ゲームグラフィックス特論

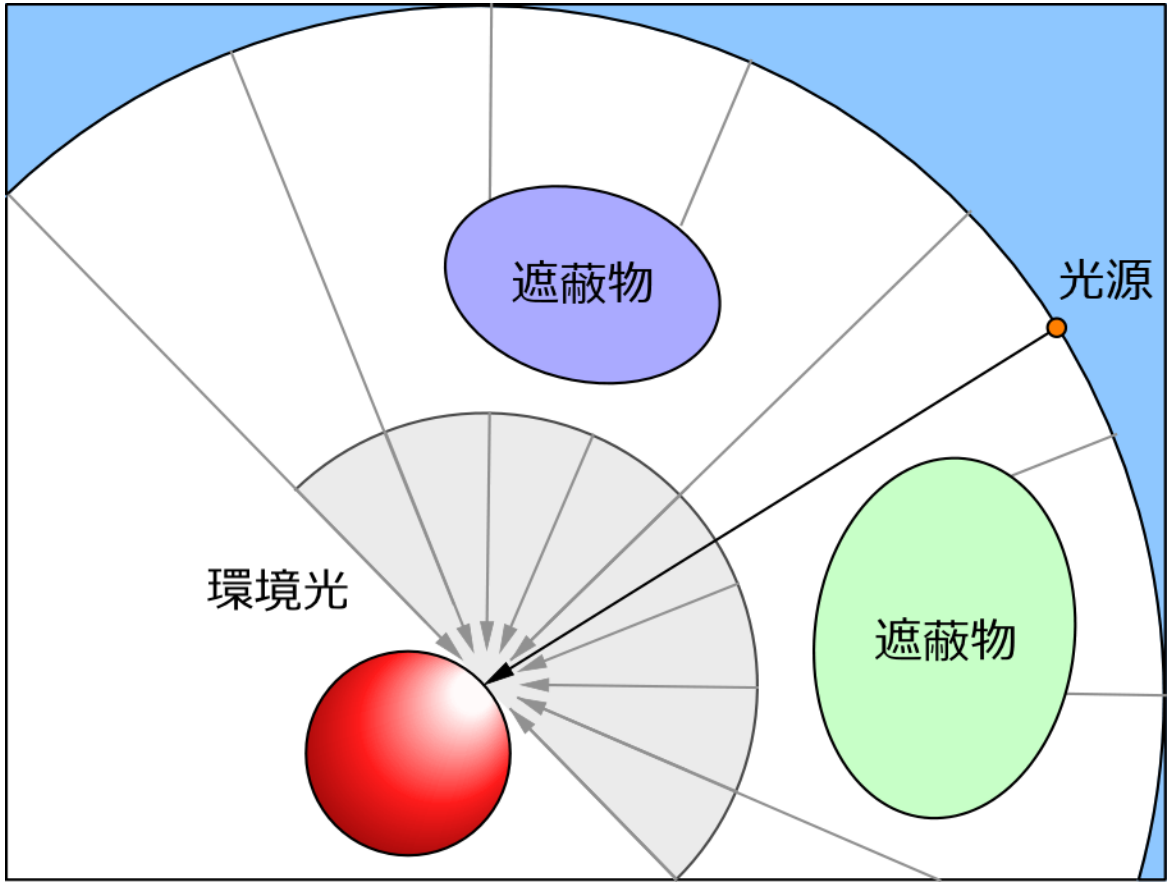
第12回 大域照明

環境遮蔽

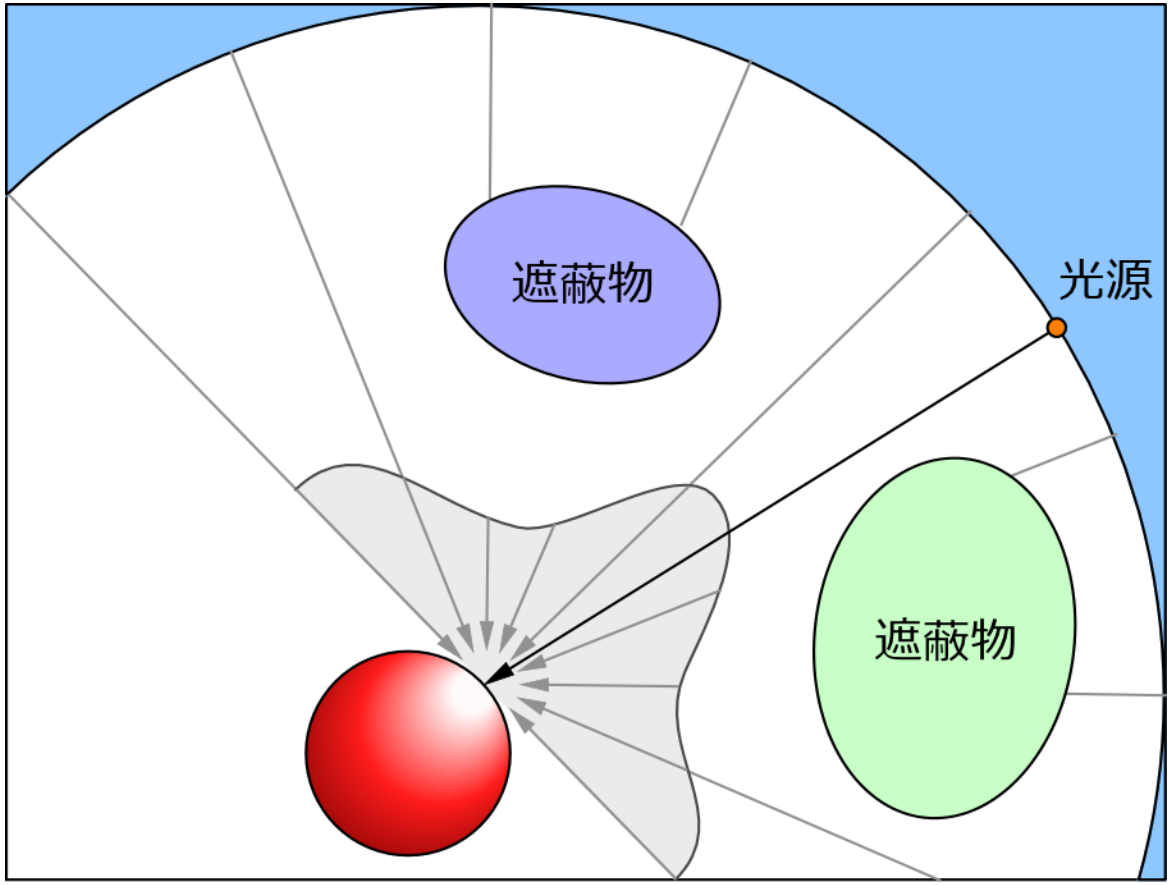
位置や方向によって環境光強度は変化する

環境光の強さは周囲の影響を受ける

環境光強度を定数にした場合

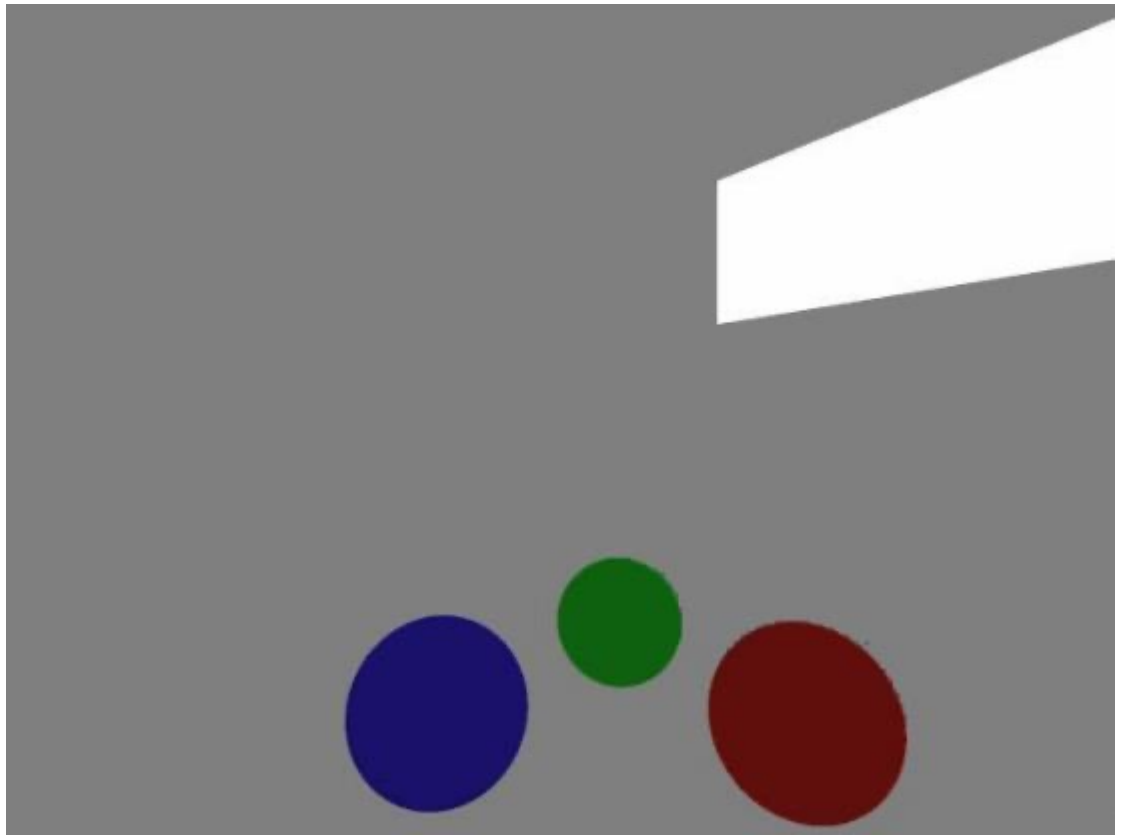


環境光が周囲の影響を受ける場合



直接光が存在しない場合

環境光が定数だと



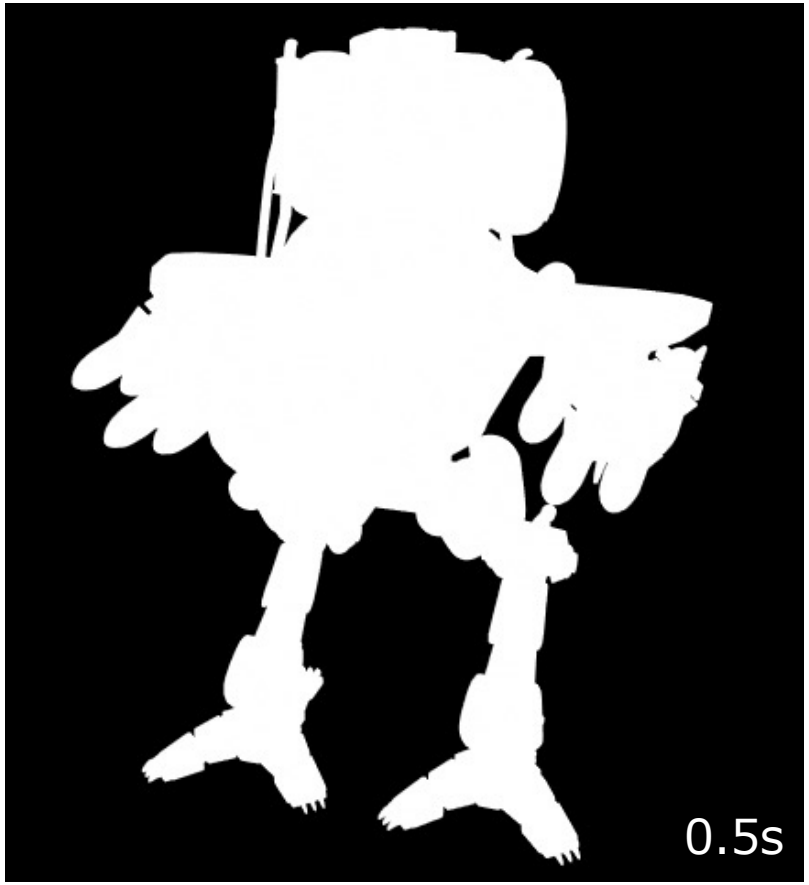
間接光を計算すれば

環境遮蔽 (Ambient Occlusion)

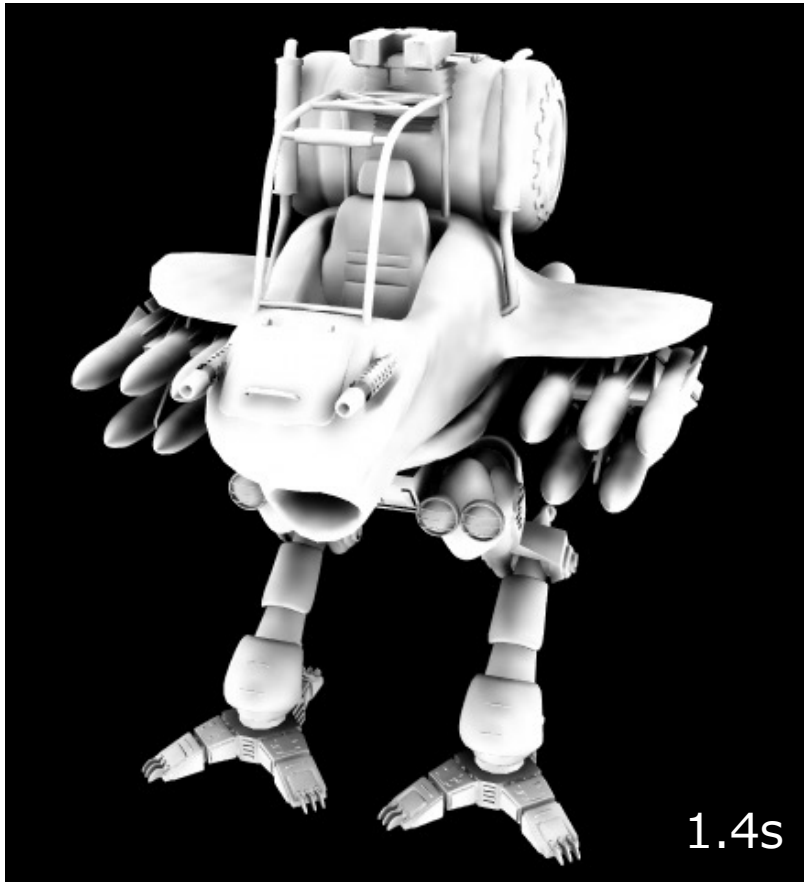
- 環境光
  - 間接光などの直接光以外の成分
  - あらゆる方向から到来する
- 環境光強度を定数で表す
  - 全ての経路の光を集計するのは困難
  - 陰影が付かない
- 実際の周囲光による陰影
  - 光源が大きな面積（＝大きな立体角）を持つ
  - ソフトシャドウが生成される

環境遮蔽による陰影

環境光強度が定数の場合

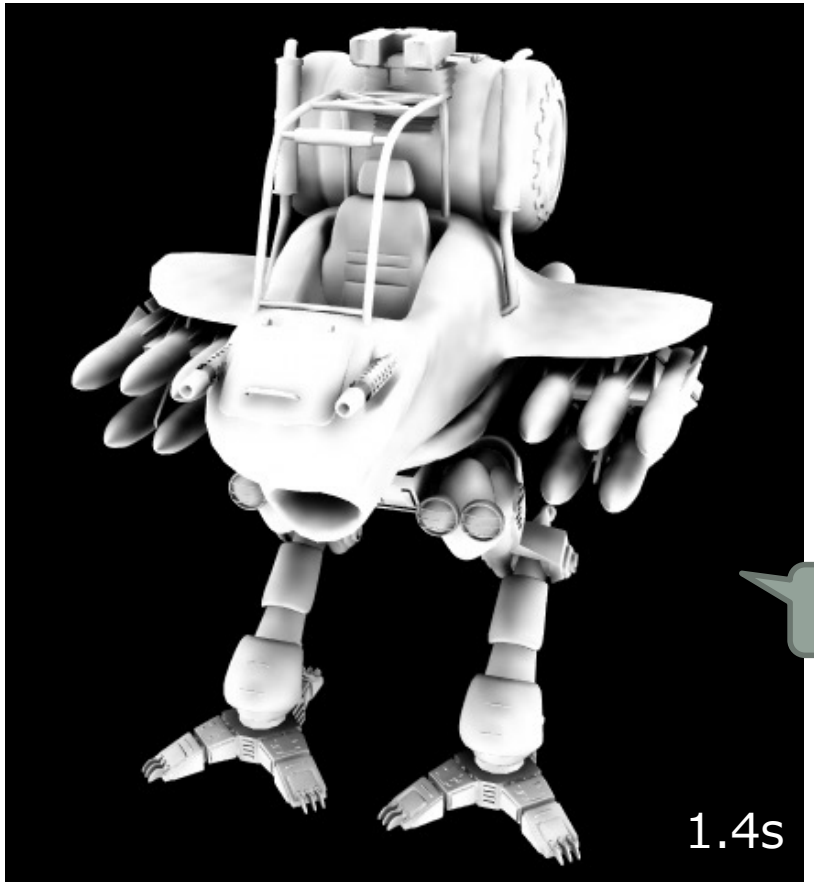


環境遮蔽を考慮した場合



環境遮蔽による陰影

環境遮蔽を考慮した場合



明暗が強く出過ぎる

大域照明モデル (ラジオシティ法)

環境光と環境遮蔽係数

- 環境光はあらゆる方向から到来する
  - 定数だとみなすことができる

$$E(\mathbf{p},\mathbf{n}) = \int_{\Omega} L_A \cos\theta_i \, d\omega_i = \pi L_A$$

  - いくつかの方向から到来する光は他の物体にさえぎられることがある

$$\nu(\mathbf{p},\mathbf{l}) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

$\mathbf{l}$ 方向から $\mathbf{p}$ に到来する光がさえぎられていれば 0，さえぎられていなければ 1

$$E(\mathbf{p},\mathbf{n}) = L_A \int_{\Omega} \nu(\mathbf{p},\mathbf{l}) \cos\theta_i \, d\omega_i$$

$$\kappa_A(\mathbf{p}) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \nu(\mathbf{p},\mathbf{l}) \cos\theta_i \, d\omega_i$$

$$E(\mathbf{p},\mathbf{n}) = \kappa_A(\mathbf{p}) \pi L_A$$

環境遮蔽係数（位置の関数）

環境遮蔽を考慮した陰影付け

- 完全拡散反射面の陰影付け方程式

$$L_o(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{c}_{diff}}{\pi} \otimes \left(\kappa_A \pi L_A + \sum_{k=1}^{n} \nu(\mathbf{l}_k) E_{L_k} \overline{\cos}\, \theta_{i_k} \right)$$

環境遮蔽を考慮した環境光

環境遮蔽を考慮した直接光

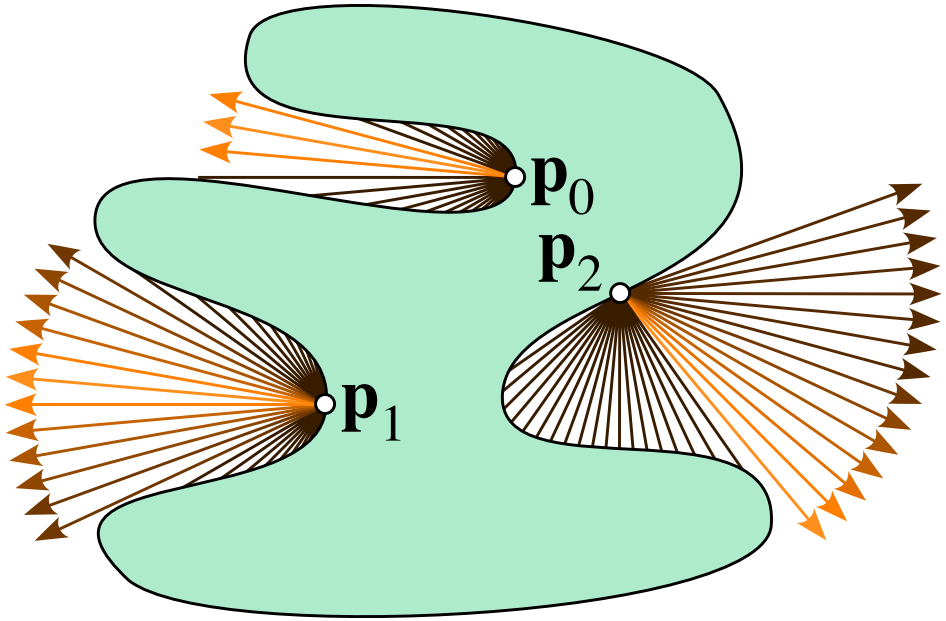
- BRDF を用いた非完全拡散反射面の陰影付け方程式

$$L_o(\mathbf{v}) = \kappa_A \frac{\mathbf{c}_{amb}}{\pi} \pi L_A + \sum_{k=1}^{n} \nu(\mathbf{l}_k) f(\mathbf{l}_k, \mathbf{v}) \otimes E_{L_k} \overline{\cos}\, \theta_{i_k}$$

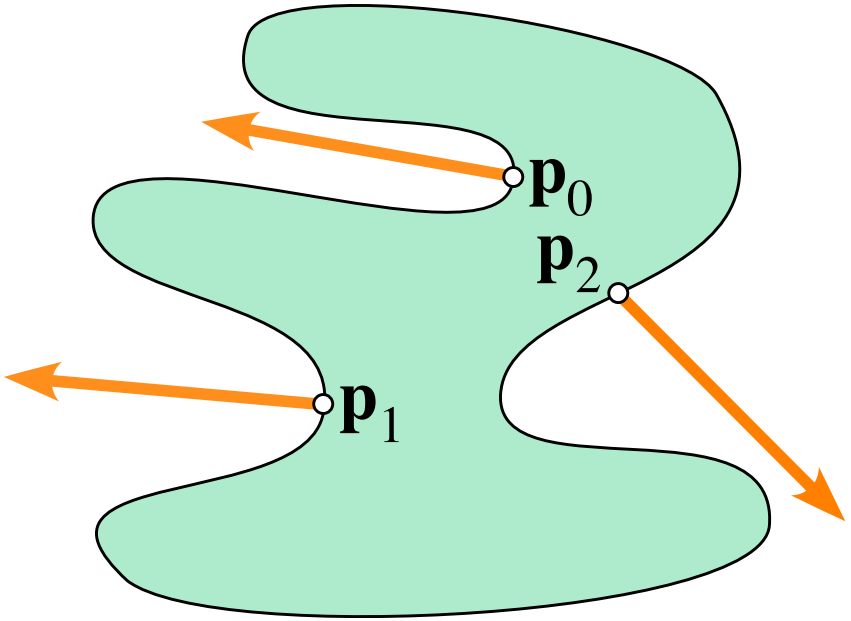
- E_{ind} ：間接光の放射照度，κ_{ind} ：間接光の環境遮蔽係数

$$L_o(\mathbf{v}) = \kappa_A \frac{\mathbf{c}_{amb}}{\pi} \otimes \left(E_{ind} + \kappa_{ind} \sum_{k=1}^{n} E_{L_k} \right) + \sum_{k=1}^{n} \nu(\mathbf{l}_k) f(\mathbf{l}_k, \mathbf{v}) \otimes E_{L_k} \overline{\cos}\, \theta_{i_k}$$

環境遮蔽係数と bent normal



$\mathbf{p}_0$ の環境遮蔽係数$\kappa_A(\mathbf{p}_0)$ は
$\mathbf{p}_1$ の環境遮蔽係数$\kappa_A(\mathbf{p}_1)$ より小さい



太い矢印は遮蔽されない
方向の平均値 (bent normal)

$\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_2$ の遮蔽されない範囲はほぼ同じだが,
$\mathbf{p}_1$ の方が**法線方向に近い**ので環境遮蔽係数κ_A は高い

bent normal を使用した

- bent normal

$$\mathbf{n}_{bent} = \frac{\int_{\Omega} v(\mathbf{l})\mathbf{l}\cos\theta_i \, d\omega_i}{\left\| \int_{\Omega} v(\mathbf{l})\mathbf{l}\cos\theta_i \, d\omega_i \right\|}$$

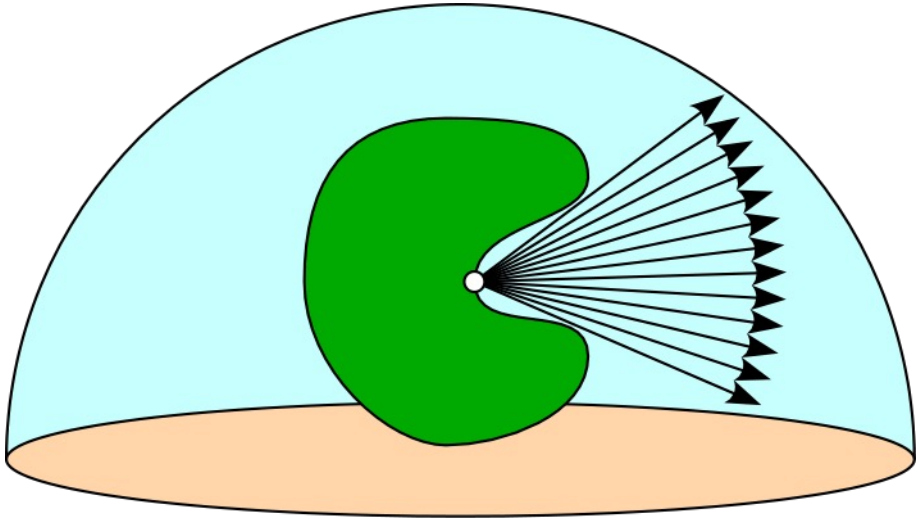
- bent normal $\mathbf{n}_{bent}$ を使用する場合

$$L_o(\mathbf{v}) = \kappa_A \frac{\mathbf{c}_{amb}}{\pi} \otimes \left(E_{ind} + \kappa_{ind} \sum_{k=1}^{n} E_{L_k} \overline{\cos}\,\theta'_{i_k} \right) + \sum_{k=1}^{n} v(\mathbf{l}_k) f(\mathbf{l}_k, \mathbf{v}) \otimes E_{L_k} \overline{\cos}\,\theta_{i_k}$$

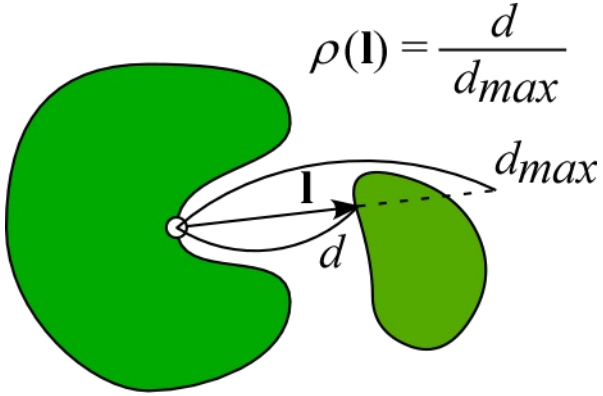
  - θ'_{ik} : bent normal $\mathbf{n}_{bent}$ と光線方向 $\mathbf{l}_k$ のなす角

可視性 (Visibility) と遮蔽度 (Obscurance)

- 環境遮蔽は自己遮蔽のみを対象としている
  - 近傍にある他の物体による遮蔽は考慮しない
- 遮蔽度 (Obscurance)
  - 近傍の物体の影響を距離にもとづいて推定
  - 遮蔽物までの距離関数 $\rho(\mathbf{l})$



$$\kappa_A = \frac{1}{\pi}\int_{\Omega} \rho(\mathbf{l}) \cos\theta_i \, d\omega_i$$

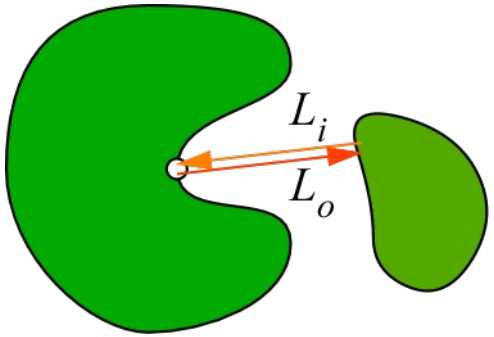


相互反射の考慮

- 環境遮蔽のみでは完全な大域照明より暗い
  - 相互反射を考慮する必要がある
- 相互反射の計算は非常にコストが高い

$$\kappa'_A = \frac{\kappa_A}{1 - \mathbf{c}_{amb}(1 - \kappa_A)}$$

遮蔽された方向から入射する放射輝度 L_i と
その点の放射輝度 L_o が等しいと仮定

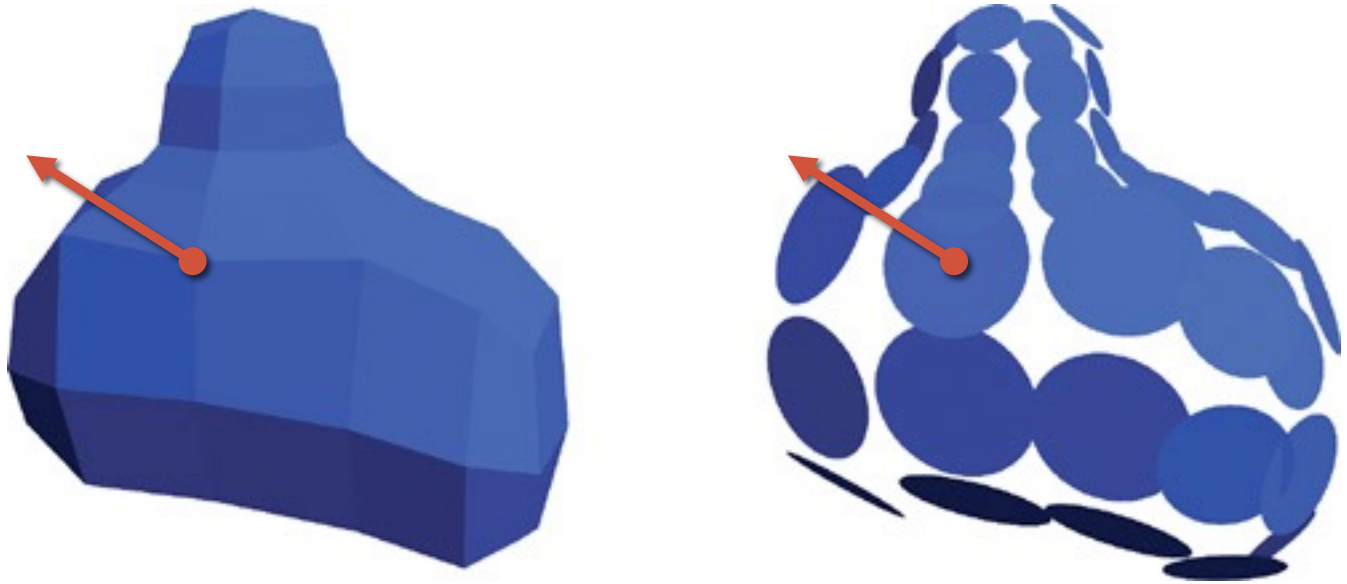


環境遮蔽の動的な計算

- 静的なシーン
  - 環境遮蔽係数 κ_A と bent normal $\mathbf{n}_{bent}$ は**事前計算**可能
- 動的なシーン，物体の変形
  - 環境遮蔽係数 κ_A と bent normal $\mathbf{n}_{bent}$ を動的に求めることで，より良い結果が得られる
    - 物体空間で処理する方法
    - スクリーン空間で処理する方法

物体空間で処理する方法

- オブジェクトメッシュの頂点位置に円盤状の物体を配置する
  - Bunnell, Michael. "Dynamic ambient occlusion and indirect lighting." *Gpu gems* 2.2 (2005): 223-233.
  - ILM が Pirates of the Caribbean で使った

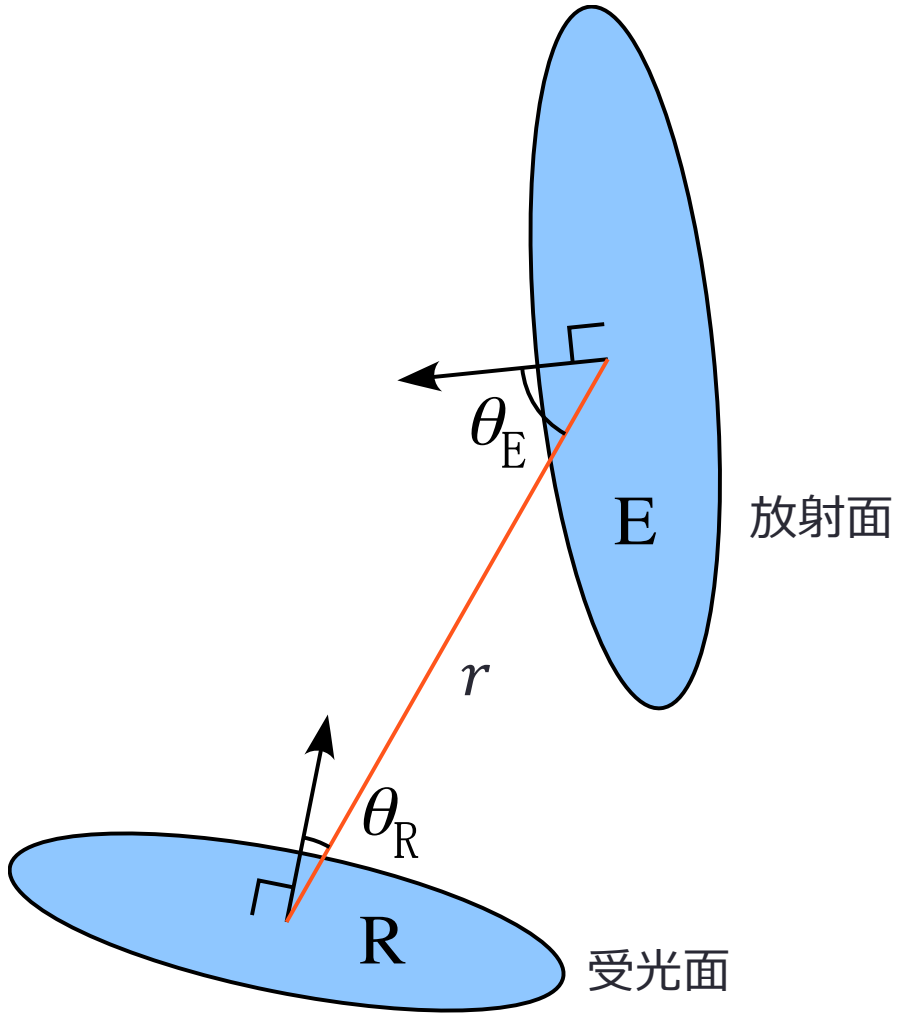


Bunnel の方法

- 円盤 R が円盤 E から受ける**影の影響**をモデル化

$$1 - \frac{r \cos\theta_E \max(1, 4\cos\theta_R)}{\sqrt{\frac{4}{\pi} + r^2}}$$

- 全ての円盤 E からの影響を合計して環境遮蔽係数 κ_A を求める

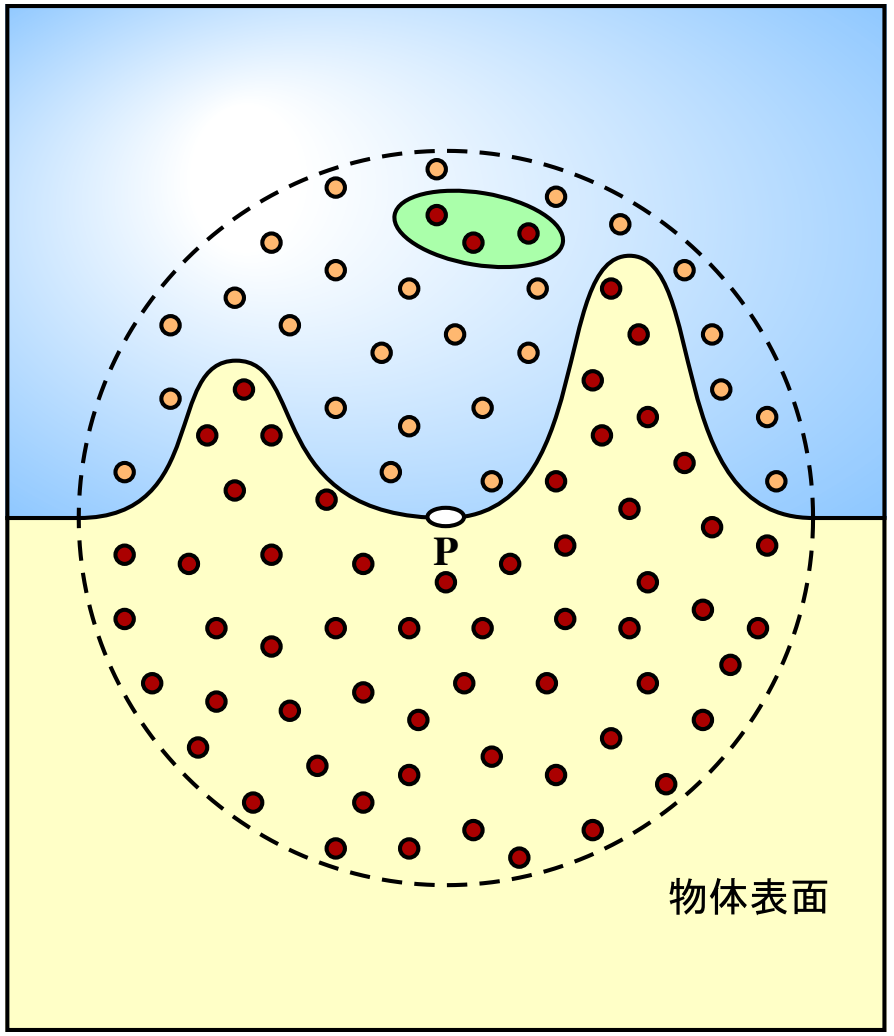


スクリーン空間で処理する方法

- 物体空間で処理する方法
  - 計算コストがシーンの複雑さに依存する
- スクリーン空間で処理する
  - シーンの複雑さには依存しない
  - 簡単に使える情報（奥行き値，法線）を使う
- Crytek 社が Crysis で用いた方法
  - デプスバッファだけを使う

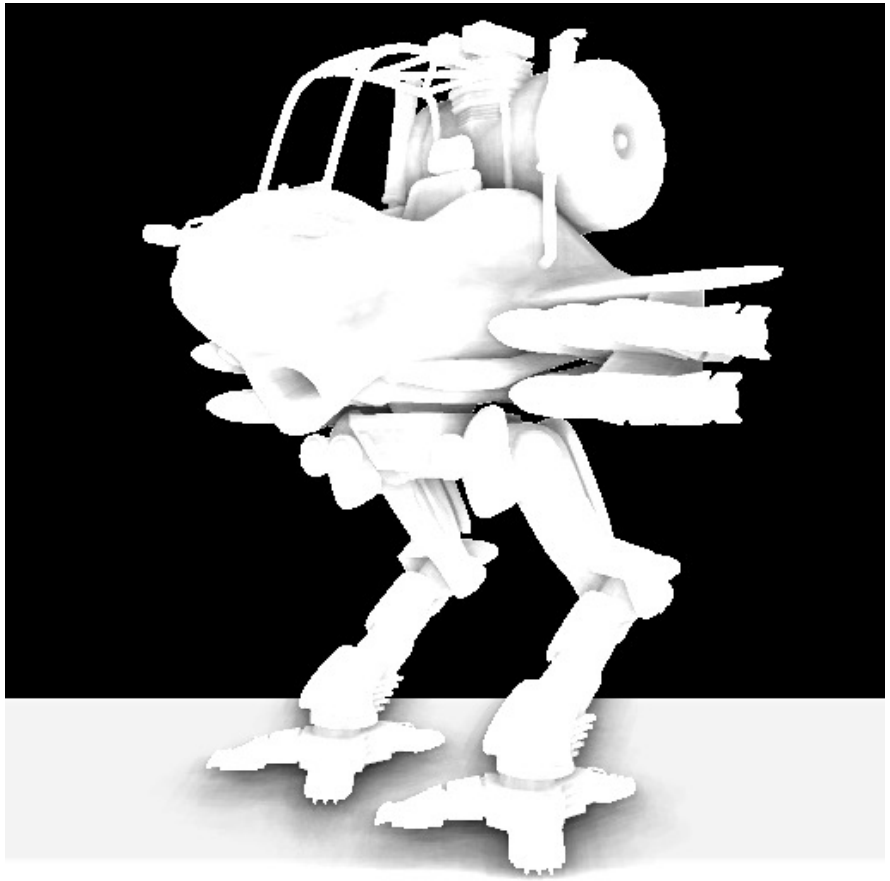
Crytek 社の方法

- 個々の画素の周りに球状に点を散布する
- 散布した点に対してデプステスト（デプスバッファとの比較）を行う
- デプステストに成功した点の数から κ_A を求める
  - 半分以上がデプステストに成功したら$\kappa_A = 1$とする
  - 各サンプル点の重みは距離に応じて減少させる

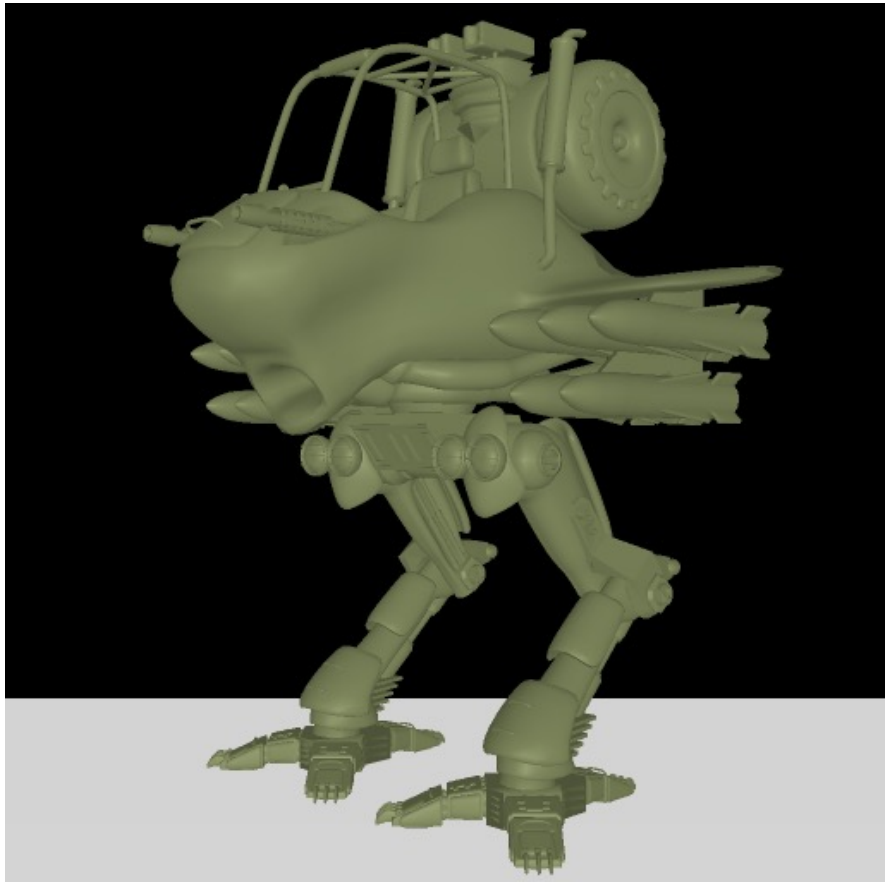


Crytek 社の方法

環境遮蔽係数

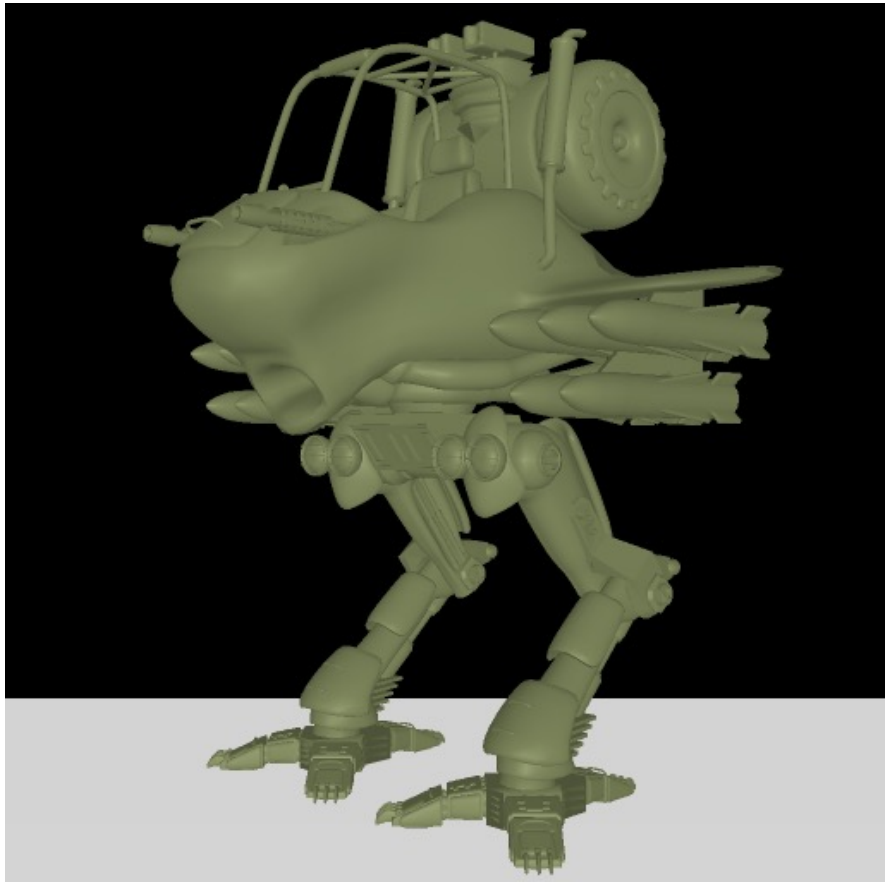


環境遮蔽なし

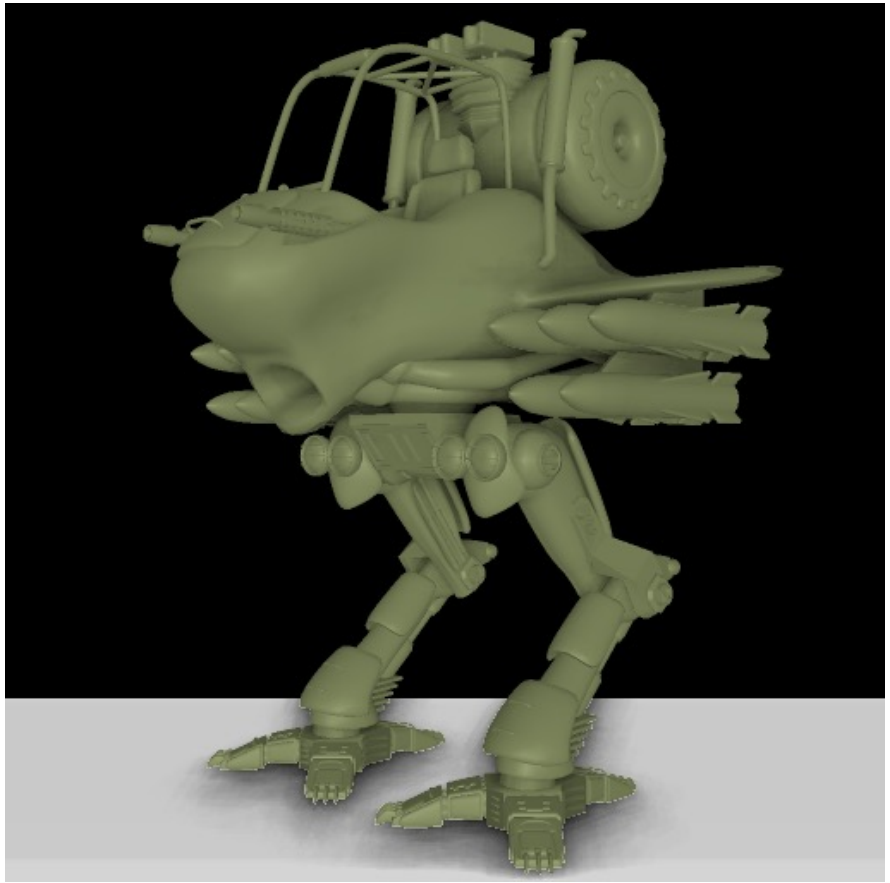


Crytek 社の方法による結果

環境遮蔽なし



環境遮蔽あり



Volumetric Obscurance

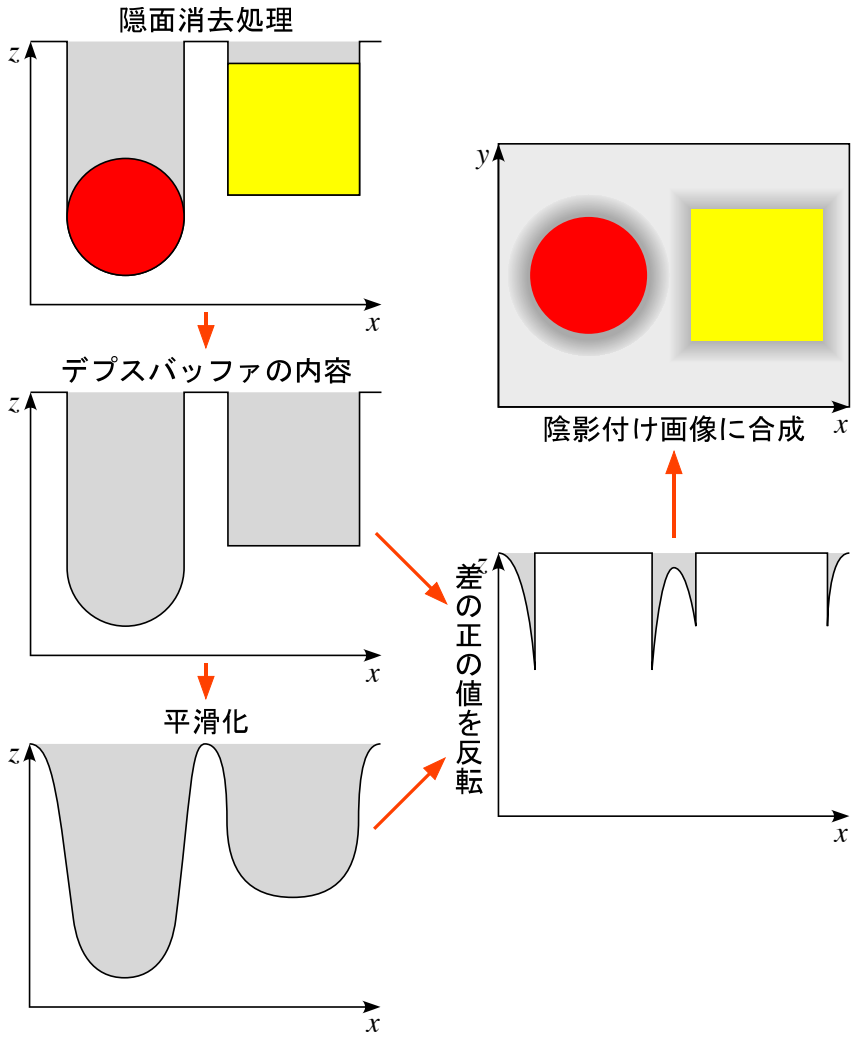
Volumetric Obscurance

Bradford J. Loos
University of Utah

Peter-Pike Sloan
Disney Interactive

Luft らの方法

- デプスバッファにアンシャープマスクをかける
  - Luft, Thomas, Carsten Colditz, and Oliver Deussen. Image enhancement by unsharp masking the depth buffer. Vol. 25. No. 3. ACM, 2006. (SIGGRAPH 2006)
- 輪郭線を強調する
  - 簡単で低コスト
  - 正確ではない



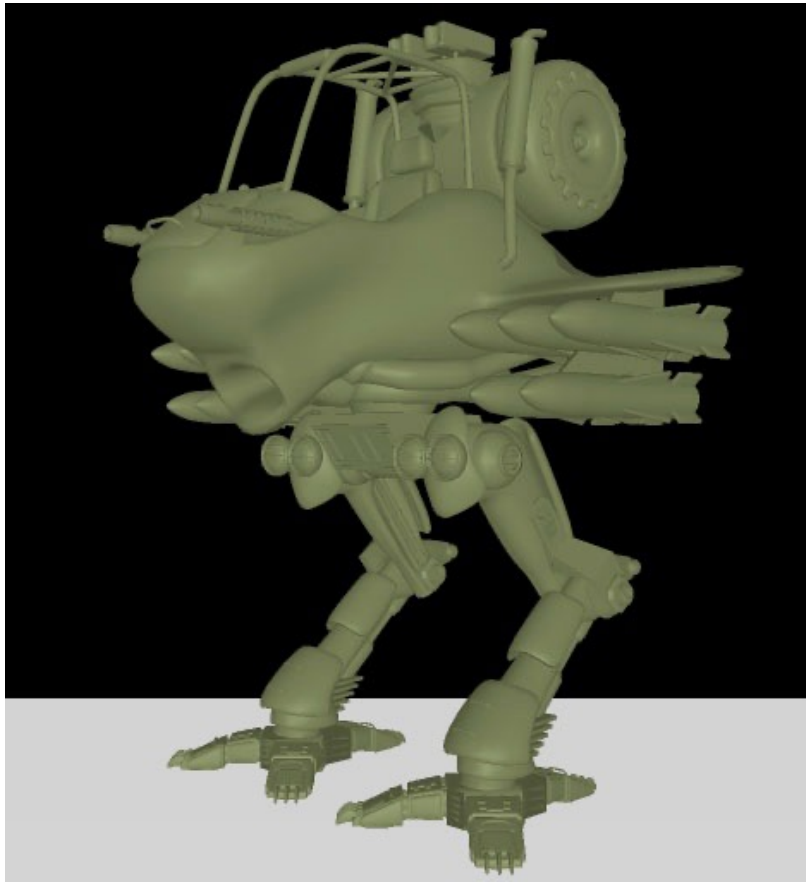
Luft らの方法による結果

深度（デプスバッファの内容）

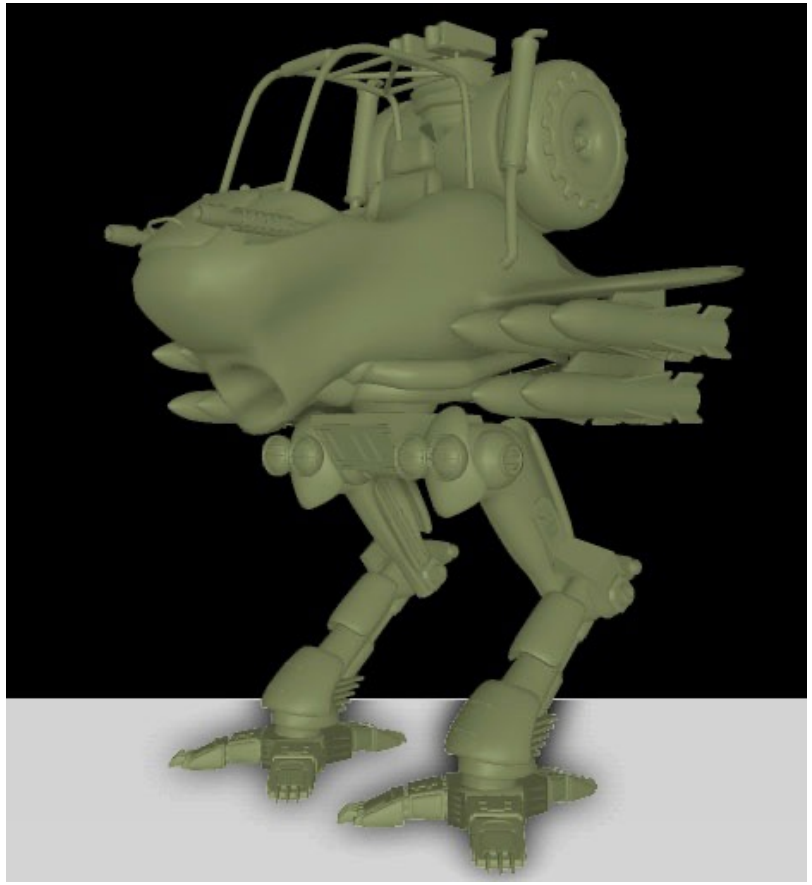
深度を平滑化したものとの差

Luft らの方法による結果

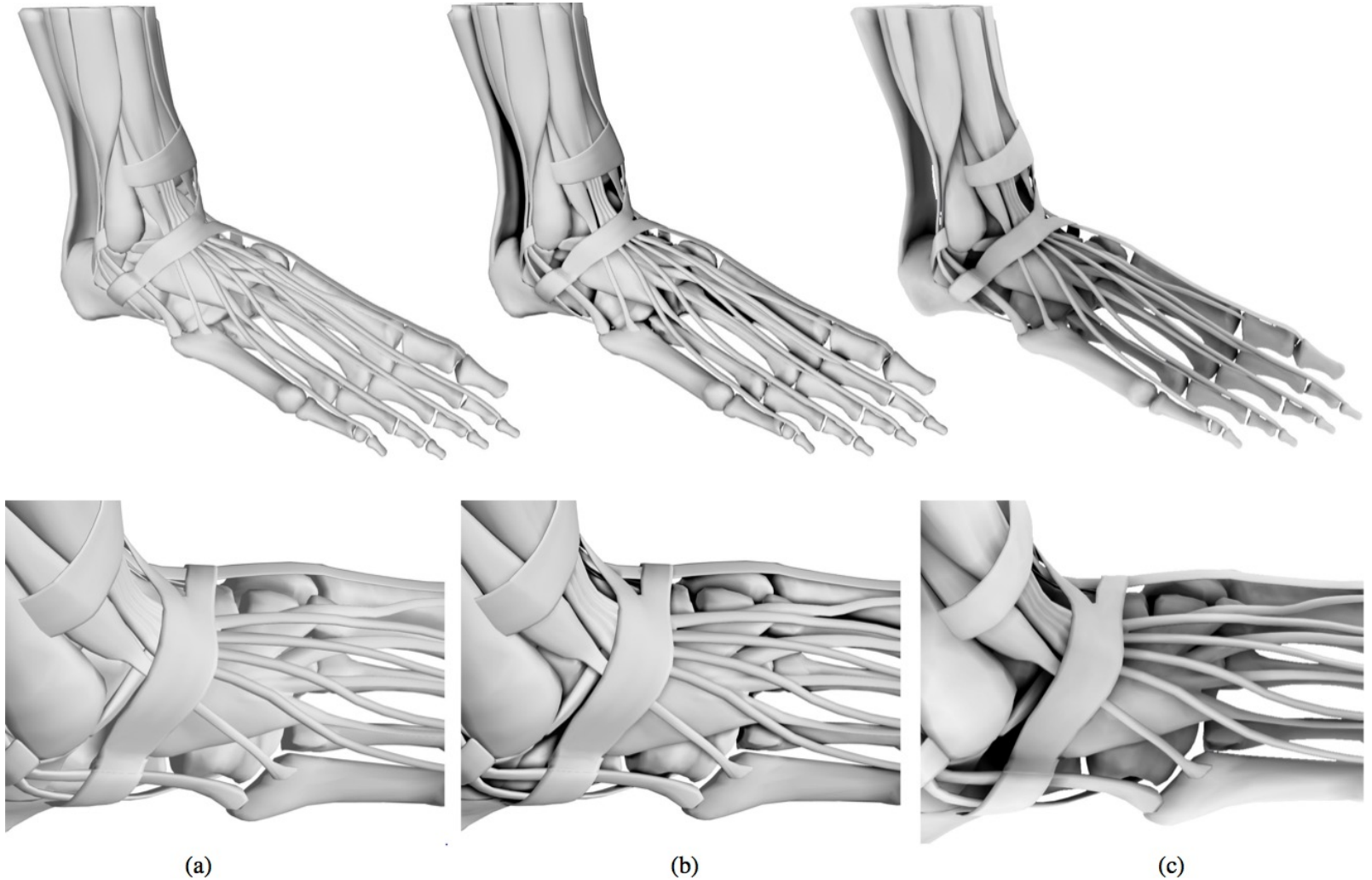
元画像



最終結果



Luft らによる結果

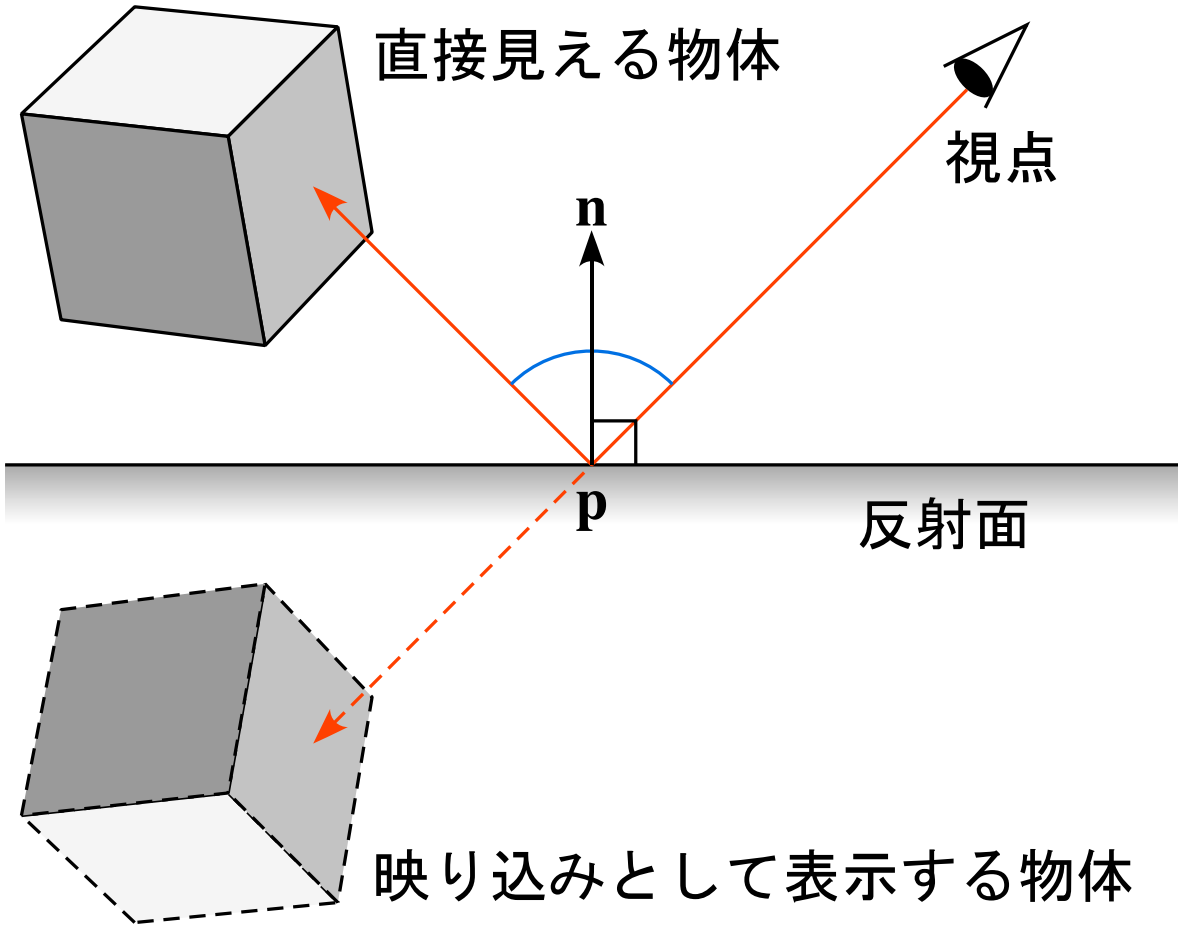


反射と屈折

光学的な現象のおおざっぱな近似

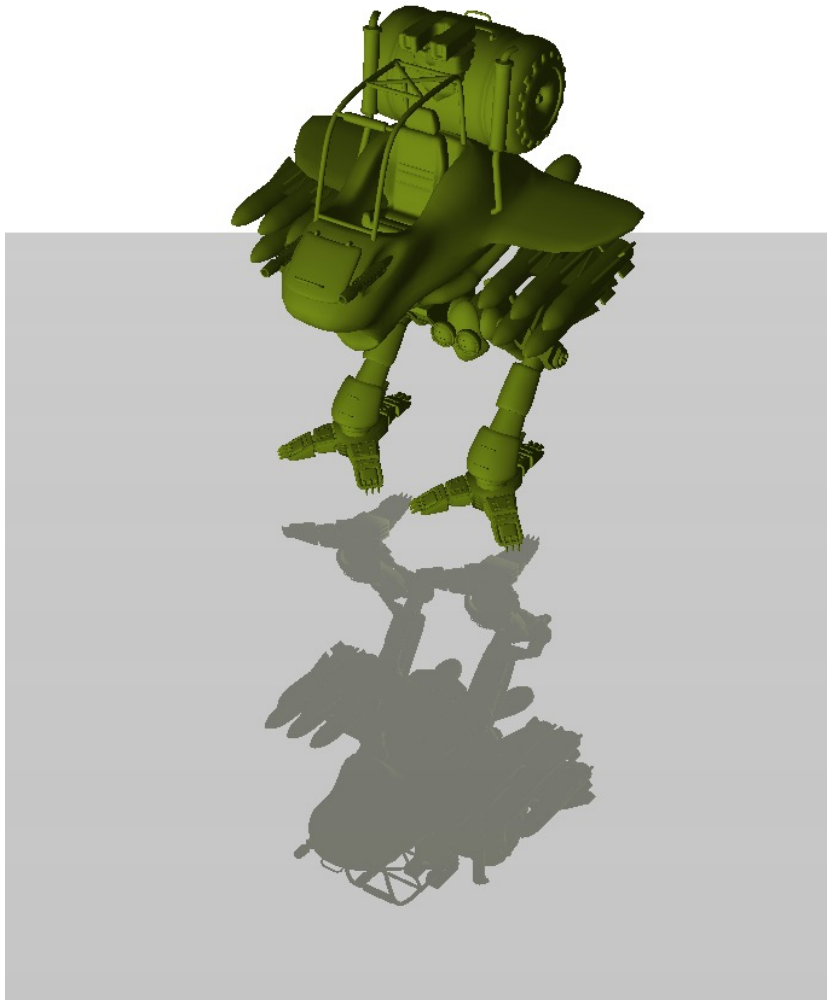
平面への映り込み

- 鏡のような平坦な面への映り込み
  - 任意の面による映り込みの特別な場合
  - 実装が容易



平面による反射の実装

- 視線の反射先に物体を置く代わりに，
  視線の先に反転した物体を置く



映り込みを求める変換

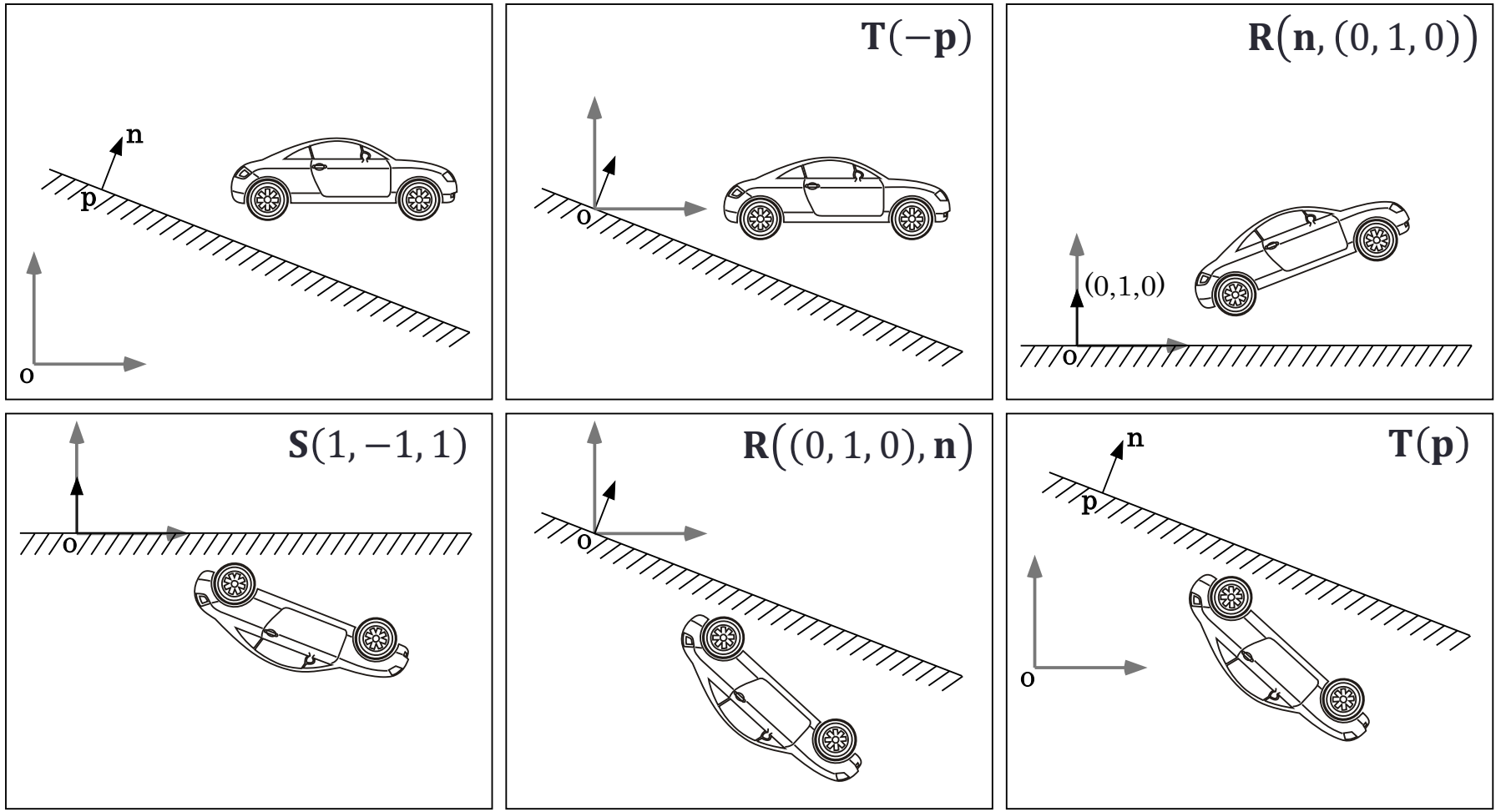
- 反射面の反対側に裏側にして配置する
  - $\mathbf{n}$: 反射面の法線ベクトル，$\mathbf{p}$: 反射面上にある（任意の）点の位置
  - $\mathbf{R}(\mathbf{u},\mathbf{v})$: ベクトル $\mathbf{u}$ をベクトル $\mathbf{v}$ 方向に向ける回転の変換
  - $\mathbf{T}(\mathbf{p})$：$\mathbf{p}$ に平行移動する変換
  - $\mathbf{S}(x,y,z)$: 各軸方向に x,y,z 倍にスケーリングする変換
- 変換行列

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\big(\mathbf{n},(0,1,0)\big)\mathbf{T}(-\mathbf{p}), \qquad \mathbf{M} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{S}(1,-1,1)\mathbf{F}$$

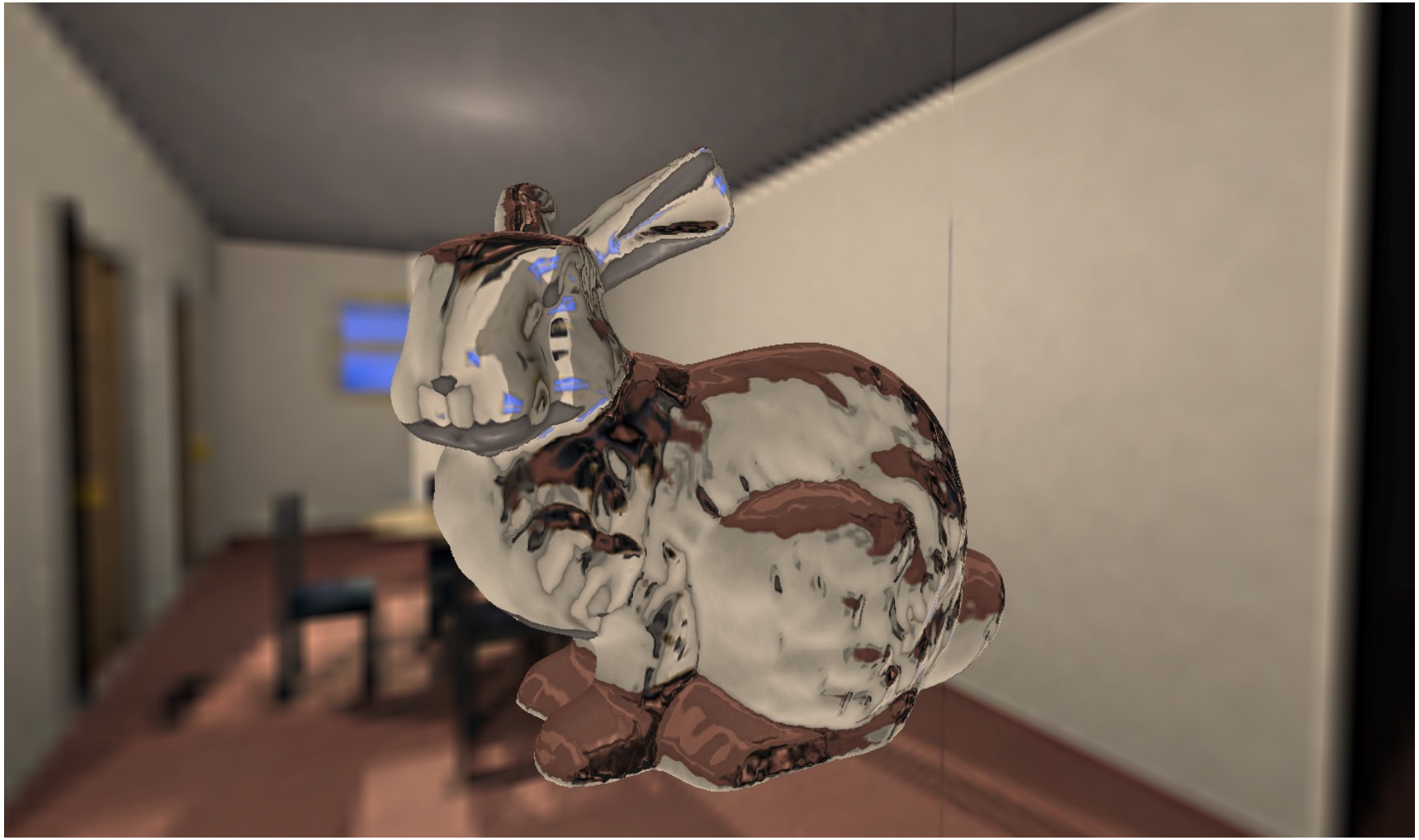
  - ここで

$$\mathbf{n} = (0,1,0)$$
$$\Downarrow$$
$$\mathbf{M} = \mathbf{T}(\mathbf{p})\mathbf{S}(1,-1,1)\mathbf{T}(-\mathbf{p})$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\big(\mathbf{n}, (0,1,0)\big)\mathbf{T}(-\mathbf{p}), \mathbf{M} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{S}(1,-1,1)\mathbf{F}$$



屈折



スネルの法則

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

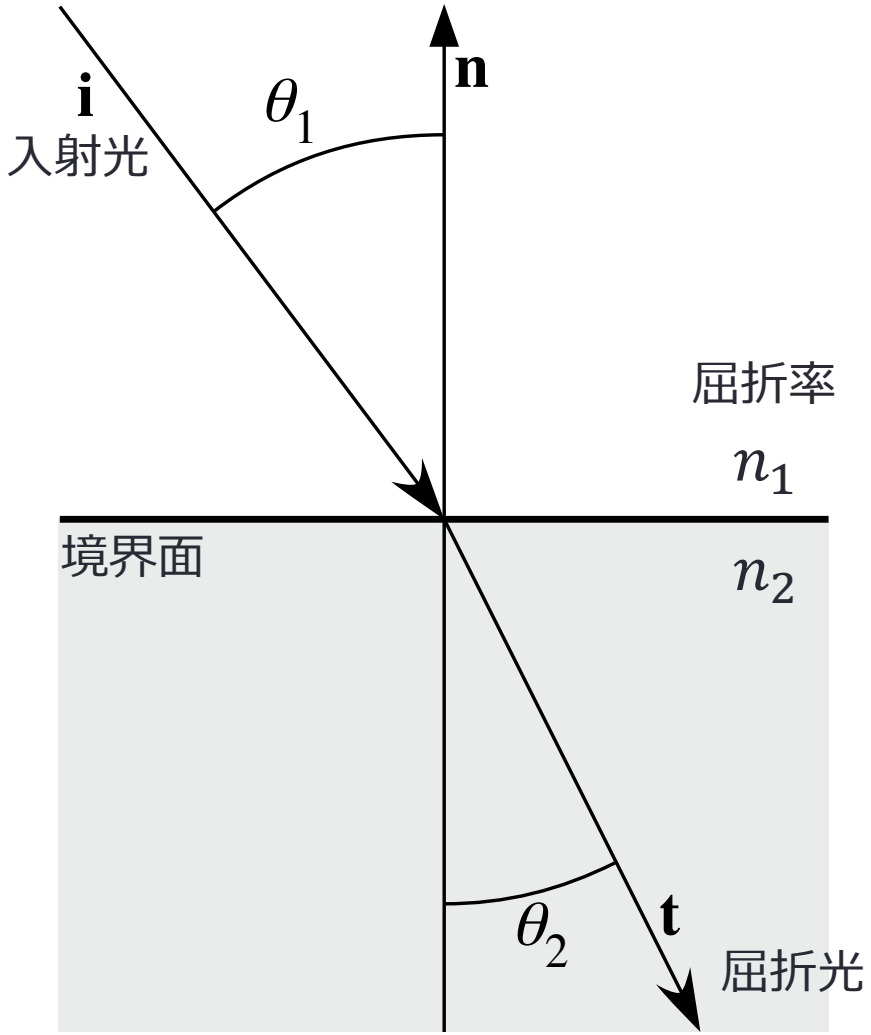
- 屈折方向ベクトルの算出

$$\mathbf{t} = r\mathbf{i} + (w - k)\mathbf{n}$$
$$r = n_1/n_2$$
$$w = -(\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})$$
$$k = \sqrt{1 + (w - r)(w + r)}$$

- 簡易な計算方法

$$\mathbf{t} = -c\mathbf{n} + \mathbf{i}$$
$$c \approx 1.0$$

水の場合
1.0前後



反射と屈折の組み合わせ

物体の裏側の面での屈折は考えていない

https://github.com/tokoik/imsss

一般的な大域照明

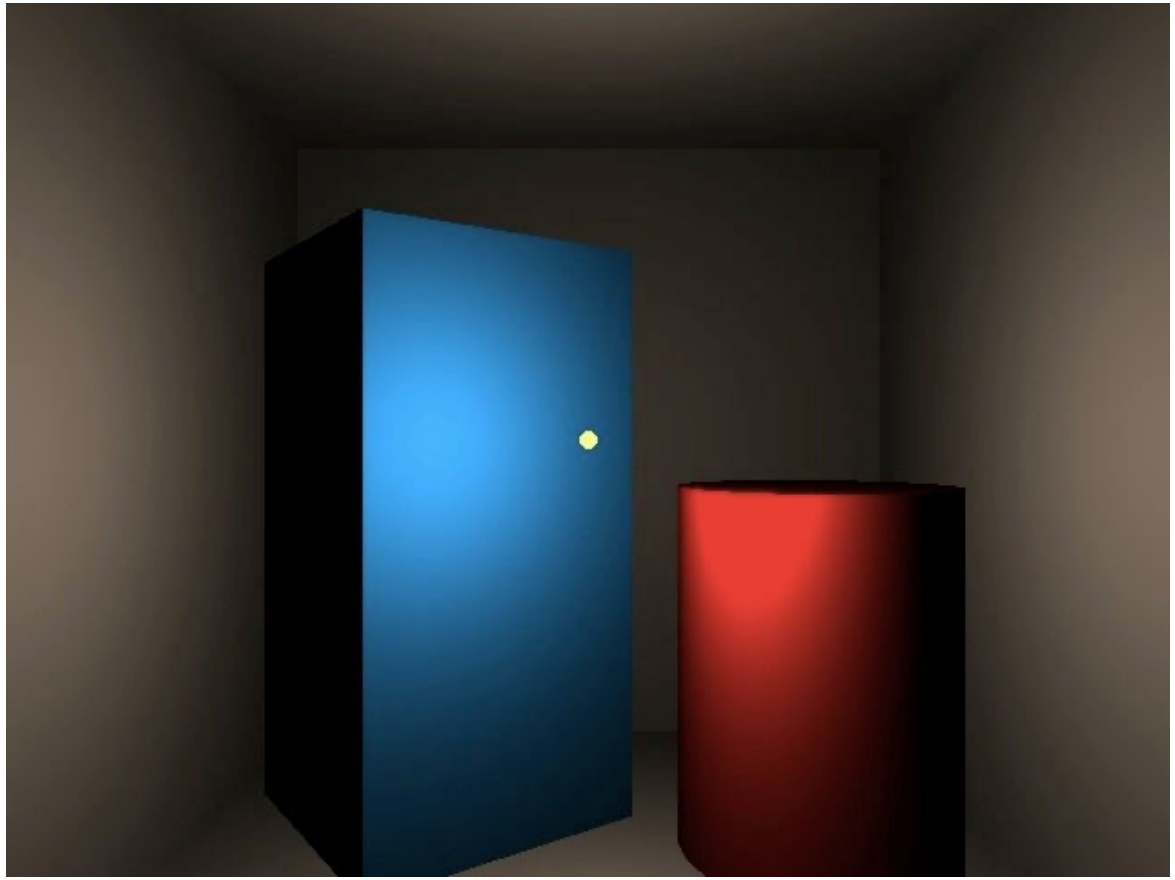
間接光を考慮する

一般的な大域照明

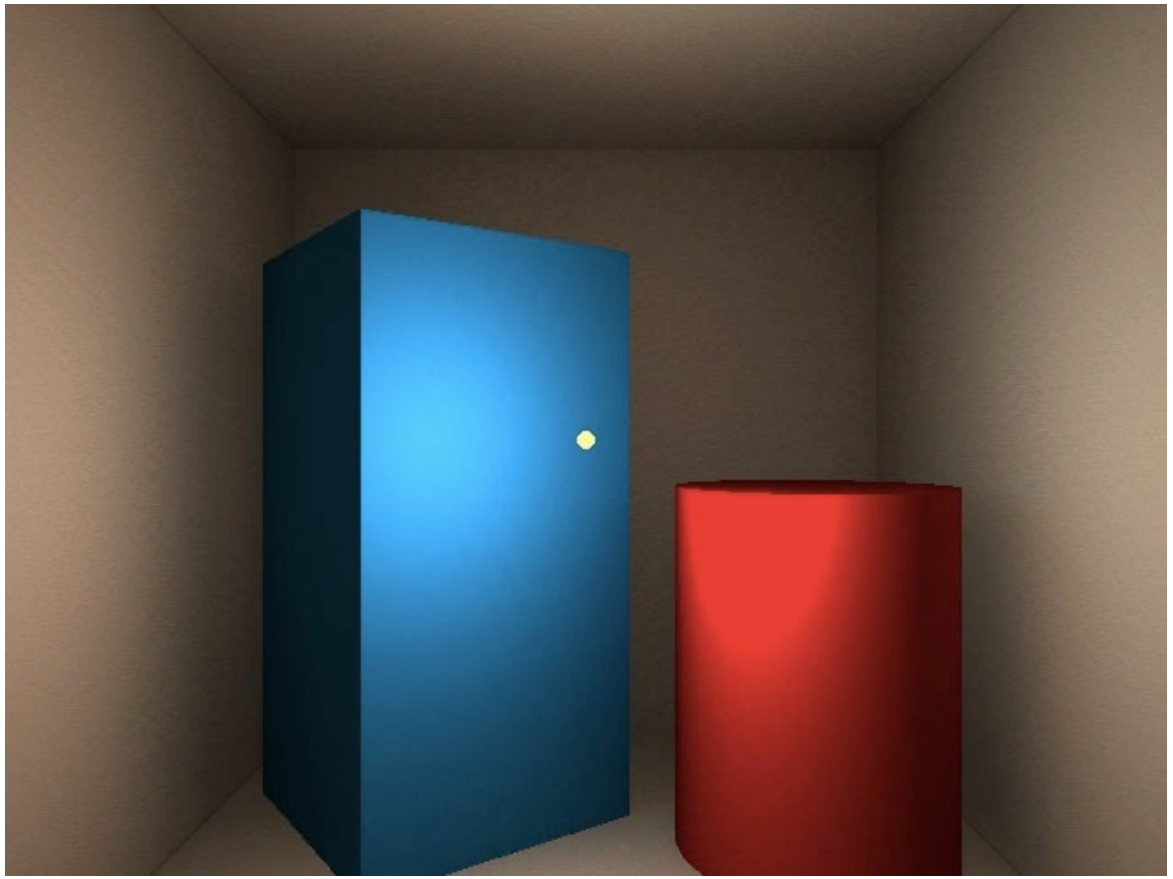
- 点光源の明るさは距離の２乗に反比例する
  - リアルさが無い
  - 明るさが急激に減衰するため取り扱いにくい
    - 距離に反比例させたり，距離に依存しないとして使う
- 閉じた部屋で点光源を点灯する
  - 光源の明かりは壁などに反射して周囲を照らす
  - 光源の直接光が届かないところにも光が届く
- 壁からの反射を取り扱うには大域照明モデルを用いる

壁からの反射の有無

壁からの反射なし



壁からの反射あり



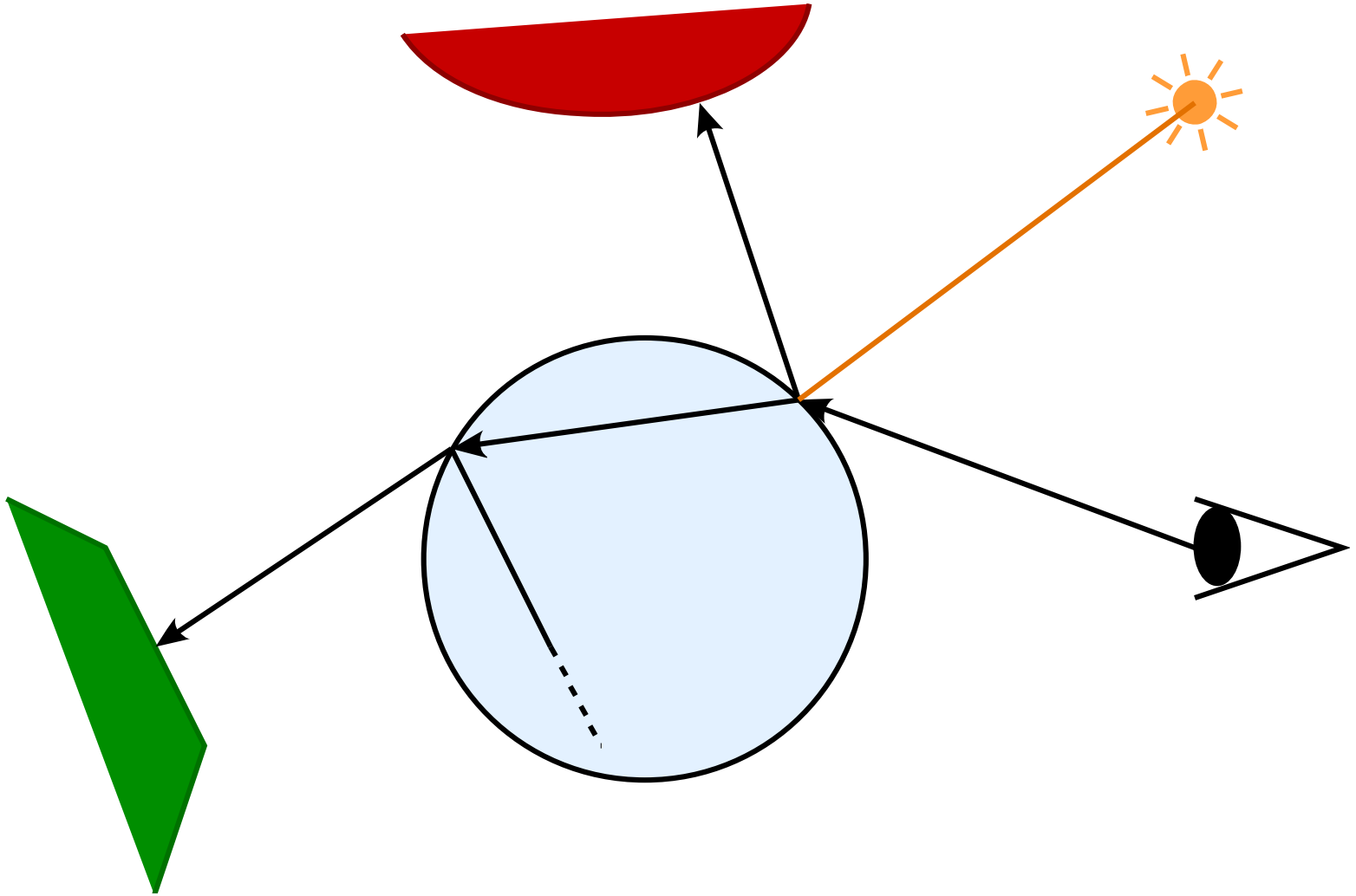
大域照明の計算法

- ほとんどの手法は以下の２つの手法を基にしている
  - ポイントサンプリング法（レイトレーシング法）
  - 有限要素法（ラジオシティ法）

レイトレーシング法

- Whitted, Turner. "An improved illumination model for shaded display." ACM SIGGRAPH Computer Graphics. Vol. 13. No. 2. ACM, 1979.
  - モデルを通過する光の微小な束を追跡するポイントサンプリング法
  - 観察者から光源に向かって反対方向に光線を追跡する
    - 鏡の反射，屈折，直接光による照明は扱える
    - 被写界深度，モーションブラー，コースティクス，間接照明，光沢反射などは扱えない

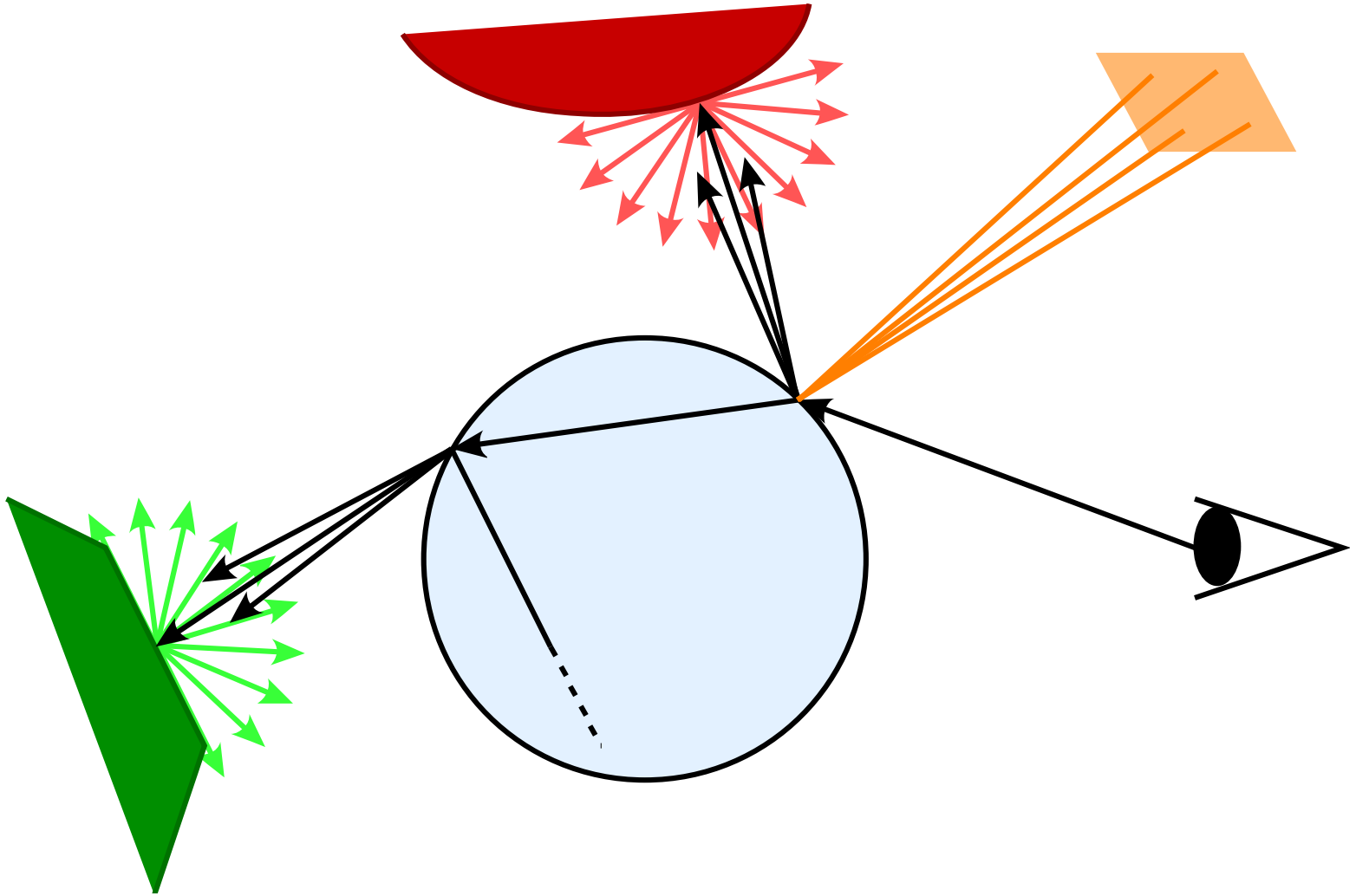
レイトレーシング法



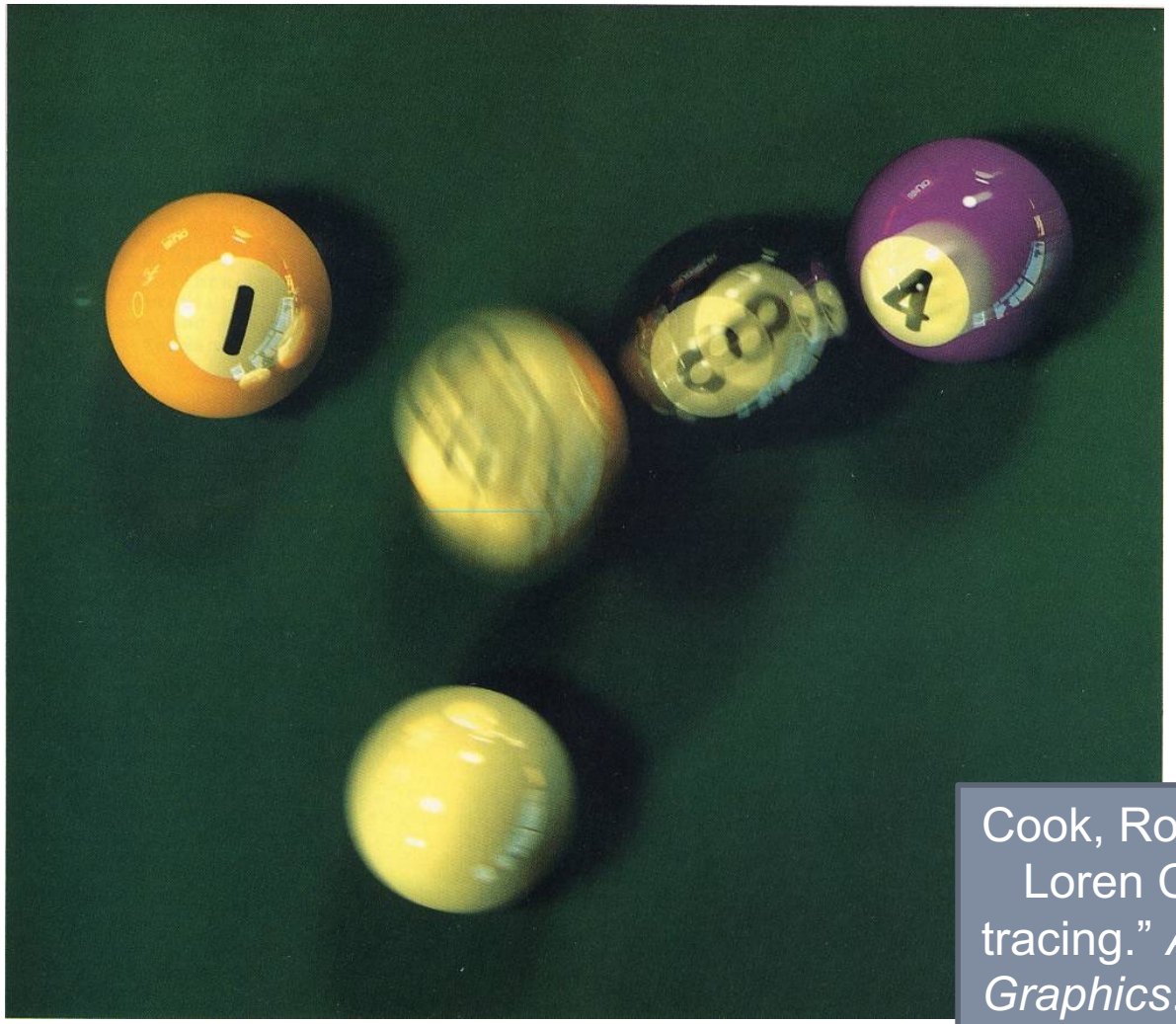
モンテカルロレイトレーシング法

- 全方向から到来する光線を考慮して光線を確率的に散布する
  - あらゆる種類の光の散乱を取り扱える
  - 生成画像中にノイズが含まれる
    - 散布する光線の数を増やす
    - 光源側からも光線を散布する
      - （双方向モンテカルロレイトレーシング法）
  - 計算時間が（とてつもなく）長い
    - 放射照度キャッシング法などの効率化手法

モンテカルロレイトレーシング法



Distributed ray tracing



Cook, Robert L., Thomas Porter, and Loren Carpenter. "Distributed ray tracing." *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. Vol. 18. No. 3. ACM, 1984.

Rob Cook

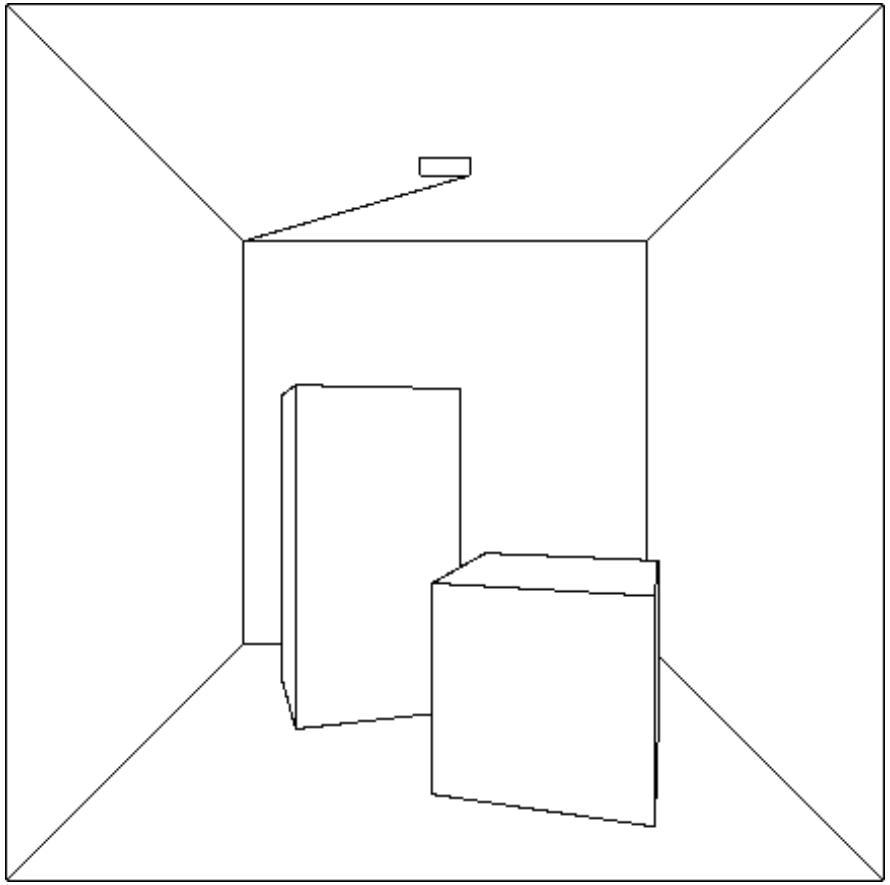

SIGGRAPH
acm
SAN FRANCISCO JULY 22-26
85
ROB COOK
Film and Video Show Chair
Lucasfilm Ltd.
P.O. Box 2009
San Rafael, CA 94912 USA
415-499-0239

ラジオシティ法

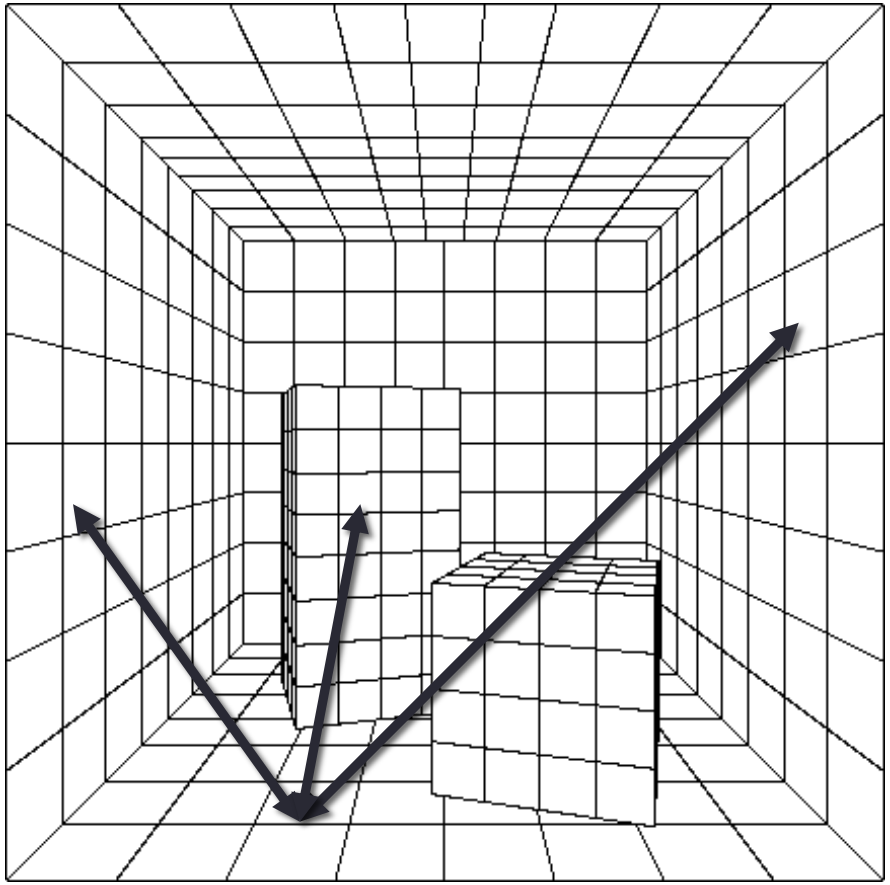
- モデルの表面間を行き交う光の平衡状態を計算する
  - モデルを小さなパッチに分割して，最終的な光の分布をこのパッチ単位で表現する
  - すべてのパッチ間を行き交う光を記述する連立方程式を解くことによって光の分布を算出する
  - 完全拡散反射面に適用できる
    - 鏡面反射（する単純な曲面）を取り扱えない
  - Cohen, Michael F., and Donald P. Greenberg. "The hemi-cube: A radiosity solution for complex environments." ACM SIGGRAPH Computer Graphics. Vol. 19. No. 3. ACM, 1985.
  - しかし、これより前 (1984年) に西田らが発表していた
    - http://nishitalab.org/user/nis/ourworks/radiosity/radiosity.html

ラジオシティ法

初期メッシュ

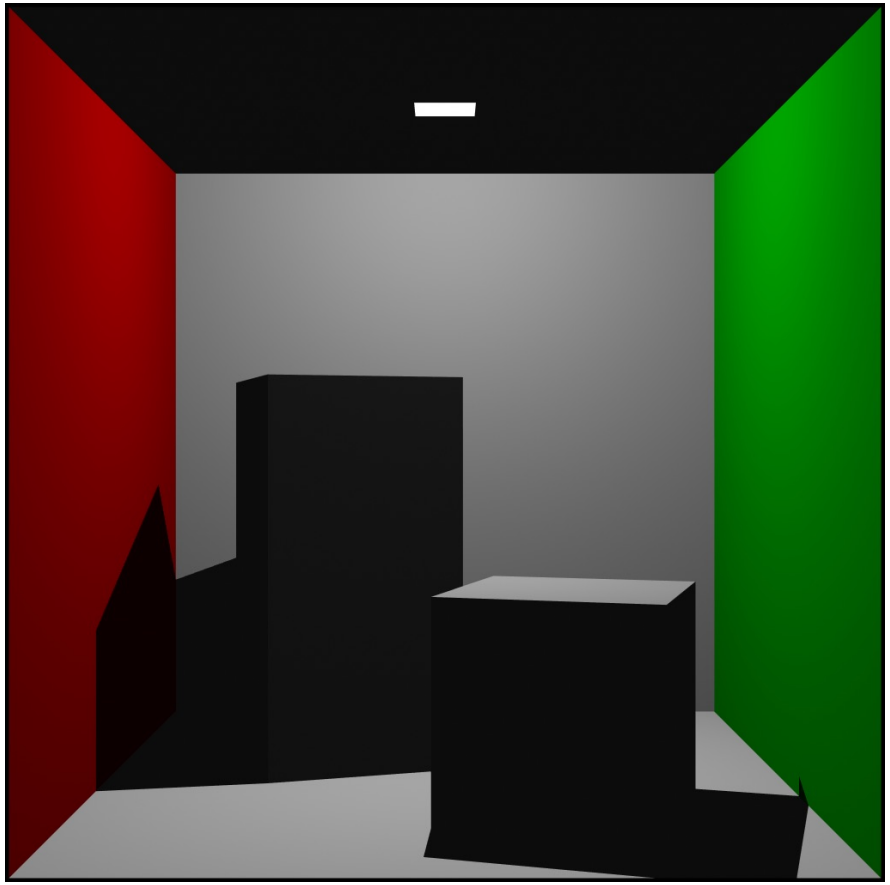


メッシュ分割

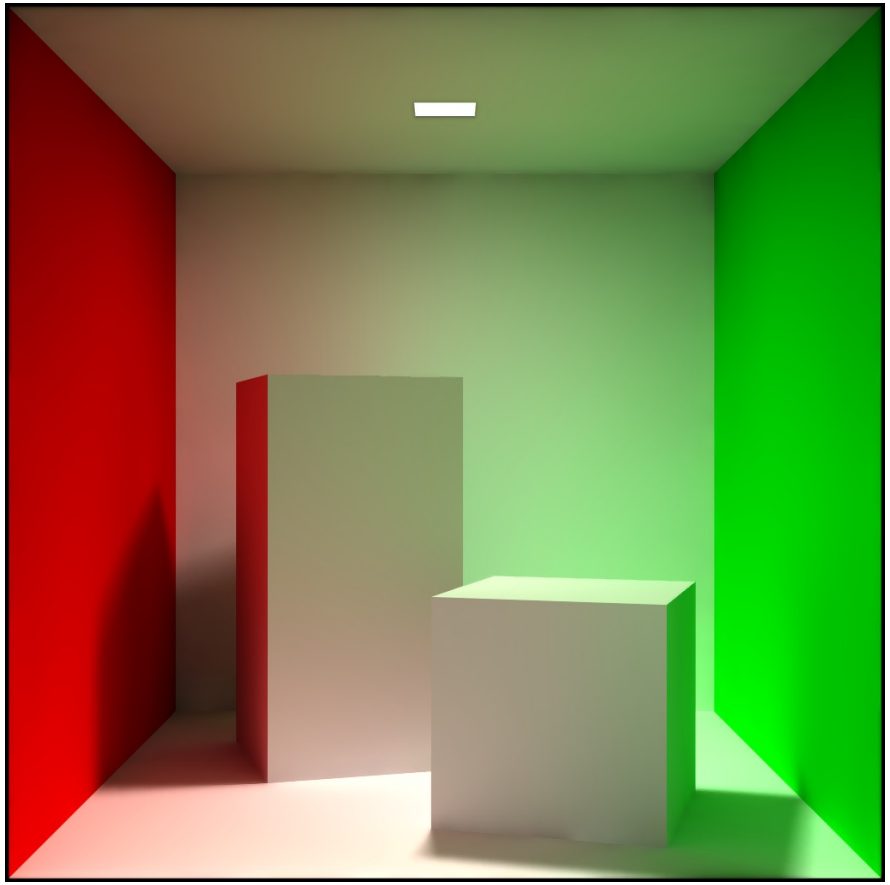


ラジオシティ法

レイトレーシング法



ラジオシティ法



混合手法と多段階手法

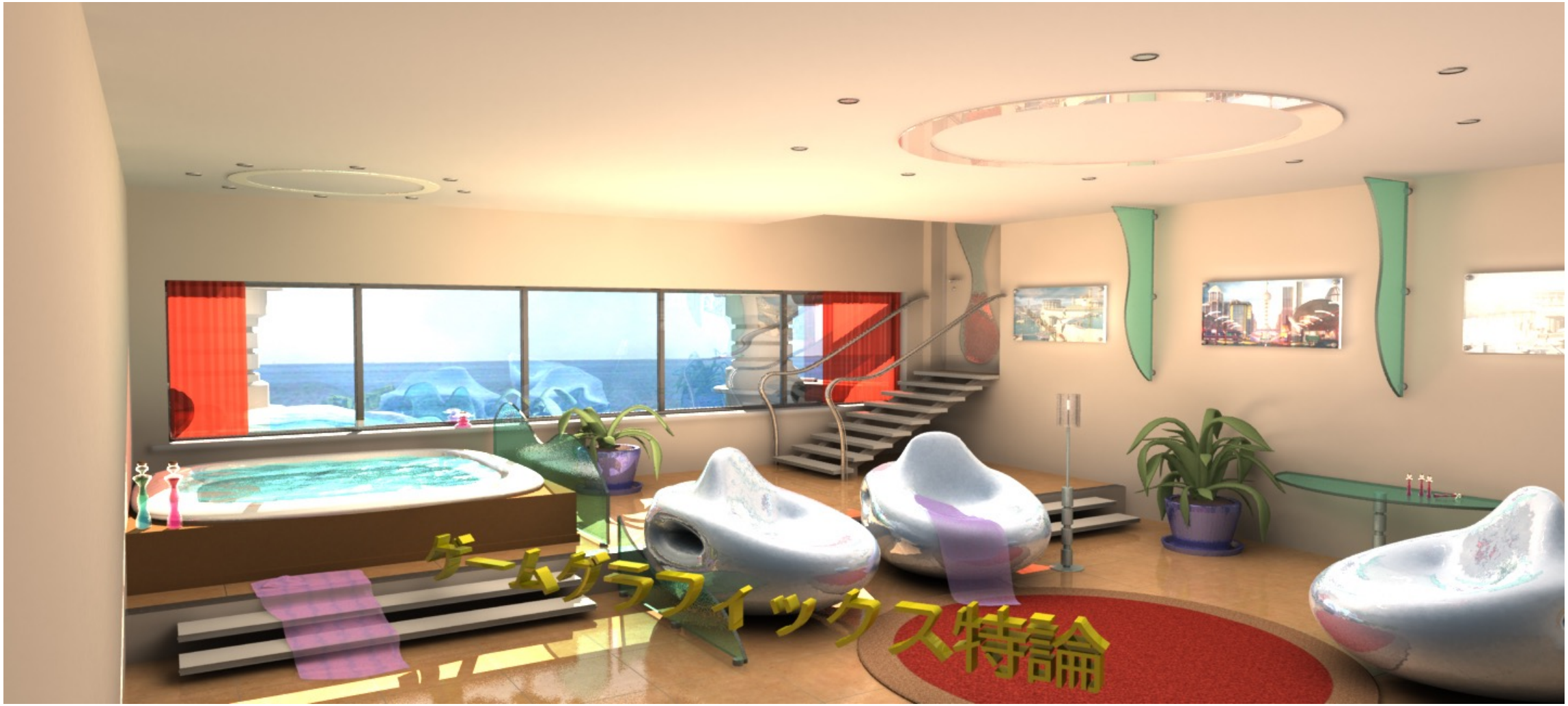
- レイトレーシング法とラジオシティ法を組み合わせる
  - レイトレーシング法は鏡面反射が得意
  - ラジオシティ法は拡散反射が得意
- ラジオシティ法に鏡面反射を付加する
  - その部分だけレイトレーシング法を応用
    - 目から見える影を計算するための拡張
    - コースティクスを描くための拡張

コースティクス（集光模様）

混合手法と多段階手法

- パストレーシング（経路追跡法）
  - レンダリング方程式の解法
    - Kajiya, James T. "The rendering equation." ACM Siggraph Computer Graphics. Vol. 20. No. 4. ACM, 1986.
  - 視点から複数本の視線を出して１本１本の経路を統計的に決定する
  - 目から直接見えるすべての光の散乱を扱う
    - コースティクスを除く
- ラジオシティ法は拡散面における間接照明の計算に用いる
  - モンテカルロレイトレーシング法は最終画像に要求される詳細な部分の描画に優れている
  - 間接照明の推定は苦手である

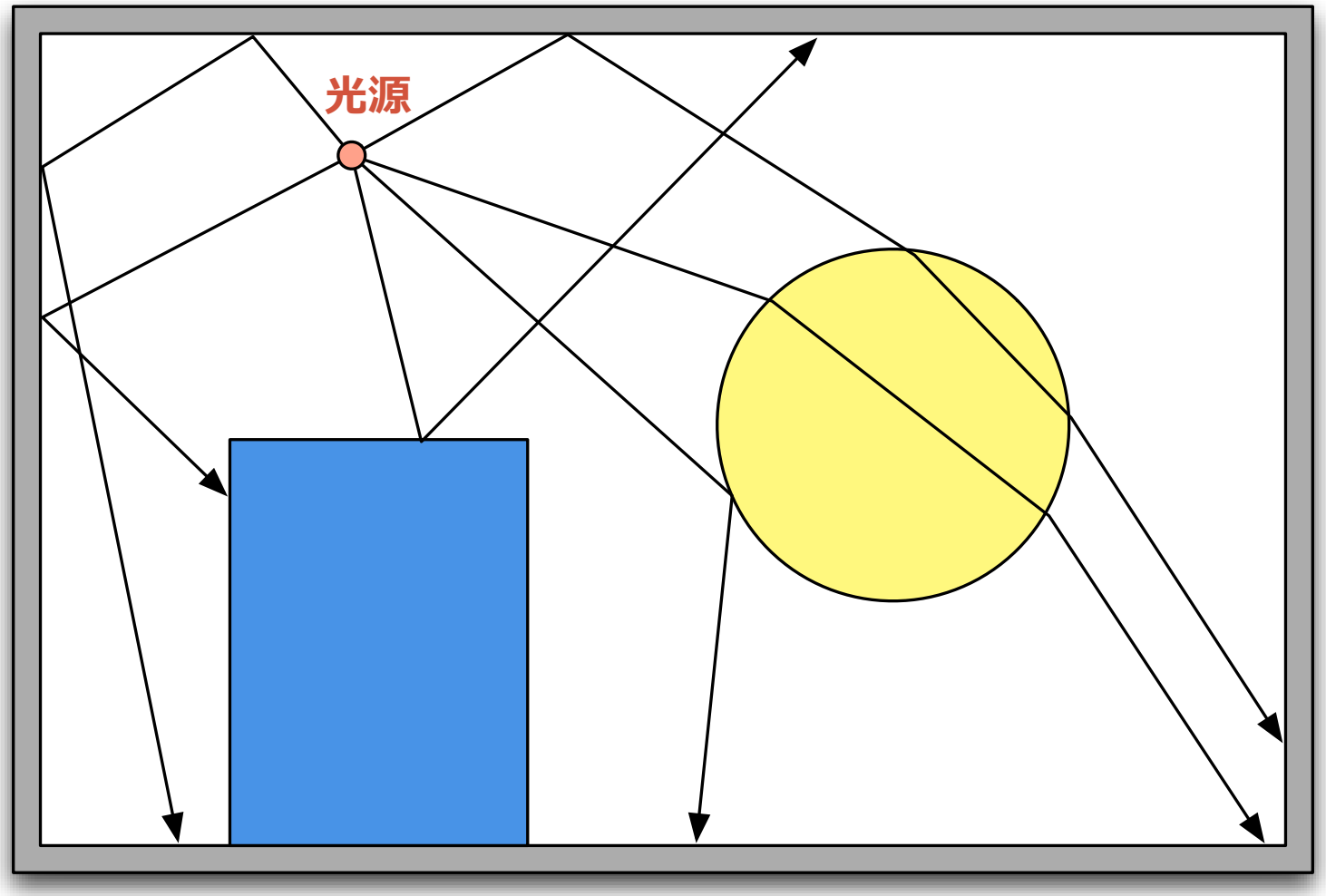
ラジオシティとレイトレーシング



フォトンマッピング法

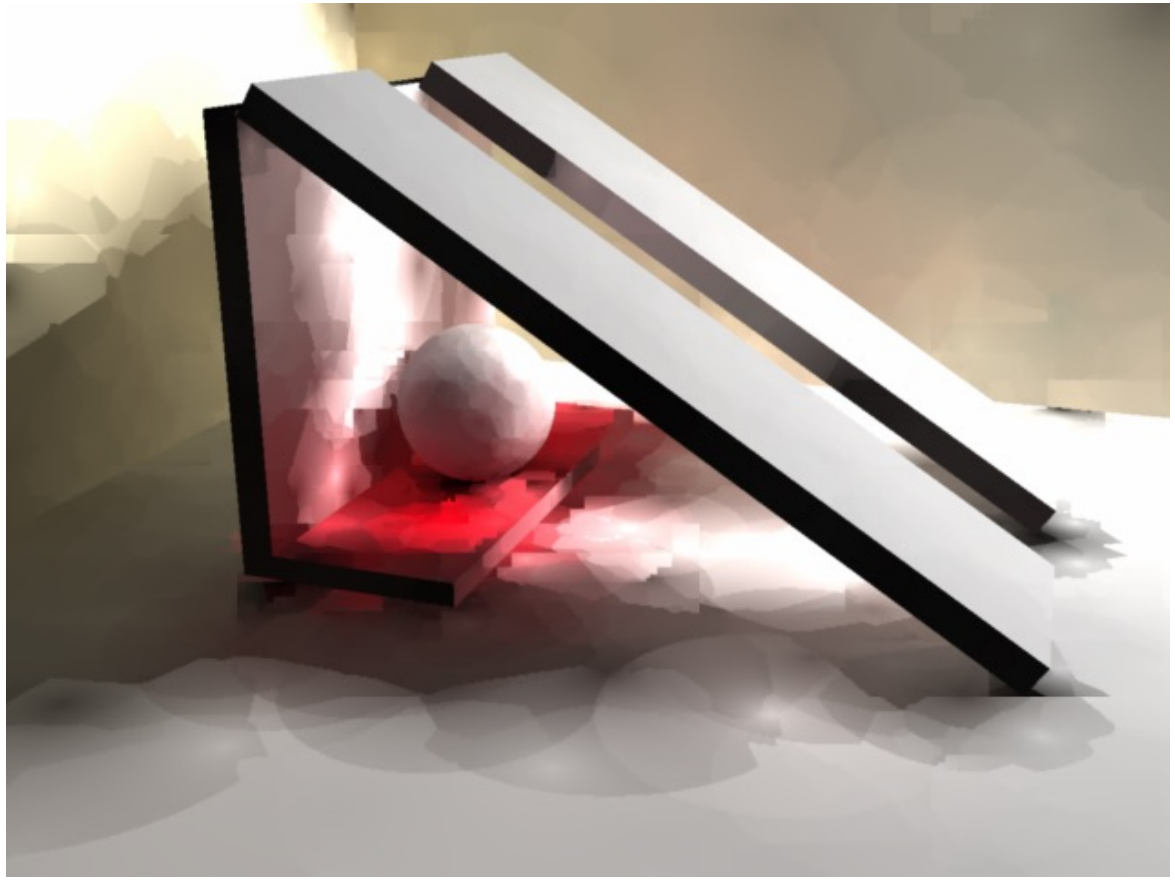
- フォトンマップ
  - 照明情報や幾何情報から独立したデータ構造
    - 非常に複雑なモデルの照明の記述にも利用可能
  - 光源から放射されシーン中を伝搬したフォトンで構成される
  - すべてのフォトンの衝突に関する情報を保持する
  - Jensen, Henrik Wann. Realistic image synthesis using photon mapping. AK Peters, Ltd., 2001.
- モンテカルロレイトレーシングとの組み合わせ
  - 光が集まるところがわかるので非常に効率化される

フォトンマッピング法

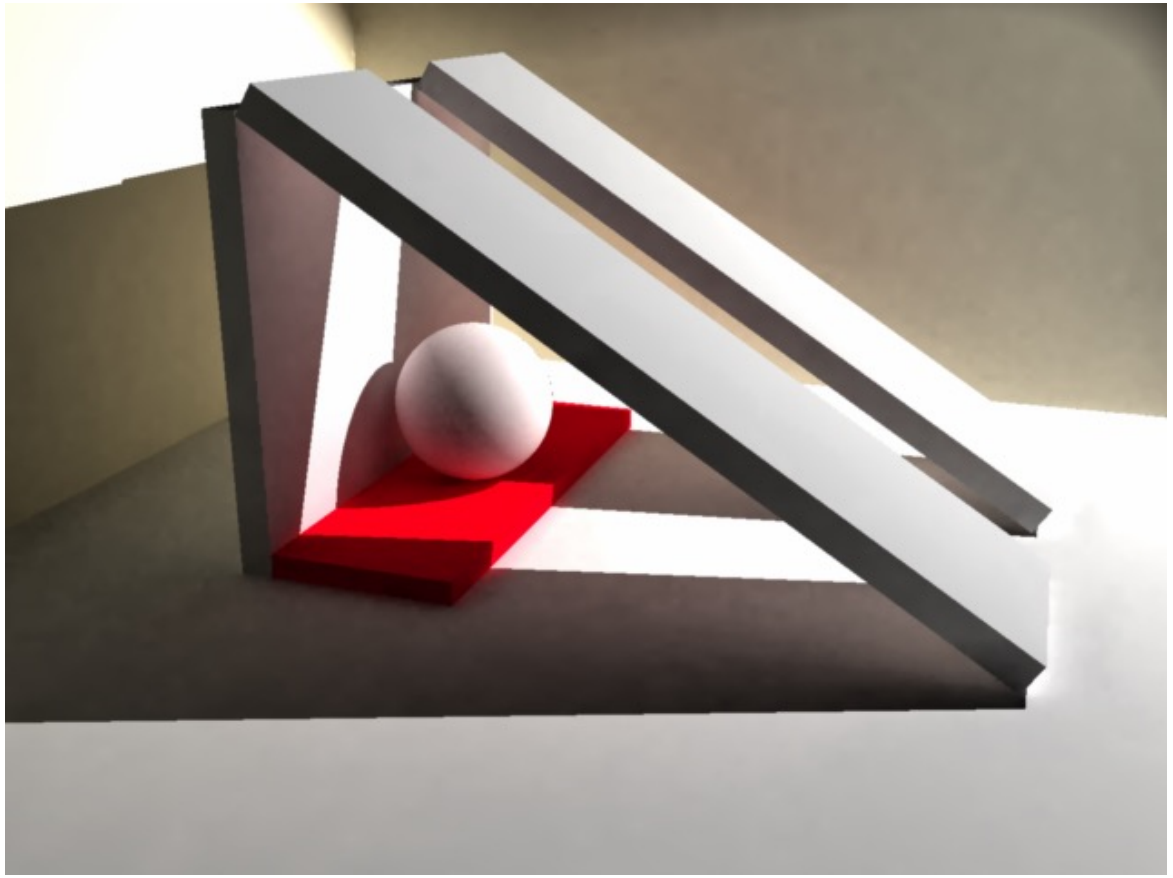


フォトンマッピング法

フォトンマップ



レンダリング結果



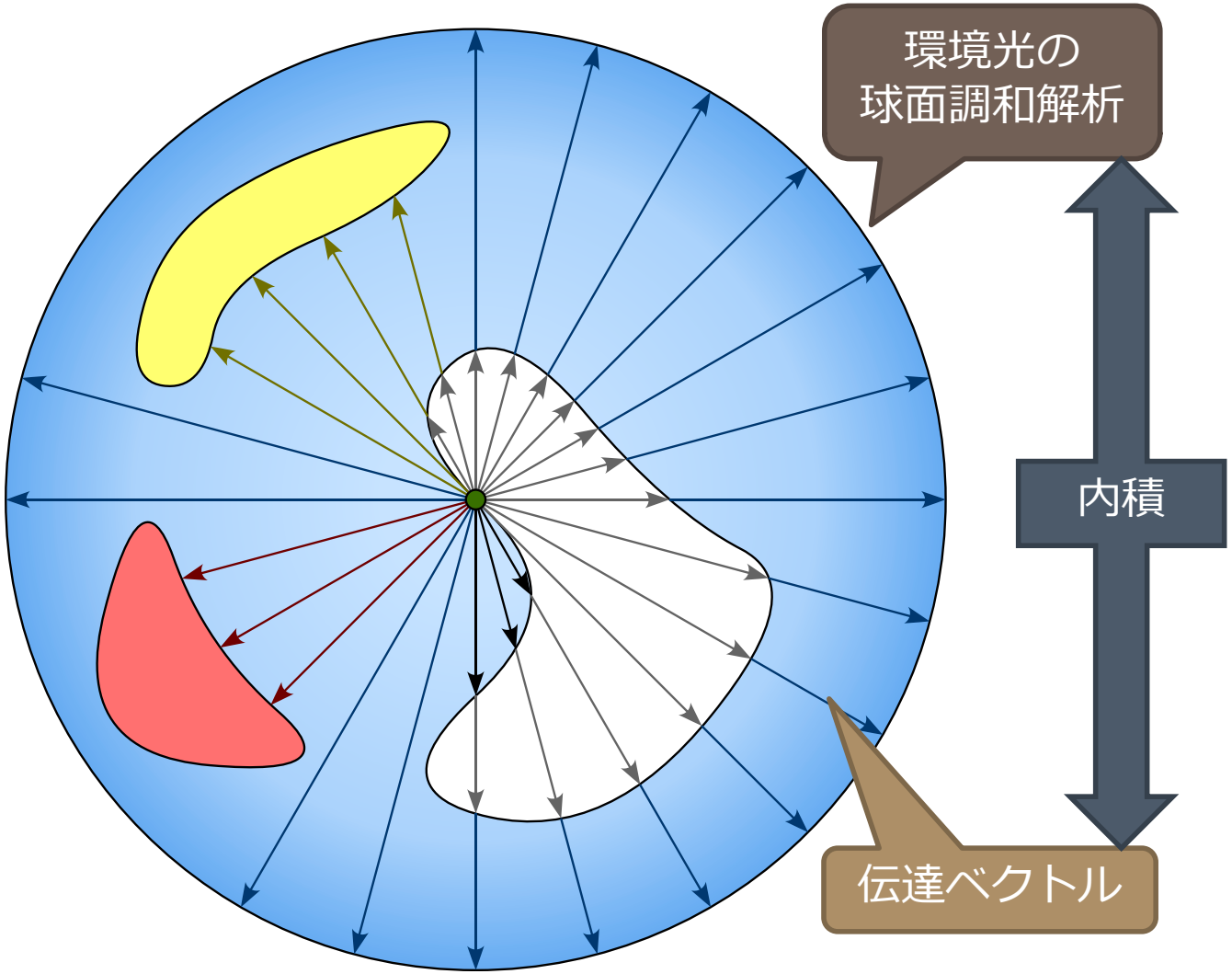
大域照明のリアルタイム処理

事前計算による方法

Precomputed Radiance Transfer

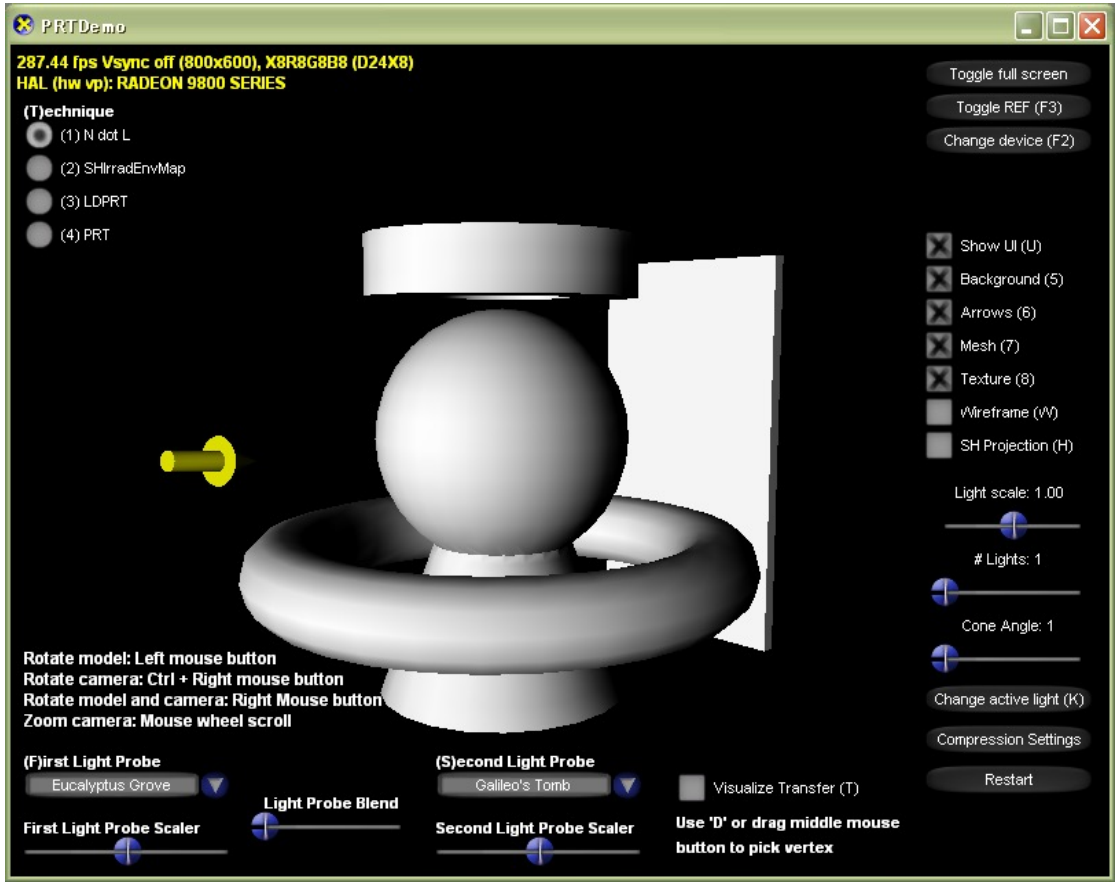
- 計算済み放射輝度伝搬
  - Sloan, Peter-Pike, Jan Kautz, and John Snyder. "Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments." ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 21. No. 3. ACM, 2002.
  - 大域照明の事前計算による高速化
    - 物体上の各点に対して無限遠から光を当てた場合の影のつき方を計算し伝達ベクトルを求める
    - 周囲の光源情報を球面調和関数の係数で表す
    - この係数と伝達ベクトルの内積で反射光を求める
    - Direct X9.0c に組み込み
  - 無限遠にある低周波の光源環境において有効
    - 局所光源に対応できない
    - 物体の変形に対応できない

伝達ベクトル

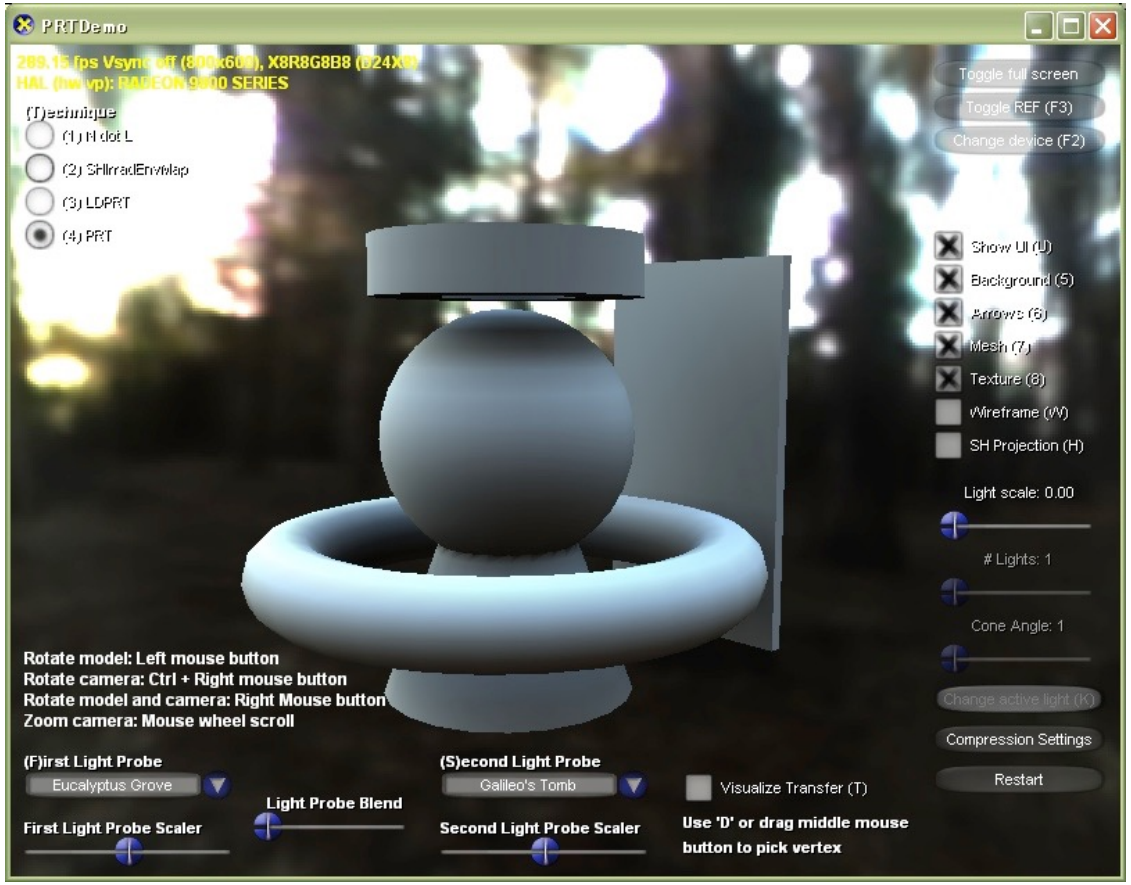


DirectX の PRT 機能

標準的な拡散反射

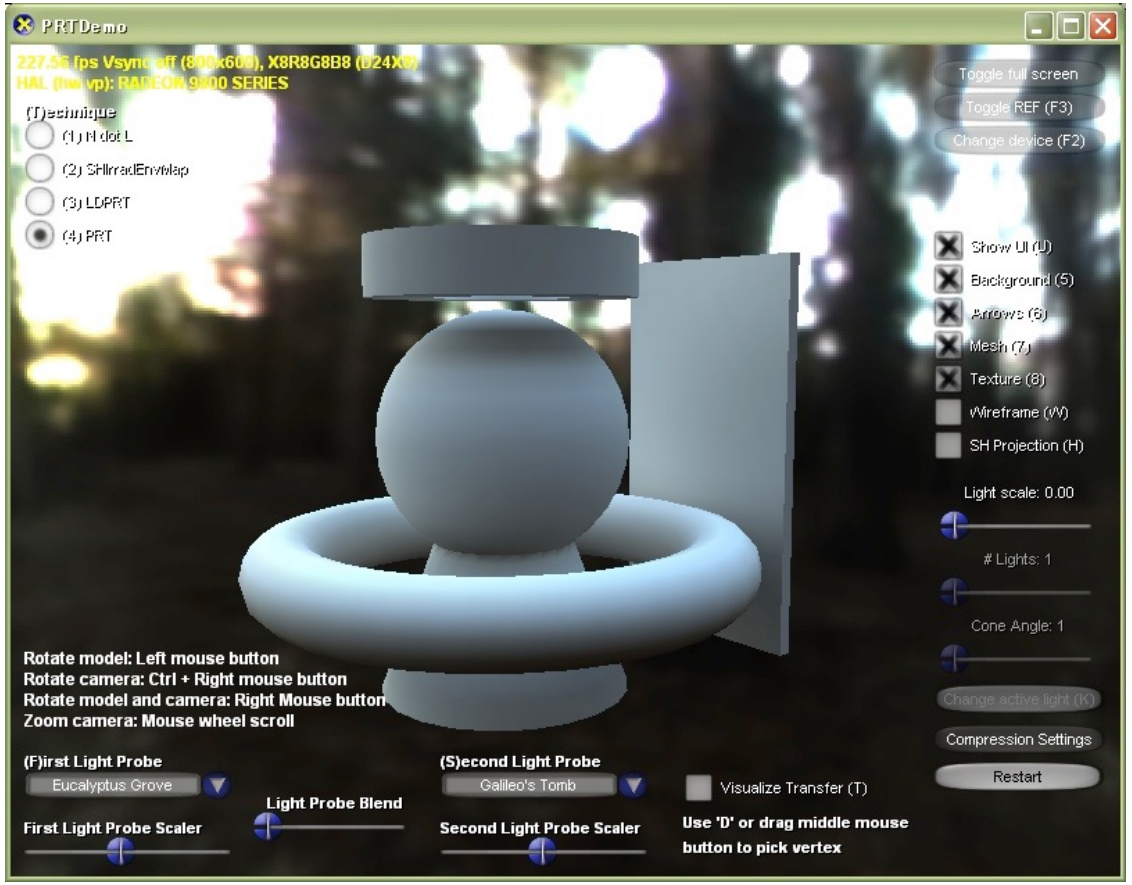


PRT による結果

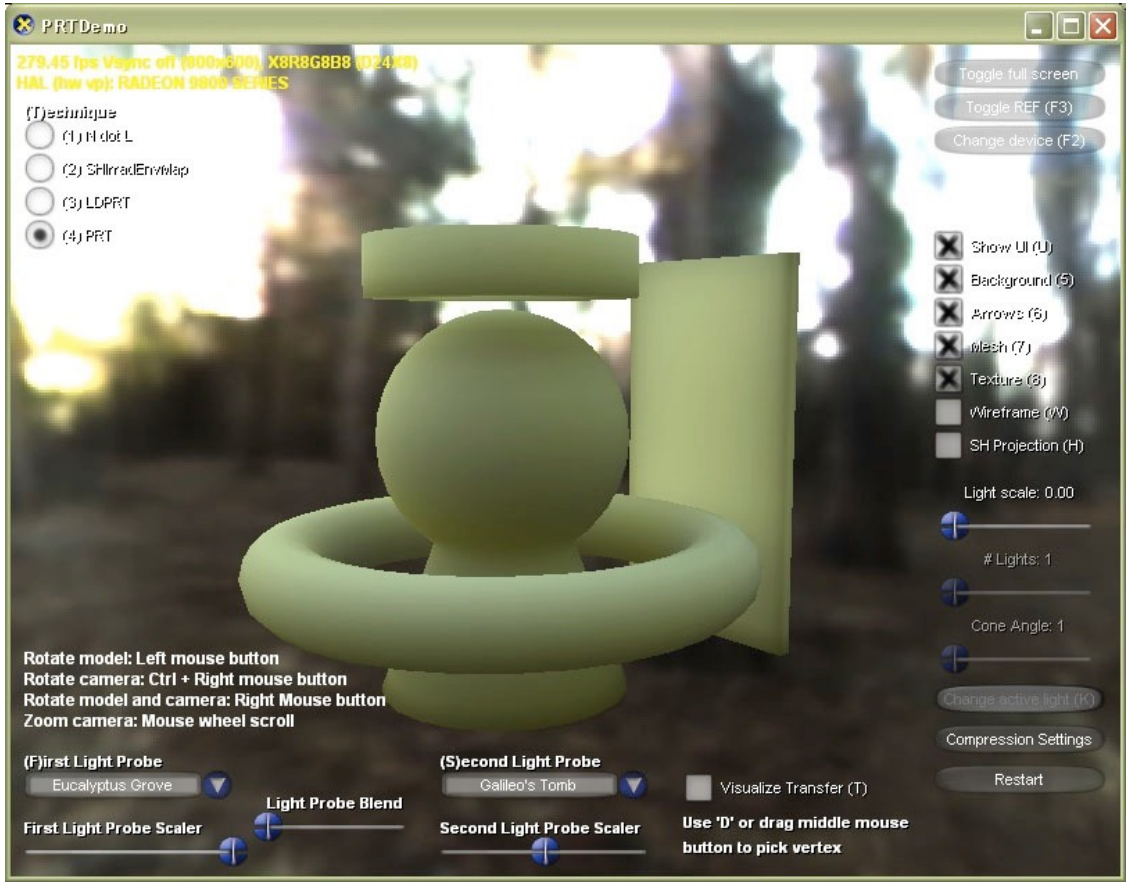


DirectX の PRT 機能

相互反射が存在する場合



表面下散乱が存在する場合



PRT の局所光源への応用

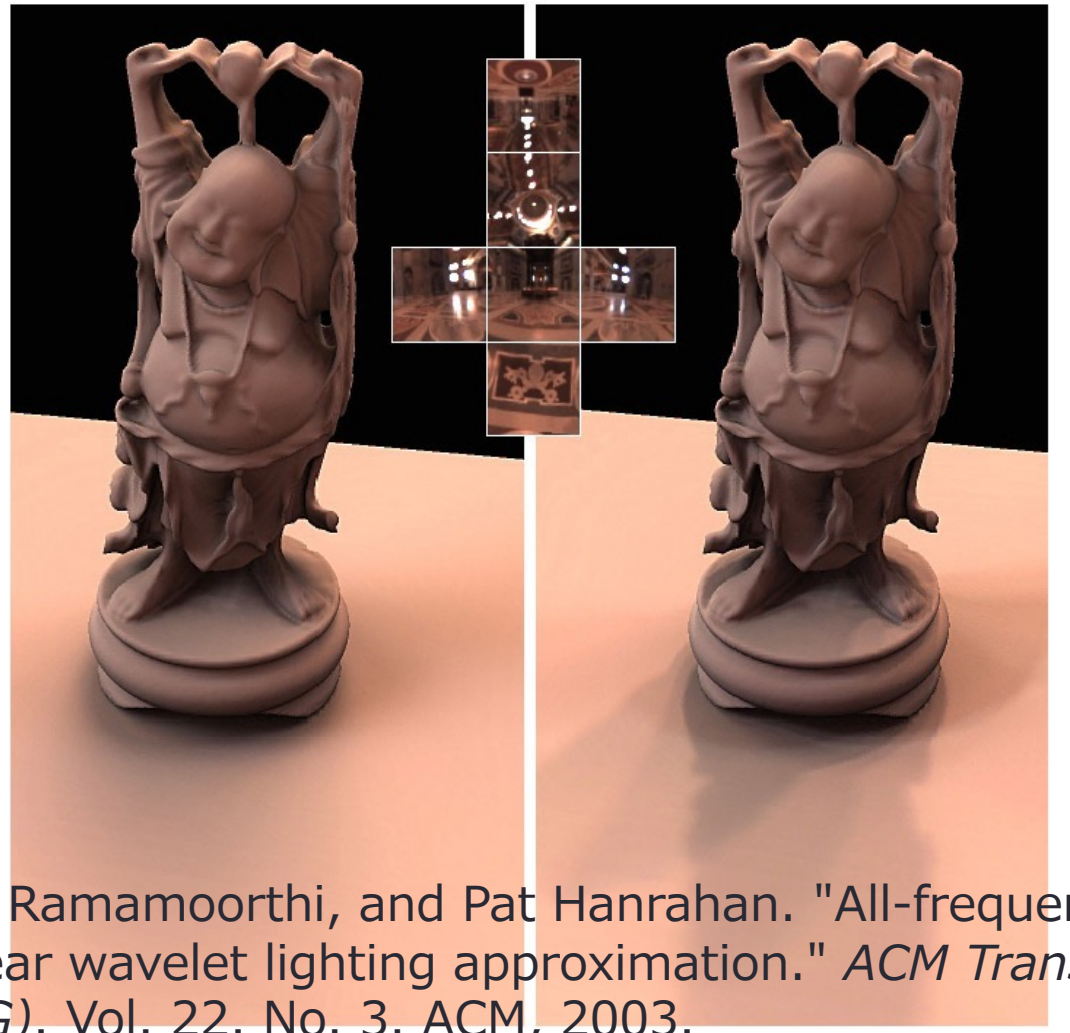
Kristensen, Anders Wang, Tomas Akenine-Möller, and Henrik Wann Jensen. "Precomputed local radiance transfer for real-time lighting design." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 24. No. 3. ACM, 2005.

PRT の局所光源への応用

Sloan, Peter-Pike, Ben Luna, and John Snyder. "Local, deformable precomputed radiance transfer." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 24. No. 3. ACM, 2005.

Local, Deformable Precomputed Radiance Transfer

高周波の光源環境への対応

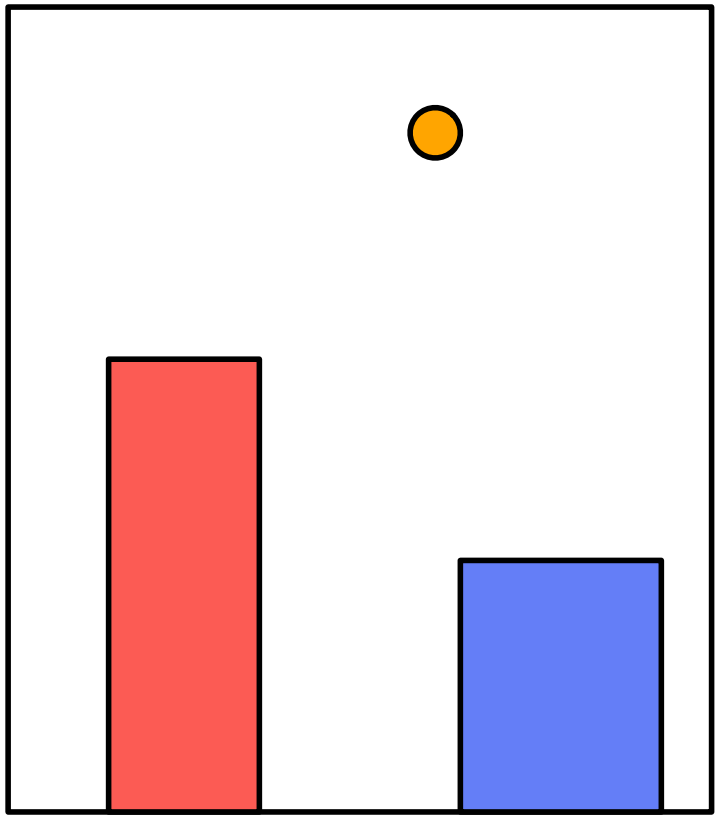


Ng, Ren, Ravi Ramamoorthi, and Pat Hanrahan. "All-frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 22. No. 3. ACM, 2003.

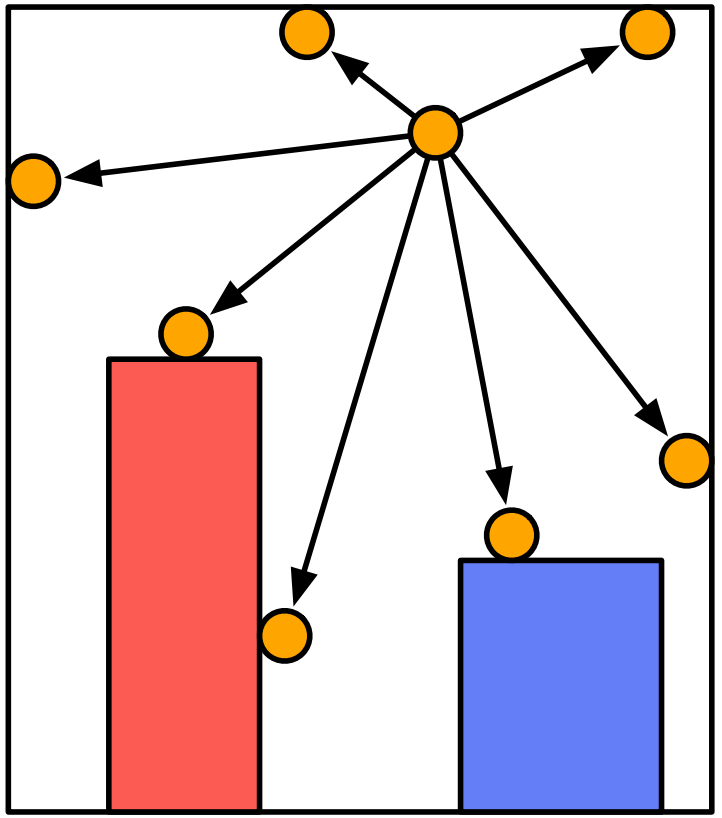
Instant Radiosity

光源からの光が到達したところに
仮想的な点光源 (Virtual Point Light, VPL) を置く

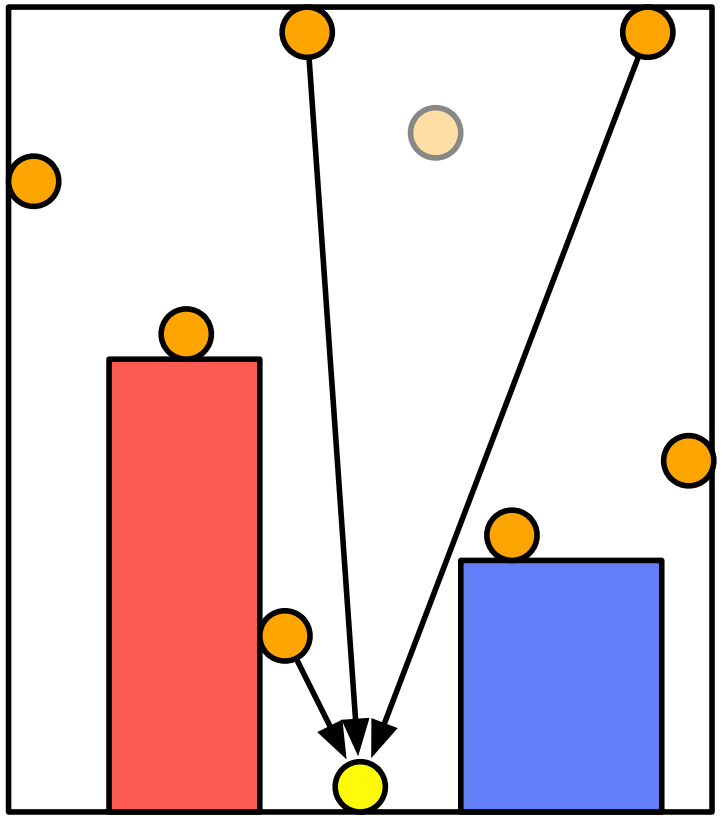
各 VPL を点光源として陰影付けを行う



光源の配置



光源から光を放射して
各点の陰影付け



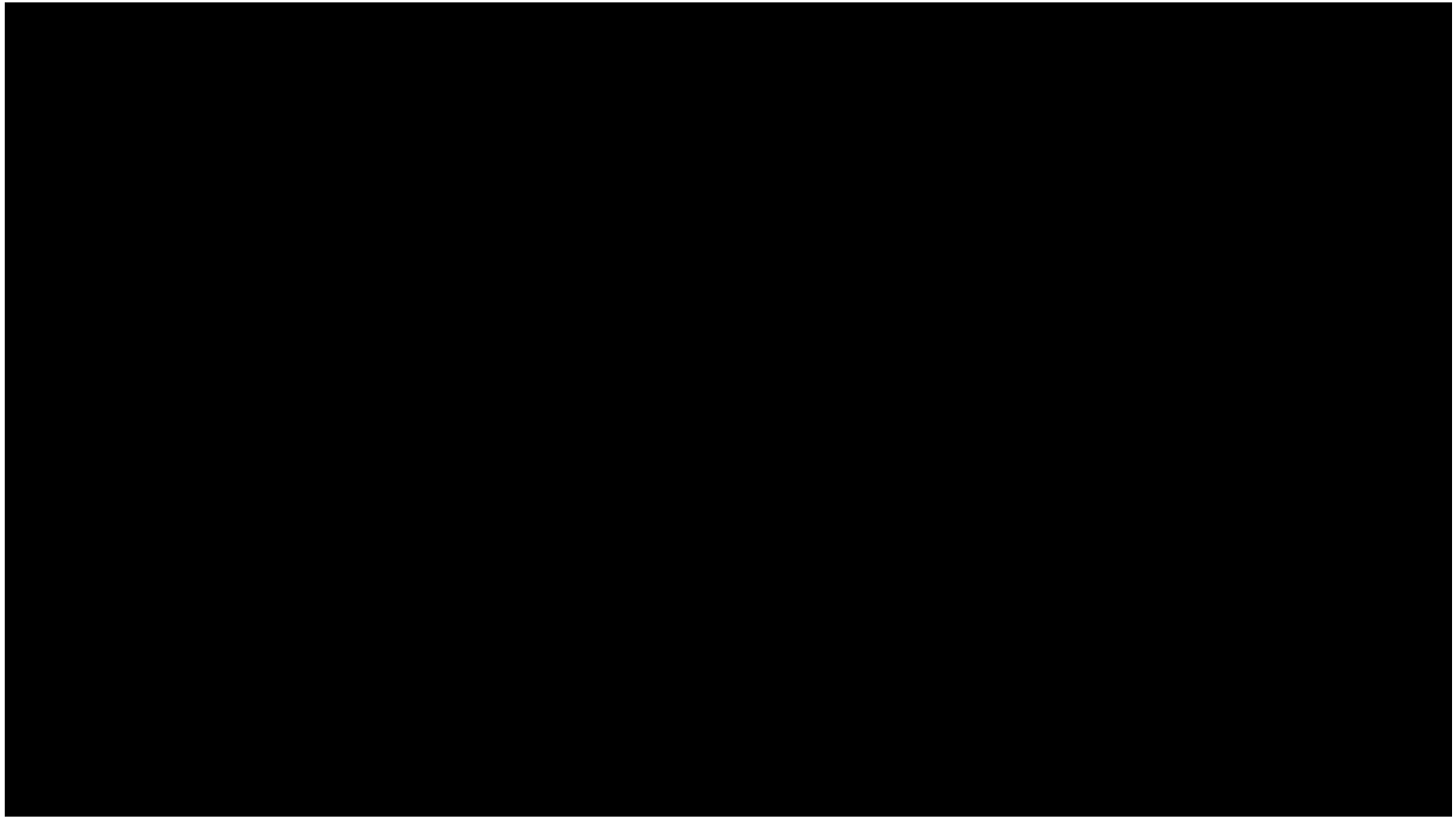
各点を点光源にして
陰影計算

Instant Radiosity 関連の文献

- Keller, Alexander. "Instant radiosity." *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- Laine, Samuli, et al. "Incremental instant radiosity for real-time indirect illumination." *Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques*. Eurographics Association, 2007.
- Segovia, Benjamin, Jean Claude Iehl, and Bernard Péroche. "Metropolis instant radiosity." *Computer Graphics Forum*. Vol. 26. No. 3. Blackwell Publishing Ltd, 2007

Sequential Monte Carlo Instant Radiosity

Silicon Studio MIZUCHI



小テスト – 大域照明モデル

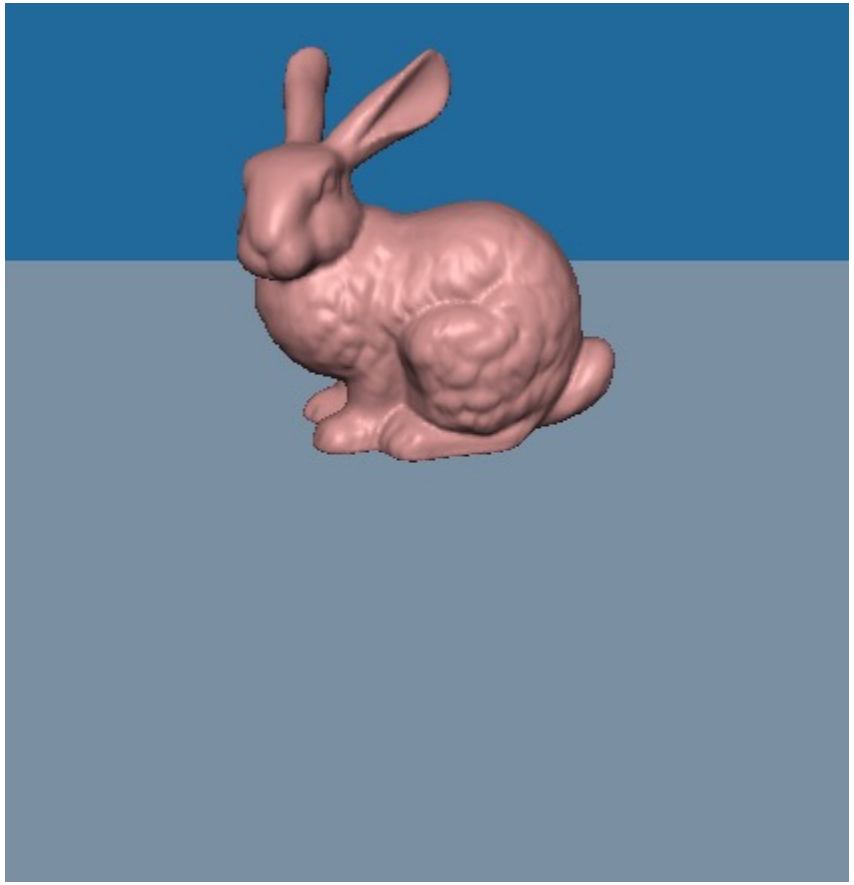
Moodle の小テストに解答してください

宿題

- 平面への映り込みを実現してください.
  - 次のプログラムは平面上の同じ場所に同じ図形を二つ描画しています.
    - https://github.com/tokoik/ggsample12
    - この ggsample12mirror.vert の内容は ggsample12.vert と同じです.
  - この一方の図形を反転して平面（反射面）に映り込んで見えるように ggsample12.cpp と ggsample12mirror.vert を変更してください.
    - 反射面の法線ベクトル $\mathbf{n} = (0, 1, 0)$，反射面上のある点の位置 $\mathbf{p} = (0, 0, 0)$
    - 図形を反転すると頂点の法線ベクトルも反転するので ggsample12mirror.vert も修正する必要があります.
- ggsample12.cpp と ggsample12mirror.vert を**アップロード**してください

宿題プログラムの生成画像

元のプログラム



期待する結果