重み付き平均と分散を計算
  - 重み: VPLのエネルギー



分散: $\sigma_v^2 = \mathrm{E}[\|\mathbf{x}\|^2] - \|\mathrm{E}[\mathbf{x}]\|^2$

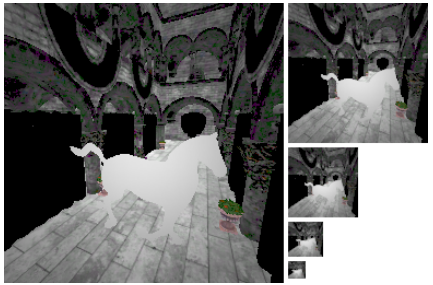
平均を求める処理で計算可能

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

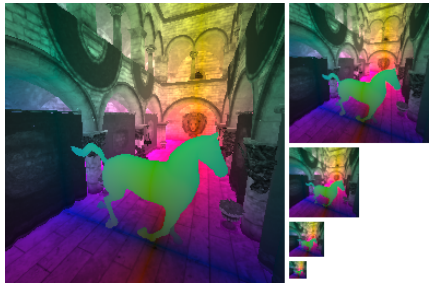
Mipmappingで平均を計算



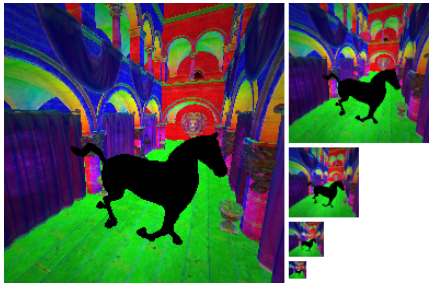
拡散反射成分の重み



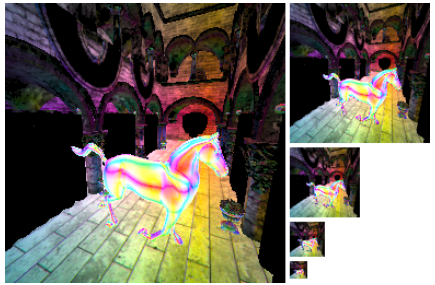
鏡面反射成分の重み



位置



拡散反射方向の平均ベクトル



鏡面反射方向の平均ベクトル



位置の二乗ノルム

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

1024個のVSGLを生成

- Mipmapのピクセルをランダムサンプリング
- Filtered importance sampling [Krivanek08]
  - 確率密度低 ➡ 広い領域の平均をサンプル
  - 確率密度高 ➡ 狭い領域の平均をサンプル

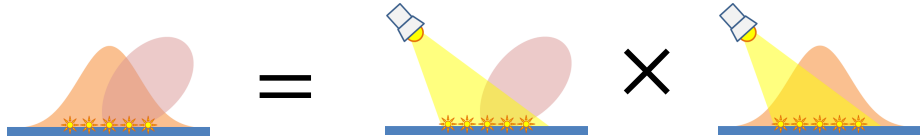
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

間接照明の影

- 各VSGLにImperfect Shadow Map (ISM)を生成
  - 論文投稿時はAdaptive ISMs [Ritschel11]を使っていた
  - 今はTessellation-based ISMs [Barak13]を使用
    - 実装が簡単
    - 比較的誤差が少ない

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VSGLの放射輝度



$$L_e(\mathbf{x},\boldsymbol{\omega}) \approx \frac{I_v(\boldsymbol{\omega})}{2\pi\sigma_v^2|\boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{n}|}\, g(\|\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}_v\|,\sigma_v^2)$$

放射強度

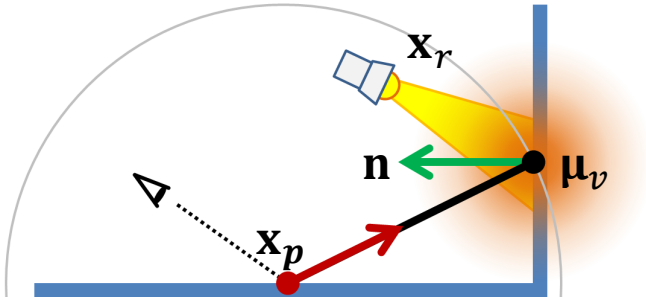
位置の分散

位置の平均

VPLが分布する面の法線

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

シェーディング点の入射光



$$L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \approx L_e(\mathbf{x}_r, -\boldsymbol{\omega})|\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}|$$

- 位置の分布はどこから見ても同じ形とする
- 代わりに$|\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}|$を乗算してエネルギーを補正
  - Virtual Spherical Lights [Hasan09]と同様

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

シェーディング点の入射光

$$L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \approx L_e(\mathbf{x}_r, -\boldsymbol{\omega})|\boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{n}| \approx \frac{I_v(-\boldsymbol{\omega})\cancel{|\boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{n}|}}{2\pi\sigma_v^2\cancel{|\boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{n}|}}\, g\left(\|\mathbf{x}_r - \boldsymbol{\mu}_v\|, \sigma_v^2\right)$$

VSGLの面の向きを考慮する必要は無い

（実際の面の法線分布は放射強度で既に表現されている）

$$\approx \frac{I_v(-\boldsymbol{\omega})}{2\pi\sigma_v^2}\, g(\|\mathbf{x}_r - \boldsymbol{\mu}_v\|, \sigma_v^2) = \frac{I_v(-\boldsymbol{\omega})}{2\pi\sigma_v^2}\, G\left(\boldsymbol{\omega}, \frac{\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p}{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|}, \frac{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|^2}{\sigma_v^2}\right)$$

球面上の位置

位置の分布
（ガウス関数）

シェーディング点から見た方向分布
（球面ガウス関数）

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

シェーディング点の入射光

$$L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \approx \frac{I_v(-\boldsymbol{\omega})}{2\pi\sigma_v^2} G\left(\boldsymbol{\omega}, \frac{\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p}{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|}, \frac{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|^2}{\sigma_v^2}\right)$$

$$\approx \frac{c_v}{2\pi\sigma_v^2} G(\boldsymbol{\omega}, -\boldsymbol{\xi}_v, \lambda_v) G\left(\boldsymbol{\omega}, \frac{\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p}{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|}, \frac{\|\boldsymbol{\mu}_v - \mathbf{x}_p\|^2}{\sigma_v^2}\right)$$

放射強度も
球面ガウス関数

$$= c_{in} G(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}_{in}, \lambda_{in})$$

入射放射輝度$L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega})$は
球面ガウス関数で表現可能！

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

レンダリング方程式

$$L(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}_o) = \int_{S^2} L_{in}(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\omega}) \rho(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_o) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n}, 0) \, \mathrm{d}\boldsymbol{\omega}$$

$$\sum_{i}^{1024\times2} c_i G_i(\boldsymbol{\omega}) \quad * \quad \sum_{j}^{2} c_j G_j(\boldsymbol{\omega})$$

入射光　　**反射ローブ**

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Tips 1

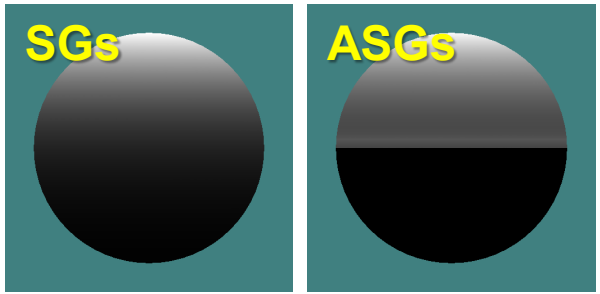
- シェーディング点の拡散反射はSG近似しない
  - コサイン項を低周波と仮定して積分の外に出す
  - VSGL数が多いのでバイアス低減を優先

- シェーディング点の鏡面反射には異方性球面ガウス関数(ASG)を使用
  - 映り込みが長く伸びる現象に対応

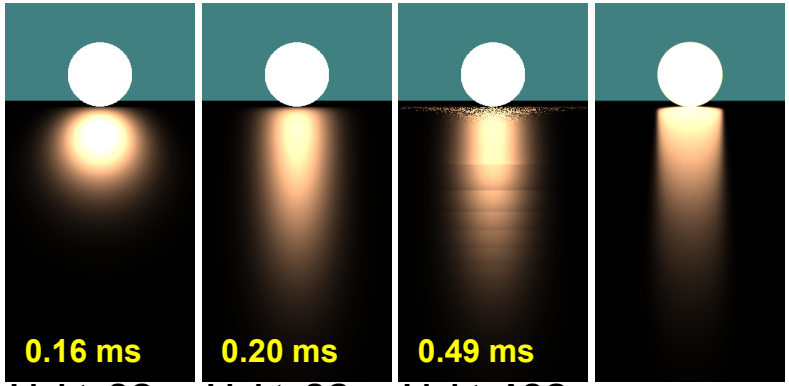
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Tips 2

- ASG近似する項はひとつに絞った方が良い
  - ASG同士の積は精度や速度が良くない



低周波の積の積分



Light: SG
BRDF: SG

Light: SG
BRDF: ASG

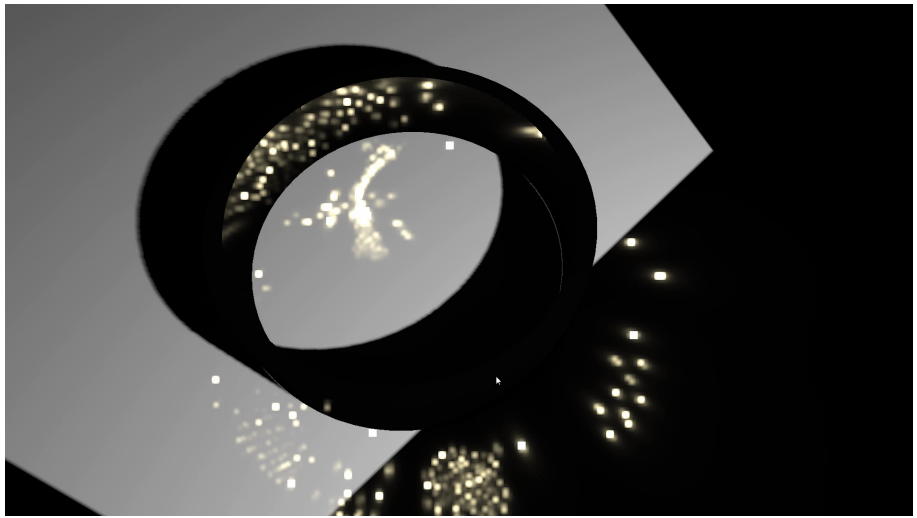
Light: ASG
BRDF: ASG

Reference

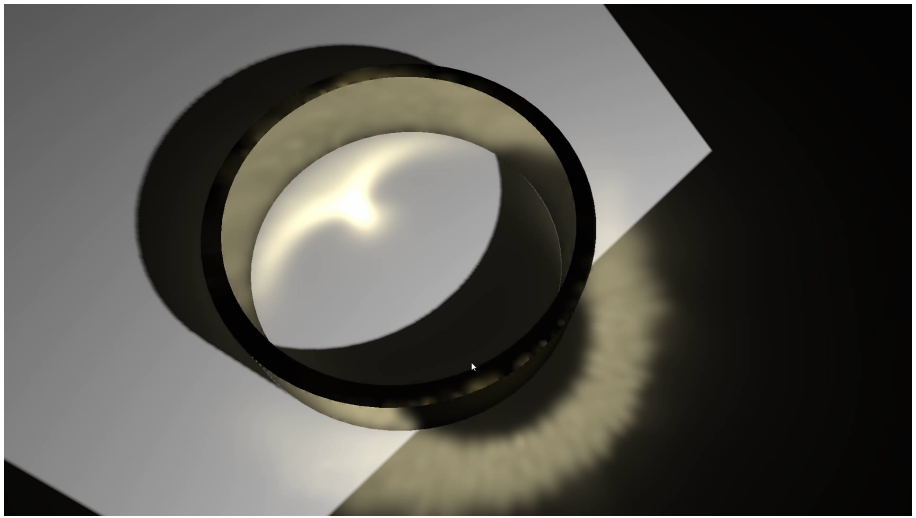
GPU: AMD Radeon™ HD 6990

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

実験結果(1)



1024 Virtual Point Lights



1024 Virtual SG Lights

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

実験結果(2)



1024 Virtual Point Lights



1024 Virtual SG Lights

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

制限事項

- 光漏れ
  - 推定値の分散低減と引き換えにバイアス発生
- フリッカリングは完全には消えない
  - Filtered importance samplingでは不十分
  - 今後の課題:
    - Temporally coherent sampling [Barak13]

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

1 球面ガウス関数の基礎
2 レンダリングへの応用
3 動的間接照明
4 単純化した実装のご紹介
5 まとめ

単純化した実装のご紹介

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

目標

- 高速化・省メモリ化
- 実装の簡単化
- フリッカリングの完全除去
- 数値的な正確さは重視しない

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

特殊化

- スポットライトがシーンを局所的に照らしている状況に特化
  - 懐中電灯
  - ヘッドライト
  - サーチライト, etc.

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VSGLのサンプル数

- 少なくても品質が落ちにくい



限界までサンプル数を減らしてみた

VSGL数=2
- 拡散反射用に1個
- 鏡面反射用に1個

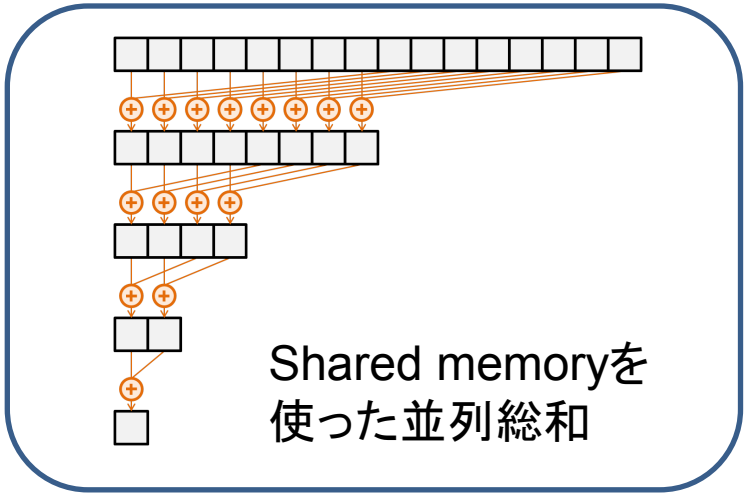
© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

VSGLのパラメータ

- Reflective Shadow Maps全領域の平均
  - ランダムサンプリング必要ない
  - Mipmapを作るのは無駄



- Compute Shaderで計算
  - データ量・計算量削減



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

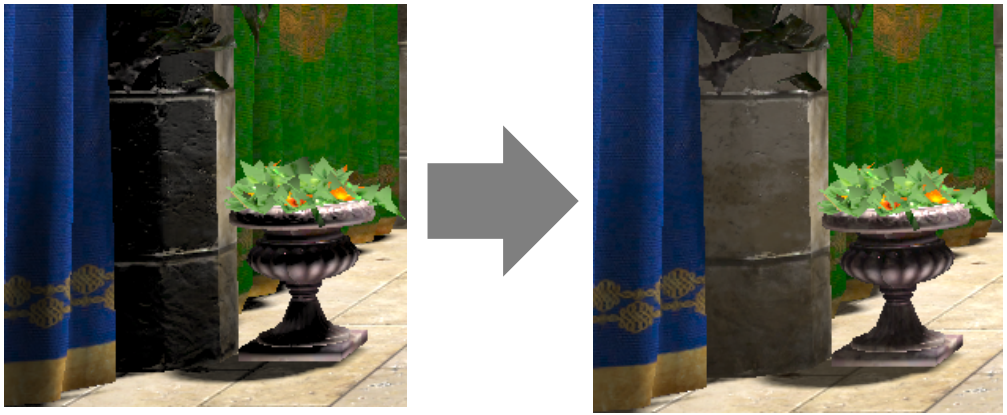
間接照明の影

- Imperfect Shadow Mapsはオミット
  - 少数の光源には向かない
- 高速なソフトシャドウの実装は今後の課題

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

シェーディング

- シェーディング点の拡散反射もSG近似
  - ライティングが柔らかくなる
  - 光漏れは多くなる（バイアス増加）



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

不要になる処理

- Additional reflective shadow map generation
- Bidirectional reflective shadow mapping
- Mipmapping of reflective shadow maps
- Filtered importance sampling
- Imperfect shadow maps
- Interleaved sampling & geometry-aware denoising
- Temporal reprojection

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

結果



© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

結果



Reflective Shadow Map	0.224 ms
VSGL generation	0.063 ms
Shading	0.407 ms

(GPU: AMD Radeon R9 290X)



LDDE光路



LDGE光路



LGDE光路



LGGE光路

L: Light, D: Diffuse surface, G: Glossy surface, E: Eye

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Tips

- Reflective Shadow Mapsの解像度は低く
  - 今回は128x128ピクセル (16384 VPLs)を使ったが
  - 64x64ピクセル (4096 VPLs)でも十分

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

単純版の制限事項

- 光漏れが多くなる
- 多峰性分布の照明は表現できない
  - 単峰性で近似
  - ライトが狭い領域を照らしている場合はあまり問題にならない

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

1 球面ガウス関数の基礎
2 レンダリングへの応用
3 動的間接照明
4 単純化した実装のご紹介
5 まとめ

まとめ

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

球面ガウス関数の利点

- 広がりをもった光源を表現可能
  - エリアライト、環境マップ、**動的間接照明**
- 鋭い照明を表現可能
  - 鏡面反射、コースティクス
- 異方性の反射ローブも扱える

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

さらなる応用

- 髪の毛 [Xu11]
- 布 [Iwasaki14]
- Subsurface Scattering (表面下散乱) [Yan12]

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

宣伝



- Ch. 3 球面ガウス関数を用いた動的間接照明の高速近似
  - **シェーダーのサンプルコード付**
- Ch. 4 鏡面反射ローブを考慮したバイラテラルフィルター

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

参考文献

- BARÁK T., BITTNER J., HAVRAN V.: Temporally coherent adaptive sampling for imperfect shadow maps. Comput. Graph. Forum 32, 4 (2013), 87–96.
- HASAN, M., KR IVANEK, J., WALTER, B., AND BALA, K. 2009. Virtual spherical lights for many-light rendering of glossy scenes. ACM Trans. Graph. 28, 5, 143:1–143:6.
- IWASAKI K., MIZUTANI K., DOBASHI Y., NISHITA T.: Interactive cloth rendering of microcylinder appearance model under environment lighting. Comput. Graph. Forum 33, 2 (2014), 333–340.
- KAJIYA J. T.: The rendering equation. SIGGRAPH Comput. Graph. 20, 4 (1986), 143–150.
- KELLER, A. 1997. Instant radiosity. In Proc. SIGGRAPH'97, 49–56.
- KRIVANEK, J., AND COLBERT, M. 2008. Real-time shading with filtered importance sampling. Comput. Graph. Forum 27, 4, 1147–1154.
- RITSCHEL T., EISEMANN E., HA I., KIM J. D., SEIDEL H.-P.: Making imperfect shadow maps view-adaptive: High-quality global illumination in large dynamic scenes. Comput. Graph. Forum 30, 8 (2011), 2258–2269.
- TOKSVIG M.: Mipmapping normal maps. J. Graph. Tools 10, 3 (2005), 65–71. 3
- TOKUYOSHI, Y. 2015. Virtual Spherical Gaussian Lights for Real-time Glossy Indirect Illumination. Comput. Graph. Forum (Proc. PG'15).
- TSAI, Y.-T., AND SHIH, Z.-C. 2006. All-frequency precomputed radiance transfer using spherical radial basis functions and clustered tensor approximation. *ACM Trans. Graph. 25*, 3, 967–976.
- XU K., MA L.-Q., REN B., WANG R., HU S.-M.: Interactive hair rendering and appearance editing under environment lighting. ACM Trans. Graph. 30, 6 (2011), 173:1–173:10.
- XU K., SUN W.-L., DONG Z., ZHAO D.-Y., WU R.-D., HU S.-M.: Anisotropic spherical Gaussians. ACM Trans. Graph. 32, 6 (2013), 209:1–209:11.
- XU K., CAO Y.-P., MA L.-Q., DONG Z., WANG R., HU S.-M.: A practical algorithm for rendering interreflections with all-frequency BRDFs. ACM Trans. Graph. 33, 1 (2014), 10:1–10:16.
- YAN, L.-Q., ZHOU, Y., XU, K., AND WANG, R. 2012. Accurate translucent material rendering under spherical Gaussian lights. Computer Graphics Forum 31, 7, 2267–2276.

© 2015 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.