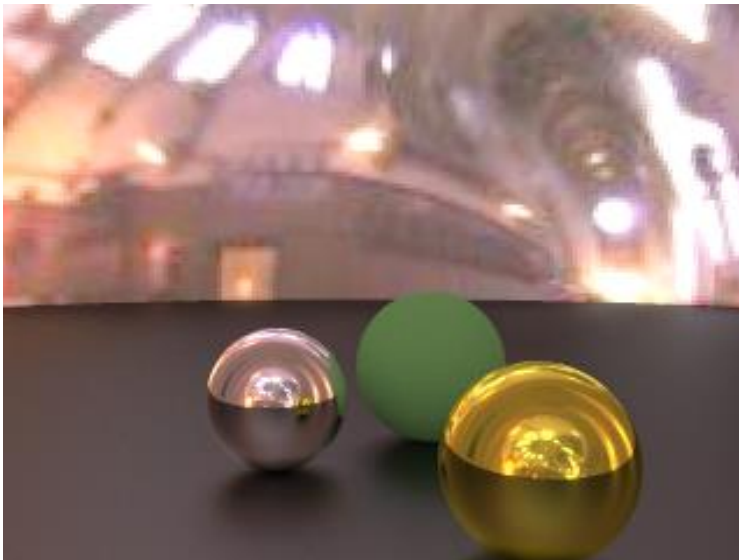
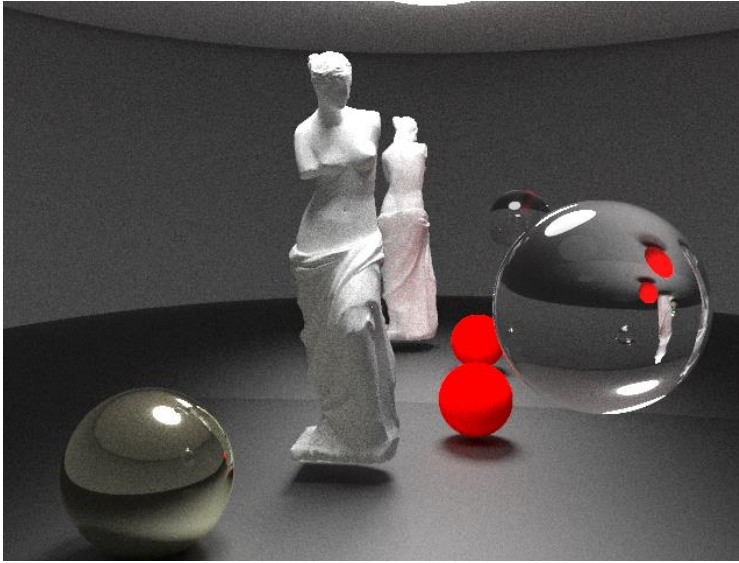


物理モデルに基づいた CG（グローバルイルミネーション）	3
制限事項	7
■記述の説明	7
■並列処理	8
■出力画像の設定	9
■サンプリング	9
■並列処理	10
■カメラ設定	11
CAMERA_DIR を指定しない場合	11
■マトリクス定義	12
■変数定義	12
■NEXT EVENT ESTIMATION	12
■フィルタ	12
■関与媒質	13
■オブジェクト定義	15
■形状定義	15
■属性定義	19
■材質定義	19
■双方向反射率分布関数 (BRDF)	20
■屈折率定義	25
■表面下散乱	26
■光源	28
球光源	28
面光源	28
平行光源(指向性光源)	29
無限遠光源	30
スポット光源	30
環境光	31
■テクスチャ	32
■IBL	34
■背景	37

■メッシュ	38
■その他	39
PSSMLT (PRIMARY SAMPLE SPACE MLT)	39
ERPT (ENERGY-REDISTRIBUTION PATH TRACING)	40
■時間制限.....	41
参考資料	42

物理モデルに基づいた CG（グローバルイルミネーション）



グローバルイルミネーションは実世界（実写）と見分けが付かない画像を生成する技術の一つで

- ・ 光の相互反射を考慮。
- ・ エネルギー保存則を満たす。

つまり、物理的に正しい画像であること。物理的に正しい画像とは？そもそも人が物を見ているというのは光源からの光が物体を照射し、物体表面からの反射光が視覚系に入射して色刺激となって実世界という（脳内）画像を得るという事。

網膜の構造

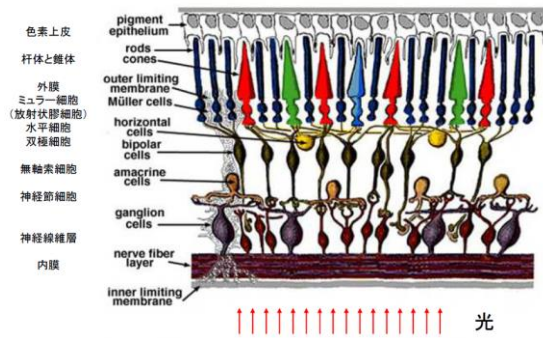


Fig. 2. Simple diagram of the organization of the retina.

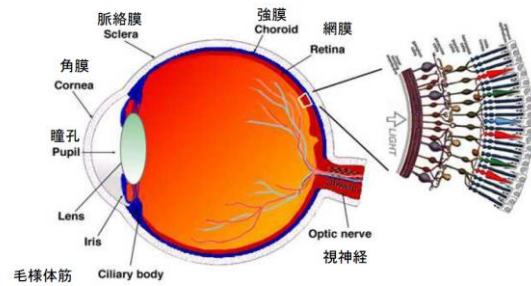


Fig. 1.1. A drawing of a section through the human eye with a schematic enlargement of the retina.

参考図の引用) <http://webvision.med.utah.edu/>

明るさを感じする： 杆体細胞

赤、緑、青を感じ： 錐体細胞 =>これが RGB の由来。

つまり光の物理的な挙動を正確に再現して RGB をシミュレーションして得る事が必要。
色を指定するのでは無く、あくまで RGB (色) はシミュレーションの結果。シミュレーションは以下のレンダリング方程式を解くことで行うことができる。

レンダリング方程式(The Rendering Equation)

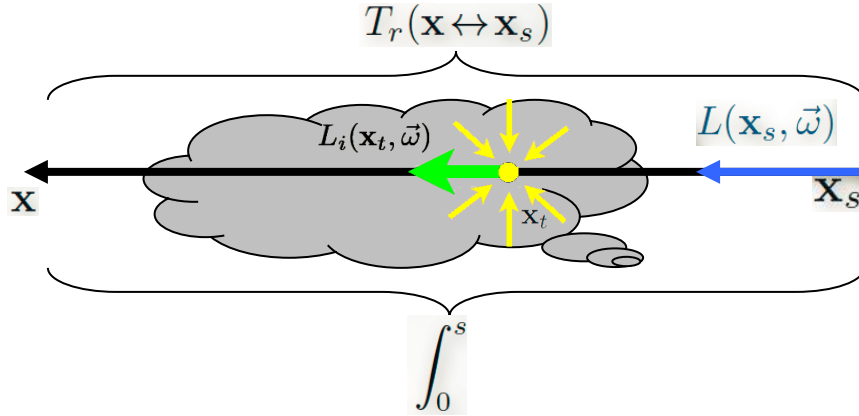
$$L(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega} L_i(x, \omega') f_r(x, \omega, \omega') \cos(\theta) d\omega'$$

$$\cos(\theta) = n \cdot \omega'$$



レンダリング方程式を解いて物理的に正しい光の挙動を正確に再現
パストレーシング法とモンテカルロ積分によって計算しています。

媒質による散乱を扱う場合は



$$L(x, \omega) = \int_0^s T_r(x \leftrightarrow x_t) \sigma_s(x_t) \left(\int_{\Omega} p(x_t, \omega_t, \omega') L(x_t, \omega_t) d\omega' \right) dt + T_r(x \leftrightarrow x_s) L(x_s, \omega)$$

$$T_r(x \leftrightarrow x_t) = \exp \left(- \int_0^{\|x_t - x\|} \sigma_t(x + s \omega_{x \rightarrow x_t}) ds \right)$$

$\sigma_a(x)$: absorption coefficient $t[1/m]$

$\sigma_s(x)$: scattering coefficient $t[1/m]$

$\sigma_t(x) = \sigma_a(x) + \sigma_s(x)$

$p(x_t, \omega_t, \omega')$: phase function $[1/sr]$



制限事項

2枚以上の面が重なっている場合は正しい結果にならない場合があります。

関与媒質および表面下散乱を扱う場合はモデルの表裏が重要なため完全なソリッドモデルが必要です。そうでない場合は正しい計算が出来ない場合があります。

関与媒質および表面下散乱ではネストした状態が正しく計算できません。

例えば、表面下散乱の物体の内部に物体があるようなケースです。また一部がラップするようなケースも同様です。

再帰的な処理をしているためスレッドで並列計算する場合はスタックがオーバーフローする場合がありますためスレッド数を1に設定して並列化しないようにしないと計算出来ない場合があります。

■記述の説明

キーワード

キーワードから対応するパラメータの設定が記述されます。

空行でそのキーワードに対する記述が終了する。

パラメータ

パラメータの記述を意味する。数値か識別子（文字列）が指定できる。

パラメータ

パラメータの記述を意味する。数値か数式が指定できる。

数式にスペース、タブ、改行等の空白文字を入れる事は出来ません。これはパラメータ区切りにスペース、タブ、改行が使われているためです。

関数には `sqrt`, `exp`, `log`, `pow`, `sin`, `cos`, `tan`, `asin`, `acos`, `atan`, `atan2`, `floor`, `ceil` が使えます。

■ 並列処理

OpenMP と MPI による並列処理が可能です。

OpenMP ではスレッドによる並列化を行います。スレッド数（並列数）は **THREAD** キーワードで設定できます。OpenMP は単一の PC（リソース）で並列処理を行うため単純に並列数を増やしてもスタックオーバーやコア数による制限を気にする必要があります。

PC のコア数の 7 割～8 割り程度にするのが良いかもしれません。コア数が 7 ならスレッド数は 5 程度。

環境変数 OMP_NUM_THREADS で最大スレッド数が指定された場合はこの値を優先します。

MPI による並列化は MPI 環境（MPICH2）が整った複数の PC に分散して計算出来ます。シーンデータは全てのノードで同じデータを保持するようになっているため計算させる PC に全てのデータを置いておく必要があります。PC の数が多ければそれだけ短時間で処理が可能です。

■出力画像の設定

IMAGE

画像ピクセル幅 画像ピクセル高さ

環境変数 IMAGE_X が設定されていれば横方向のサイズは環境変数の設定を優先する。

環境変数 IMAGE_Y が設定されていれば縦方向のサイズは環境変数の設定を優先する。

OUTPUT

出力画像ファイル名

-出力画像フォーマットは拡張子 .ppm .bmp .hdr に従う。

BMP は必ず出力する

出力ファイル名には サンプル数 x スーパーサンプリング数が付加される。

環境変数 SUFFIX_SYMBOL が設定されていればその値（文字列）はファイル名の末尾に付加されます。

IMAGEDUMP

時間（秒）

-計算途中の結果を指定した時間毎に出力する。

SCREEN

x y z

-レンダリング時のスクリーン中心座標

■サンプリング

SAMPLING

n

-サンプリング数。

環境変数 SAMPLING が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

SUPERSAMPLING

n

-スーパーサンプリング数

環境変数 SUPERSAMPLING が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

■ 並列処理

THREAD

n

-並列実行数

■カメラ設定

CAMERA_POS

x, y, z

-カメラの位置

CAMERA_UPVEC

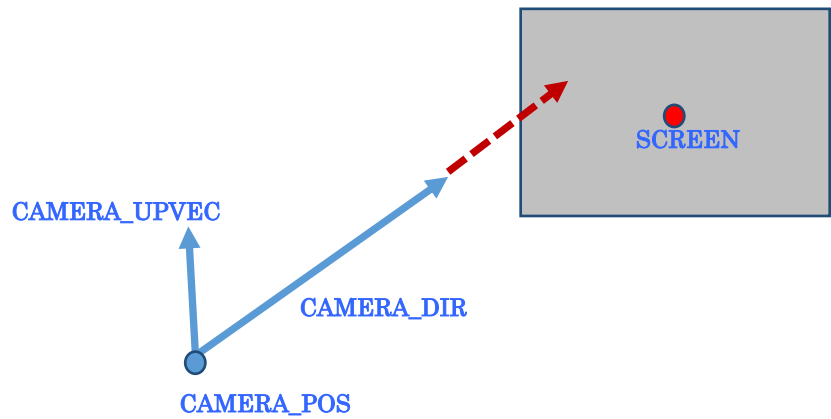
x, y, z

-カメラの UP ベクトル

CAMERA_DIR

x, y, z

-カメラの方向ベクトル



CAMERA_MATRIX

マトリクス定義

-カメラを指定のマトリクスで姿勢を変更

CAMERA_DIR を指定しない場合

TARGET_POS

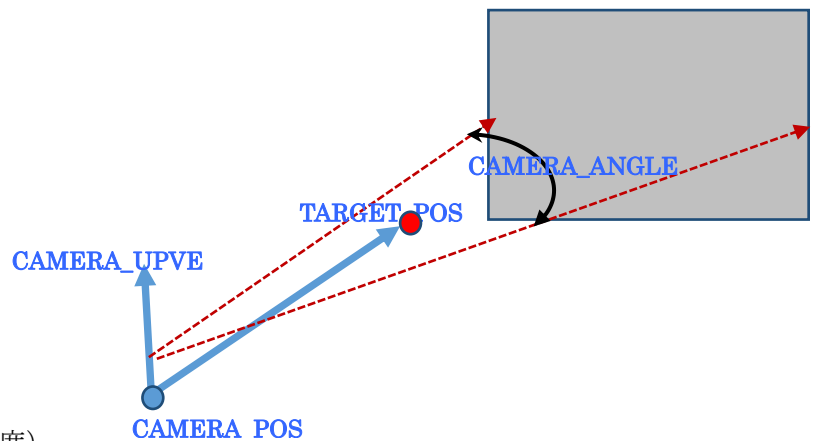
x, y, z

-カメラから見る位置

CAMERA_ANGLE

θ

-カメラから見る視界（水平角度）



■マトリクス定義

rotation θ_x θ_y θ_z

-各軸の回転角度（度）

translate x y z

-各軸の移動量

scale x y z

-各方向の拡大縮小率

■変数定義

VAR *varName*

x

-変数 varName に値 x を設定する。この変数は以降の「式」の中で使うことが出来る

■Next Event Estimation

nextEventEstimation

値

-値が 0 の時は Next Event Estimation を行わない。

環境変数 NEXTEVENTESTIMATION が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

■フィルタ

tentfilter

値

-値が 0 の時は tent filter 行わない(デフォルト)。

■ノイズフィルタ

luminacnce_cutoff

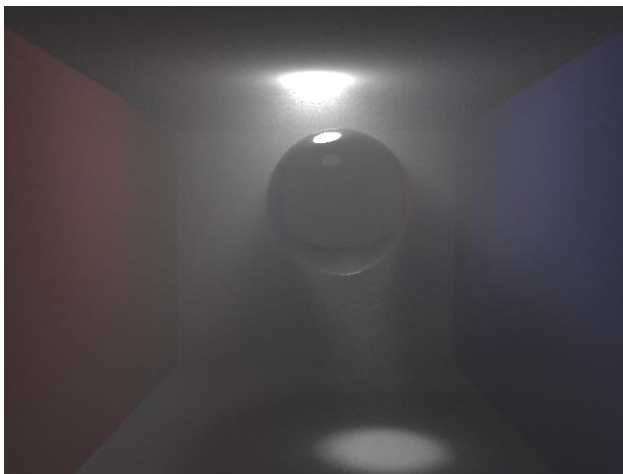
値

-値が 0 の時は何もしない(デフォルト)。計算中に輝度が指定値を超えないように制限する事で高輝度のピクセルの発生を抑制します。

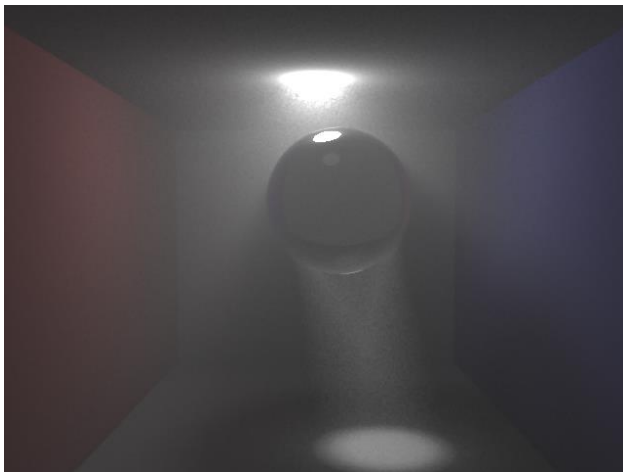
環境変数 LUMINANCE_CUTOFF が設定されていれば値は環境変数の設定を優先する。

■関与媒質

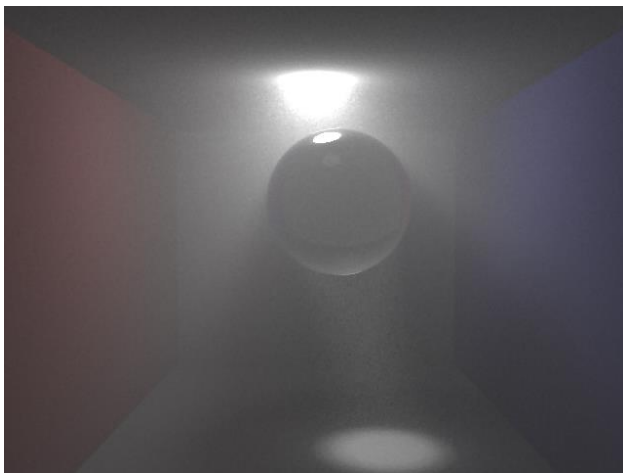
前方散乱（射光の方向に散乱）



後方散乱（入射光の方向と反対方向に散乱）



等方散乱



participatingMedia

値

-値が 0 の時は関与媒質を無視する。

SCATTERING

σs 平均 (ダミー)

$\sigma s[R] \sigma s[G] \sigma s[B]$

-散乱係数[1/mm]

ABSORBING

σs 平均 (ダミー)

$\sigma s[R] \sigma s[G] \sigma s[B]$

-吸収係数[1/mm]

PAHASE

位相関数

PAHASE 位相関数 R 位相関数 G 位相関数 B

値が $-1 \leq \text{位相関数} \leq +1$ の場合 Henyey-Greenstein phase function.

で、パラメータ g の値によって次式で与えられる。位相関数の指定はパラメータ g で指定する。 g が 1 に近いと前方散乱。 -1 に近いと後方散乱。 0 だと等方的な一様散乱。

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{[1 + g^2 - 2g \cos(\theta)]^{3/2}}$$

ただし、 $g=0$ の場合は一様散乱位相となる。

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi}$$

■オブジェクト定義

OBJECT

形状定義

材質定義

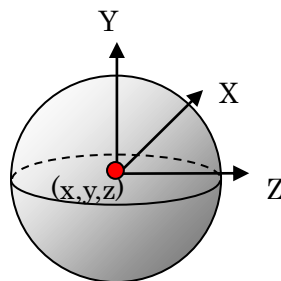
normal *f*

-法線を反転するかどうか

■形状定義

sphere *x* *y* *z* *r*

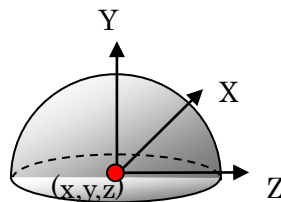
-(*x*,*y*,*z*)を中心とした半径 *r* の球



hemisphere *x* *y* *z* *r*

-(*x*,*y*,*z*)を中心とした半径 *r* の半球

Y 方向上半分を定義



uvplane x y z

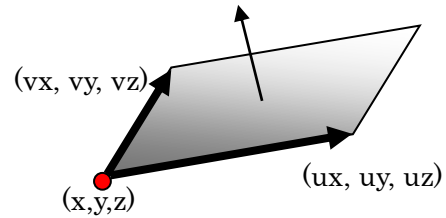
U ux uy uz

V vx vy vz

-(x,y,z)を原点とする有限平面

ローカル X 軸(ux, uy, uz)

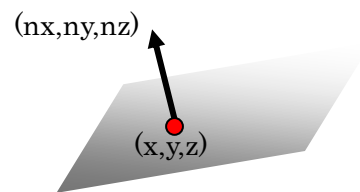
ローカル Y 軸(vx, vy, vz)



plane x y z

normal nx ny nz

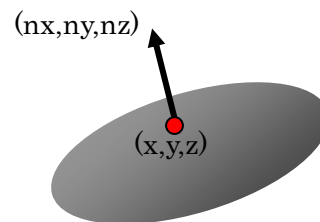
-(x,y,z)を通る法線ベクトル(nx,ny,nz)の無限平面



disk x y z r

normal nx ny nz

-(x,y,z)を通る法線ベクトル(nx,ny,nz)の円盤



infinity_light nx ny nz

-光源の放射方向ベクトル(nx,ny,nz)

参照「光源」

objfile ファイル名

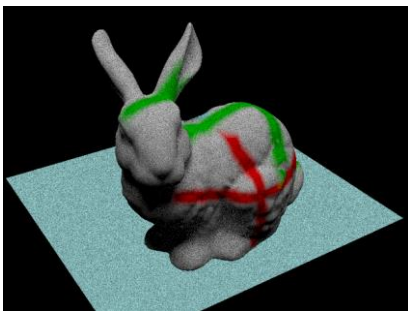
-OBJ 形式のメッシュデータ

頂点カラー対応

拡張 OBJ 形式として頂点定義と色を同時に設定出来る。

(例)

```
v -0.037830 0.127940 0.004475 0.752941 0.752941 0.752941  
v -0.022605 0.126675 0.007156 0.000000 0.666667 0.000000
```



OBJ ファイルのマテリアル定義

マテリアル定義が無い場合は指定した属性が設定されます。

Kd *r g b*

-color *r g b* と解釈します。

Ni *r*

-屈折率と解釈します。

Ns *s*

-Phong の場合 *specular_exponent* と解釈します。

map_Kd テクスチャファイル名

-テクスチャファイルは 8,16,24,32 ビット・ビットマップ、jpg, png, tga, hdr ファイルのみ

map_Bump バンプマッピングテクスチャファイル名

-テクスチャファイルは 8,16,24,32 ビット・ビットマップ、jpg, png, tga, hdr ファイルのみ

newmtl で指定されたマテリアルのテクスチャとなります。

texture で指定されている場合はこちらのテクスチャを優先します。

color、specular に色が乗算されます。

OBJ ファイルのマテリアル定義拡張

※これらの指定は現時点で正しく機能しないケースがる

#REFLECTION *r*

-反射率分布関数 (BRDF)の指定

r= 0 完全拡散面。いわゆる Lambertian 面。

1, 理想的な鏡面。

2, 理想的なガラス的物質。

3, Wardのグロシー

4, Phong

#EMISSION *r g b*

-発光

#EMISSION を指定する場合は#COLOR にも適当な値を指定してください。OBJ ファイル全体に適用する場合は属性で指定してください。

#COLOR *r g b*

-反射光

#WARD *ax ay*

-Ward の反射モデル

#SPECULAR *r g b*

-鏡面反射(Ward の反射モデルで参照)

#ROUGHNESS *r*

-表面粗さ(0~1)

■属性定義

属性定義は重複して設定してもよいが最後の指定が有効になる。

■材質定義

color *r* *g* *b*

-反射光

完全拡散（ランバート）以外の反射モデルでは **diffuse** 成分として参照）

完全鏡面、ガラス面の反射モデルでは **specular** 成分として参照）

emission *r* *g* *b*

-発光

specular *r* *g* *b*

-反射光

完全鏡面、ガラス面以外の反射モデルでの **specular** 成分

roughness *r*

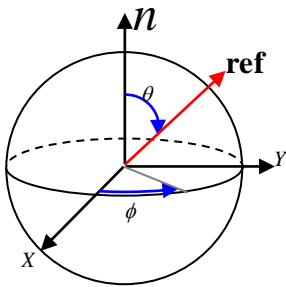
-表面粗さ(0～1)

■ 双方向反射率分布関数 (BRDF)

reflection diffuse

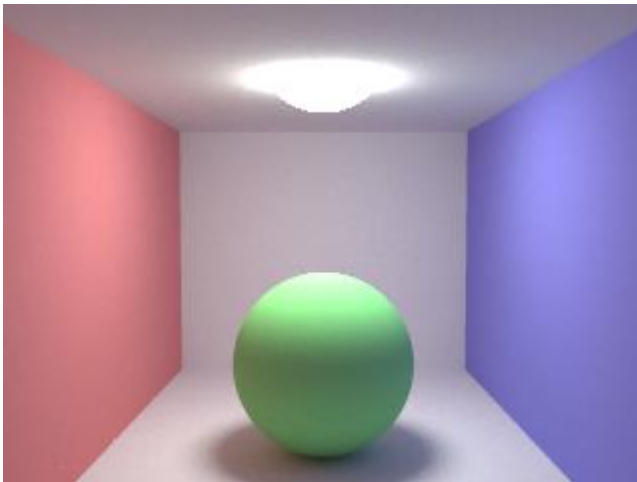
-拡散反射(roughness は 1.0 が初期値)

$$BRDF = \frac{\text{color}}{\pi}$$



$$\mathbf{ref} = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \phi &= 2\pi \xi_1 \\ \theta &= \cos^{-1}(\sqrt{1 - \xi_2}) \end{aligned}$$

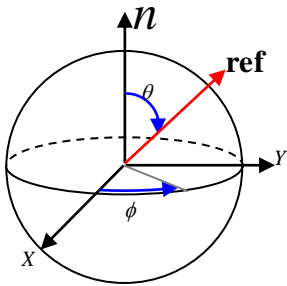
Given two uniform random variables ξ in the range $0 < \xi < 1$,



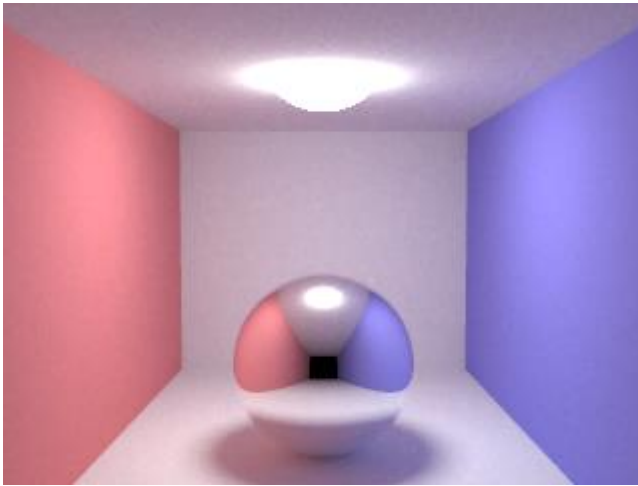
reflection specular

-鏡面反射(roughness は 0.0 が初期値)

$$BRDF = \text{specular} \delta([\text{ray} - 2(\mathbf{n} \cdot \text{ray})\mathbf{n}] - \text{ref})$$



$$\text{ref} = \text{ray} - 2(\mathbf{n} \cdot \text{ray})\mathbf{n}$$



reflection reflection

・反射・屈折

Snell の法則が適用される。外部の屈折率を n_1 、入射後の内部の屈折率を n_2

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

$$\cos^2(\theta_2) = 1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - (-\mathbf{ray} \cdot \mathbf{n})^2)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{ray} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) - \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{ray}) + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (1 - (-\mathbf{ray} \cdot \mathbf{n})^2)} \right) \mathbf{n}$$

屈折方向

$$= \mathbf{ray} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) - \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{ray}) + \sqrt{\cos^2 \theta_2} \right) \mathbf{n}$$

反射光の運ぶ光の割合は Fresnel→Schlick の近似

$$F(\theta_1) = F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta_1)^5 \quad F_0 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$$

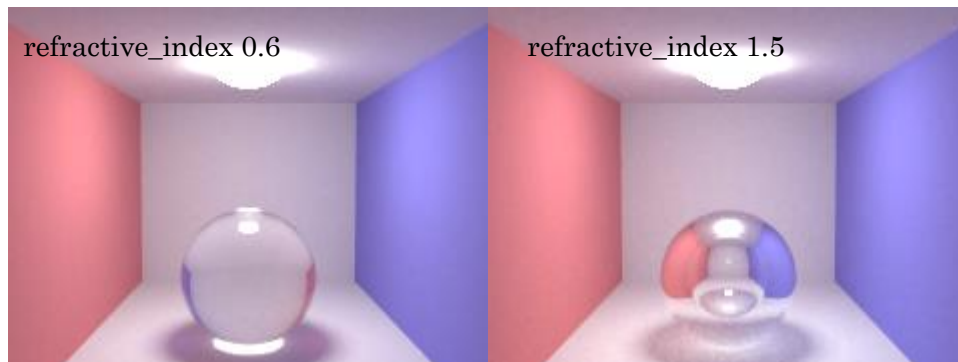
$$\cos^2(\theta_2) > 0$$

$$BRDF = \text{specular} \left(\frac{\text{反射の場合}}{F(\theta_1) \delta([\mathbf{ray} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{ray})\mathbf{n}] - \mathbf{ref}) + (1 - F(\theta_1)) \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \delta(\mathbf{T} - \mathbf{ref})} \right)$$

屈折の場合

$$\cos^2(\theta_2) \leq 0$$

$$BRDF = \text{specular} \delta([\mathbf{ray} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{ray})\mathbf{n}] - \mathbf{ref})$$



reflection ward_brdf

ward_brdf ρ_d ρ_s α_x α_y

-Ward の反射モデル

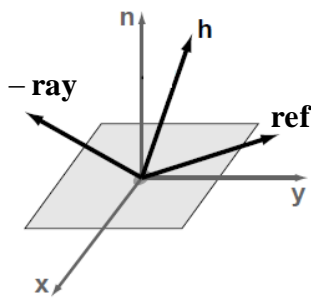
ρ_d =拡散反射率

ρ_s =specular 反射率

異方性の反射 (α_x, α_y がそれぞれ方向性に対する荒さに相当する)。

$$BRDF = \frac{\text{specular}}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{(-\text{ray} \cdot \mathbf{n})(-\text{ref} \cdot \mathbf{n})}} \exp\left(-\frac{\left(\frac{\mathbf{h} \cdot \mathbf{x}}{\alpha_x^2} + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{y}}{\alpha_y^2}\right)^2}{(\mathbf{h} \cdot \mathbf{n})^2}\right)$$

$$\text{ref} = 2((-\text{ray}) \cdot \mathbf{h})\mathbf{h} - (-\text{ray})$$

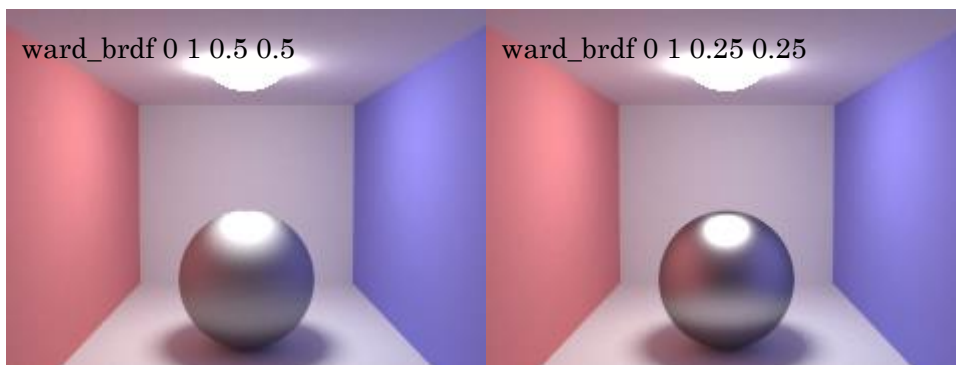


$$\mathbf{h} = [\sin\theta_h \cos\phi_h, \sin\theta_h \sin\phi_h, \cos\theta_h]$$

$$\theta_h = \arctan\sqrt{\frac{-\log u}{\cos^2\phi_h/\alpha_x^2 + \sin^2\phi_h/\alpha_y^2}}$$

$$\phi_h = \arctan\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x} \tan(2\pi v)\right)$$

Given two uniform random variables u and v in the range $0 < u, v < 1$,



reflection phong_brdf

phong_brdf ρ_d ρ_s specular_exponent

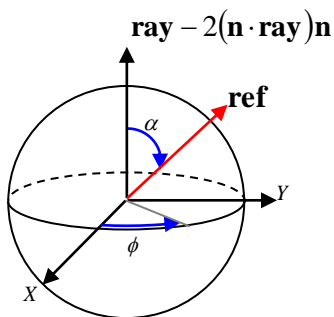
-Phong の反射モデル

ρ_d =拡散反射率

ρ_s =specular 反射率

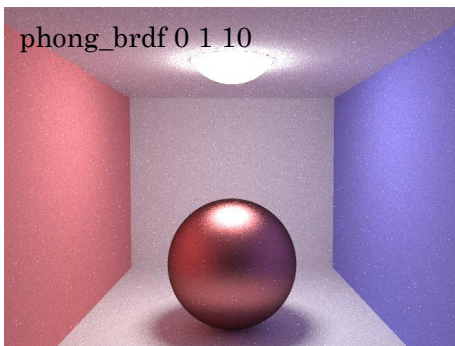
$$BRDF = \frac{n+2}{2\pi} \mathbf{specular} \cos^n(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = [\mathbf{ray} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{ray})\mathbf{n}] \cdot \mathbf{ref}$$



$$\mathbf{ref} = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \phi &= 2\pi \xi_1 \\ \theta &= \cos^{-1}(\text{pow}(\xi_2, 1/(\text{specular_exponent} + 1))) \end{aligned}$$

Given two uniform random variables ξ in the range $0 < \xi < 1$,



■屈折率定義

refractive_index r

-屈折率 r

reflection reflection1

a b c d e f

$$\text{Refractive index} = \sqrt{a + b\lambda^2 + c\lambda^{-2} + d\lambda^{-4} + e\lambda^{-6} + f\lambda^{-8}}$$

reflection reflection2

a b c d e f

$$\text{Refractive index} = \sqrt{1 + \frac{a\lambda^2}{(\lambda^2 - b)} + \frac{c\lambda^2}{(\lambda^2 - d)} + \frac{e\lambda^2}{(\lambda^2 - f)}}$$

様々な材質の屈折率は「<http://refractiveindex.info/>」に詳しいデータが公開されている。

reflection reflection99

$$\text{Refractive index} = 1.400 + \frac{50.0}{\lambda - 230.0}$$

λ の単位は nm

■表面下散乱

reflection Subsurface_Scattering

BSSRDF

f

- f が0の時は散乱シミュレーションで計算します。1(デフォルト)のときは**BSSRDF Dipole Model for Subsurface Scattering**で計算します。この値の設定は環境変数「USE_BSSRDF」でも設定出来ます。

SCATTERING

σ_s 平均 (ダミー)

$\sigma_s[R] \sigma_s[G] \sigma_s[B]$

-散乱係数[1/mm] ※関与媒質を参照

ABSORBING

σ_s 平均 (ダミー)

$\sigma_s[R] \sigma_s[G] \sigma_s[B]$

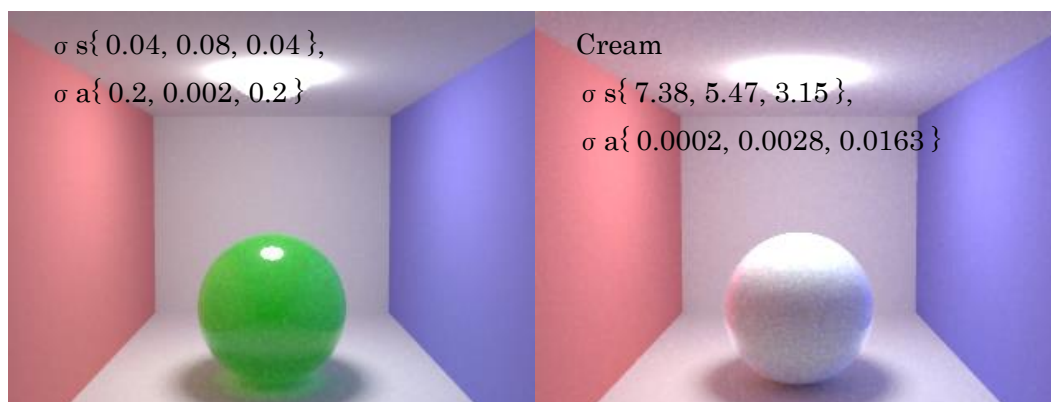
-吸収係数[1/mm] ※関与媒質を参照

PAHASE

位相関数

PAHASE 位相関数 R 位相関数 G 位相関数 B

※関与媒質を参照



level

散乱次数

- 0 : 散乱無し。
- 1 : **BSSRDF** がゼロの場合は完全シミュレーション、**BSSRDF** が 1 の時は単散乱 + 多重散乱 (デフォルト)。
- 2 : BSSRDF による多重散乱のみ。

MATERIAL_SYMBOL

Material

A Practical Model for Subsurface scattering" (Jensen et al.)

Material	σ'_s [mm ⁻¹]			σ_a [mm ⁻¹]			Diffuse Reflectance			η
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	
Apple	2.29	2.39	1.97	0.0030	0.0034	0.046	0.85	0.84	0.53	1.3
Chicken1	0.15	0.21	0.38	0.015	0.077	0.19	0.31	0.15	0.10	1.3
Chicken2	0.19	0.25	0.32	0.018	0.088	0.20	0.32	0.16	0.10	1.3
Cream	7.38	5.47	3.15	0.0002	0.0028	0.0163	0.98	0.90	0.73	1.3
Ketchup	0.18	0.07	0.03	0.061	0.97	1.45	0.16	0.01	0.00	1.3
Marble	2.19	2.62	3.00	0.0021	0.0041	0.0071	0.83	0.79	0.75	1.5
Potato	0.68	0.70	0.55	0.0024	0.0090	0.12	0.77	0.62	0.21	1.3
Skim milk	0.70	1.22	1.90	0.0014	0.0025	0.0142	0.81	0.81	0.69	1.3
Skin1	0.74	0.88	1.01	0.032	0.17	0.48	0.44	0.22	0.13	1.3
Skin2	1.09	1.59	1.79	0.013	0.070	0.145	0.63	0.44	0.34	1.3
Spectralon	11.6	20.4	14.9	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.3
Whole milk	2.55	3.21	3.77	0.0011	0.0024	0.014	0.91	0.88	0.76	1.3

$$\sigma'_s = \sigma_s(1 - g) \quad g=\text{位相関数}$$

SCATTERING と ABSORBING を省略できる。

MATERIAL_SCALE

scale

散乱係数と吸収係数をこの係数で修正します。省略時は 1.0

MATERIAL_R_MAX

R_max

影響半径の変更。指定した値を内部で計算した半径に乗算します。省略時は 1.0

$$r_max = 1.25\sqrt{\log(ratio)} / -\sigma_t \times R_max$$

$$ratio = 1.0e - 4$$

■光源

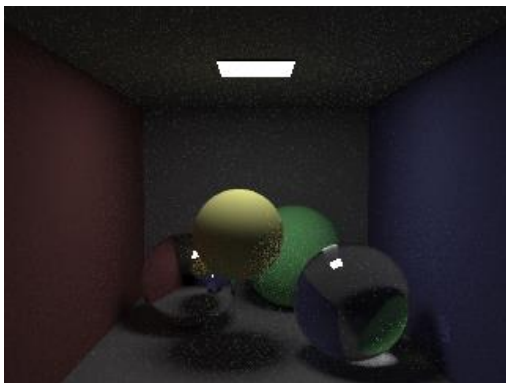
光源は特に識別しない (**emission** *r* *g* *b*) で *r,g,b* が全てゼロで無いオブジェクトは発光するため意味的には光源となる。ただし、(**color** *r* *g* *b*) で *r,g,b* が全てゼロのオブジェクトで発光だけのオブジェクトは「Next Event Estimation」が有効な時に特に光源として内部的には識別されます。光源として認識されるオブジェクトは球、有限平面に限られ完全拡散（ランバート）反射のものに限ります。

球光源

光源として認識される球は全方向に拡散発光する光源

面光源

光源として認識される有限平面は法線方向を基準に拡散発光する光源で裏は発光しません。



平行光源(指向性光源)

平行光源で距離による減衰はありません。オブジェクトは有限平面に限られます。

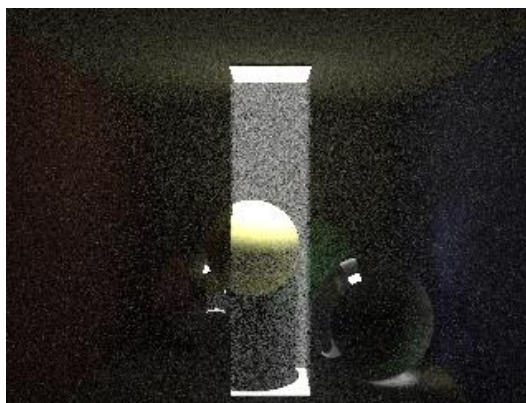
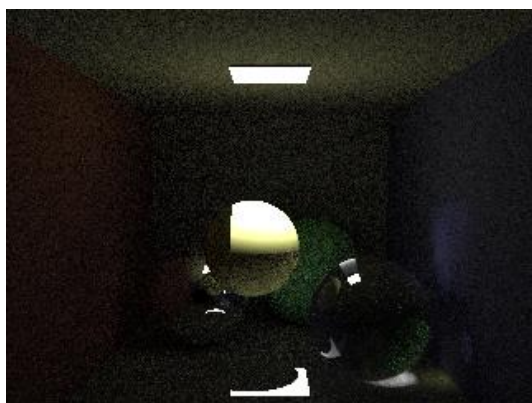
また「**Next Event Estimation**」が有効でない場合は正しく計算されません。

`parallel_light` *flag*

-flag がゼロ以外の時だけ有効です。

`parallel_light_dir` *x y z*

-平行光源の方向ベクトルを指定します。省略された場合は法線方向になります。



無限遠光源

infinity_light *nx ny nz*

実態のある光源ではなく、無限に遠い位置にある光源として機能します。OBJECT の属性としての光源設定ではありません。OBJECT の定義を参照

スポット光源

スポットライトで距離による減衰があります。オブジェクトは球に限られます。

ただし、球の半径は影響しません。また「**Next Event Estimation**」が有効でない場合は正しく計算されません。

spot_light *flag*

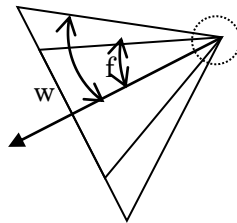
-flag がゼロ以外の時だけ有効です。

spot_light_dir *x y z*

-スポット光源の方向ベクトルを指定します。省略した場合は(0,-1,0)となります。

spot_light_angle *w f*

w がスポット幅の角度、f が falloff 角度で指定します。省略時はそれぞれ 30 と 5 です。



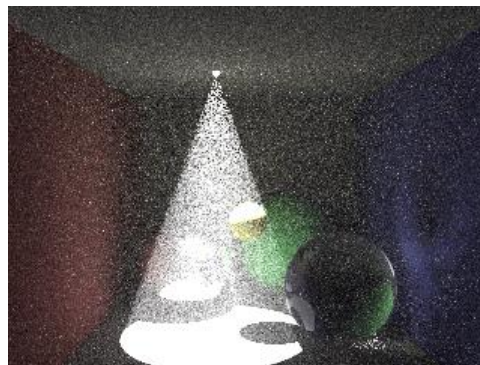
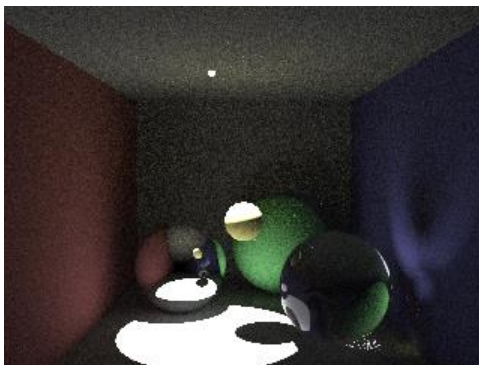
spot_light_falloff *p*

falloff から外に向かう減衰を指定できます。省略時は 2 です。

spot_attenuation *a b c*

距離による減衰(1/t)を指定できます。

$t = a + b \text{ dist} + c \text{ dist}^2$ で計算されます。t=0 の時は減衰しません。



環境光

ENV_LIGHT *r* *g* *b*

実態のある光源では無く、光源に関係なく任意の位置を照らす光。

以下の環境変数でも指定できます。

ENVLIGHT_R=*r*

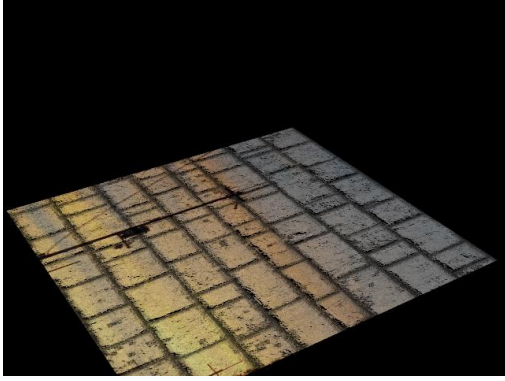
ENVLIGHT_G=*g*

ENVLIGHT_B=*b*

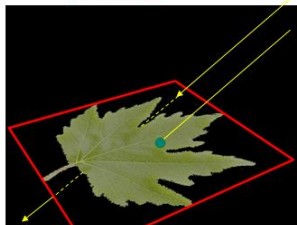
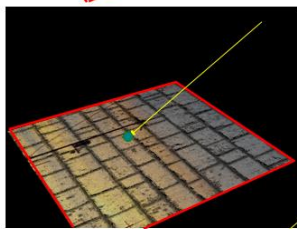
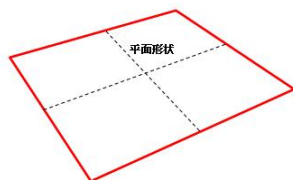
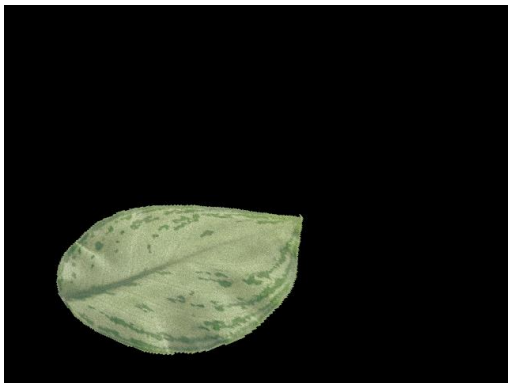
■テクスチャ

texture テクスチャファイル名

-テクスチャ。 BMP ファイル
メッシュでは UV の指定が必要。



α チャンネル（透過、非透過）があると透過の位置ではそこにオブジェクトが存在しないものと見なします。



■IBL

ibl_texture テクスチャファイル名

-IBL の定義。BMP ファイルまたは HDR ファイル
メッシュでは UV の指定が必要。

IBL の定義は光源の定義の最後に定義する必要がある。

ibl_texture_coef *g*

-IBL の値に掛ける係数

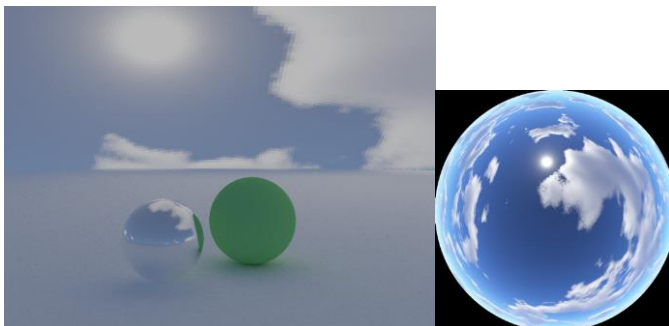
IBL を設定するオブジェクトの Color,emission はゼロを設定する事。

hemisphere_map *f*

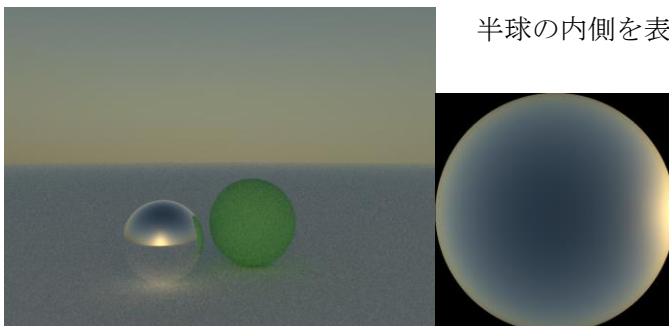
-マッピングを画像中心から円盤状にマップするかどうか(0 または 1)
半球以外での適用は考慮されていない。

normal *f*

-法線を反転するかどうか

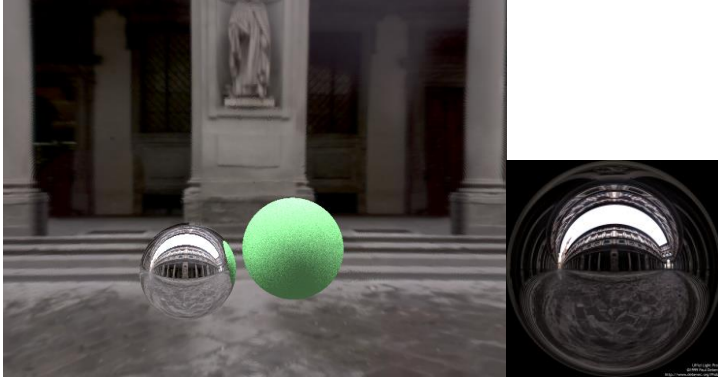


半球をドーム状に被せてマッピング。
半球の内側を表にするため法線を反転



angular_map *f*

-マッピングを画像中心から円盤状にマップするかどうか(0 または 1)
球以外での適用は考慮されていない。



Images Copyright © 1998, 1999 Paul Debevec

panoramic_map *f*

-マッピングを緯度・経度によるパノラマ画像でマップするかどうか(0 または 1)
球以外での適用は考慮されていない。



Images Copyright © 1998, 1999 Paul Debevec

shadow *f*

-形状の属性に影専用の属性に設定する。設定出来るのは平面と有限平面のみ。

IBL は光源なのでそこに影を落とすことが無いためこの設定で影を作る事が出来る。



右が影を作るため平面をおいた場合（車体カラーは変更している）。この平面に shadow 設定をしておくと以下の様に計算される。



■背景

`background_texture` 背景のテクスチャ

背景は無限遠のパノラマ IBL として適用されます。

背景はパノラマ IBL として適用されます。回転を設定する

`map_coef` a b c d

$$\theta = \theta * a + b$$

$$\phi = \phi * c + d$$

■メッシュ

smooth f

-メッシュモデルの法線を滑らかに補間するか(0 または 1)

■その他

Markov Chain Monte Carlo (**MCMC**)の試行的導入

PSSMLT (Primary sample space MLT)

設定で **SAMPLE** は MLT の実施回数として参照されます。

metropolisTransport

n

-計算アルゴリズムを「**Primary sample space MLT**」で行う(*n* をゼロ以外に設定)。
ゼロにすると適用しない。

環境変数 **METROPOLIS** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

mlt_sample

n

-「**Primary sample space MLT**」で利用する初期サンプルの数。1 画素あたりのサンプル数を指定する。

環境変数 **MLTSAMPLE** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

mutation

n

-「**Primary sample space MLT**」で利用する変異の回数の設定。1 画素あたりの変異回数を指定する。

環境変数 **MUTATION** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

mlt_resampling

n

-「**Primary sample space MLT**」で利用する初期サンプルの生成を毎回行う(*n* をゼロ以外に設定)。ゼロにすると適用しない。環境変数 **MLTRESAMPLE** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

ERPT (Energy-redistribution path tracing)

energyRedistributionPathTracing

n

-計算アルゴリズムを「Energy-redistribution path tracing」で行う(*n* をゼロ以外に設定)。
ゼロにすると適用しない。

環境変数 **ERPT** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

mutation

n

-「Energy-redistribution path tracing」で利用する変異の回数の設定。1 画素あたりの変異
回数を指定する。

環境変数 **MUTATION** が設定されていれば環境変数の設定を優先する。

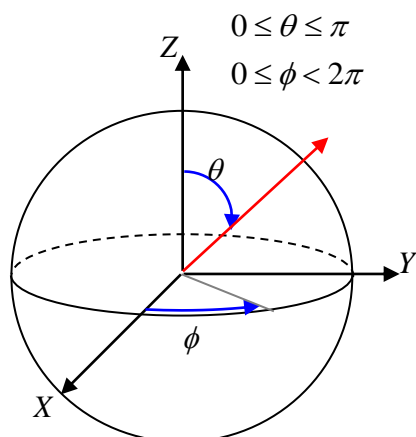
■時間制限

環境変数 `TIMELIMIT` が設定されていれば環境変数の値（時間）でレンダリングを終了する。

また、レンダリング結果も 1 分で実行した場合の結果を 1 分毎に出力する。

時間制限が無い場合はレンダリング結果は 1 分で処理できた所を 1 分毎に出力する。

参考資料



$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \text{spher}(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \cos^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \\ \cos^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right), \sin^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{pmatrix}$$

座標軸が $\mathbf{X}=(1,0,0), \mathbf{Y}=(0,1,0), \mathbf{Z}=(0,0,1)$ では無く
 $\mathbf{u}=(u_x, u_y, u_z), \mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z), \mathbf{w}=(w_x, w_y, w_z)$ の場合は

$$\text{spher}(\theta, \phi) = \sin(\theta) \cos(\phi) \mathbf{u} + \sin(\theta) \sin(\phi) \mathbf{v} + \cos(\theta) \mathbf{w}$$

$$\int_{\text{球面全体}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} d\theta d\phi \sin(\theta)$$

$\int_{\Omega} d\sigma(\omega')$ の数学的（物理的）意味

光の入射方向 $\vec{\omega}$ を法線とした半球上で積分（球上で積分）

$$\int_{\Omega} d\sigma(\vec{\omega}') = \int_{\text{半球面全体}} d\theta d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta d\phi \sin(\theta) \left(\int_{\text{球面全体}} d\theta d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} d\theta d\phi \sin(\theta) \right)$$

BRDF = $f_r(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}')$ はエネルギー保存則として以下の式を満たすものとする。

$$\int_{\Omega} d\sigma(\omega') f_r(x, \omega, \omega') L_i(x, \omega') \cos(\theta) \leq 1$$

これは、つまり、反射した光の総和が入射した光の量を超えてはいけないという法則

さらに、以下のヘルムホルツの相反性(reciprocity)を満たす事が必要。

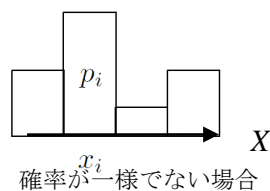
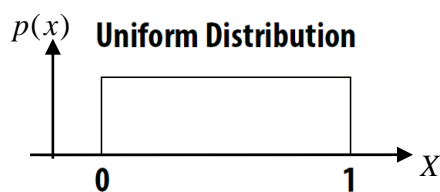
$$f_r(x, \omega, \omega') = f_r(x, \omega', \omega) \quad \text{これは、入射した方向と反射した方向を入れ替えても反射率は同じであるという法則}$$

確率密度関数 (probability density function(PDF))

pdf は簡単に言えば x になる確率を表す関数。

従って一様分布と言われる確率に対する確率密度関数は下の図のようになる。

つまり、どのような x に対しても同程度の確率で出現する乱数とその例となる。



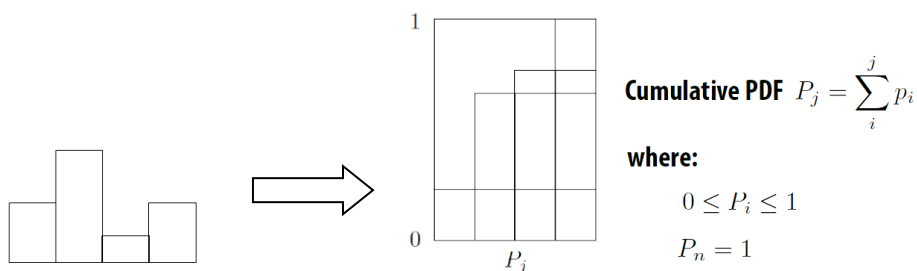
Six-sided die example: $p_i = \frac{1}{6}$ $p_i \geq 0$ $\sum_i p_i = 1$

確率が一樣：サイコロ

累積分布関数 (cumulative distribution function, CDF)

cdf は x をある範囲にしたときの確率を表す。つまり確率の累積、確率値の和になる。

当然、全範囲なら 1

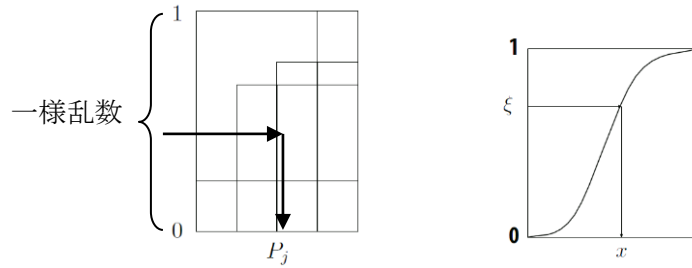


$$P(x) = \int_0^x dx p(x) \equiv P_r(X < x)$$

$$P_r(a \leq X \leq b) = \int_a^b dx p(x) = \int_0^b dx p(x) - \int_0^a dx p(x)$$

$$= P(b) - P(a)$$

累積分布関数が分かると一様乱数をつかってそのような分布を示す乱数が作れる。
逆関数法。



Sampling the cosine distribution

$$p(\omega) \propto \cos(\theta)$$

$$x = \cos(2\pi\xi_2)\sqrt{\xi_1}$$

$$y = \sin(2\pi\xi_2)\sqrt{\xi_1}$$

$$z = \sqrt{1 - \xi_1}$$

$$p(\omega) = c \cos^e(\theta)$$

$$\phi = 2\pi\xi_1$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[(1 - \xi_2)^{1/(e+1)} \right]$$

Henyeey-Greenstein phase function

確率分布は $\int_{\text{半球面全体}} pdf(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi d\theta d\phi pdf(\theta, \phi) \sin(\theta) = 1$

$pdf(\theta, \phi)$ の θ や ϕ をどのような乱数にしたらこの分布になるのかを求める。

$$pdf(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

PDF から累積確率密度関数は

$$\begin{aligned} cdf(\theta, \phi) &= \int_{\text{球面全体}} PDF = \int_0^\phi \int_0^\theta d\theta' d\phi' \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta')^{3/2}} \sin(\theta') \\ &= \frac{1 - g^2}{4\pi} \int_0^\phi \int_0^\theta d\theta' d\phi' \frac{\sin(\theta')}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta')^{3/2}} \\ &= \frac{2\pi(1 - g^2)}{4\pi} \int_0^\theta d\theta' \frac{\sin(\theta')}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta')^{3/2}} \\ &= \frac{(1 - g^2)}{2} \int_0^\theta d\theta' \frac{\sin(\theta')}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta')^{3/2}} \\ &= \frac{(1 - g^2)}{2g} \int_{(1-g)^2}^{1+g^2-2g \cos \theta'} du u^{3/2} = \frac{-(1 - g^2)}{2\pi g} u^{-1/2} \Big|_{(1-g)^2}^{1+g^2-2g \cos \theta'} \\ &= \frac{1 - g^2}{2g} \left(\frac{1}{1 - g} - \frac{1}{\sqrt{1 + g^2 - 2g \cos \theta'}} \right) \end{aligned}$$

$cdf(\theta, \phi) = F(\theta)G(\phi)$ と置くと

$$F(\theta) = \frac{1 - g^2}{2g} \left(\frac{1}{1 - g} - \frac{1}{\sqrt{1 + g^2 - 2g \cos \theta'}} \right)$$

$$G(\phi) = 1$$

逆関数法によって

$$F(\theta) = \xi, \quad \theta = F^{-1}(\xi)$$

$$\begin{aligned}
\xi_1 &= \frac{1-g^2}{2g} \left(\frac{1}{1-g} - \frac{1}{\sqrt{1+g^2-2g\cos\theta'}} \right) \\
\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1+g^2-2g\cos\theta'}} &= \frac{1}{1-g} - \frac{2g\xi_1}{1-g^2} \\
\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1+g^2-2g\cos\theta'}} &= \frac{1+g-2g\xi_1}{1-g^2} \\
\Rightarrow \sqrt{1+g^2-2g\cos\theta'} &= \frac{1-g^2}{1+g-2g\xi_1} \\
\Rightarrow 1+g^2-2g\cos\theta' &= \left(\frac{1-g^2}{1+g-2g\xi_1} \right)^2 \\
\Rightarrow \cos\theta' &= \frac{1}{2g} \left(1+g^2 - \left(\frac{1-g^2}{1+g-2g\xi_1} \right)^2 \right).
\end{aligned}$$

モンテカルロ積分

数値計算で通常使われる数値積分では手に負えないような非連続、高次元での多重積分で威力を発揮する。計算量は膨大になるが非常に単純。数値計算で通常使われる数値積分よりは現実的なコストで計算できる。

$$I = \int_D d\mu(x) f(x)$$

モンテカルロ積分では

$$I = \int_D d\mu(x) f(x) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(x_i)}{pdf(x_i)}$$

x_i は積分範囲内 D 、確率密度関数 pdf に従ってサンプリングする。

精度を上げるには N を大きくする。つまり、単純な総和を N で割ればよい。

実装の際に参考になったサイトやドキュメント

<http://kagamin.net/hole/simple/index.htm>

<http://www35.atpages.jp/shocker/memoRANDOM/index.php>

上記2サイトは何かと教師になってくれたありがたいサイト。

http://blog.tobias-franke.eu/2014/03/30/notes_on_importance_sampling.html

<http://scratchapixel.com/old/lessons/3d-basic-lessons/lesson-17-monte-carlo-methods-in-practice/monte-carlo-simulation-2/>

http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_ch20.html

http://freespace.virgin.net/hugo.elias/graphics/x_polybm.htm

<http://www.sjbrown.co.uk/2012/07/15/bidirectional-path-tracing-in-participating-media/>

<http://candela.stanford.edu/cs348b-13/>

<http://www.midnightkite.com/color.html>

Philip Dutré

"Global Illumination Compendium"

Computer Graphics, Department of Computer Science Katholieke Universiteit Leuven

"Lecture 16 Global Illumination and Path Tracing"

Image Synthesis Stanford CS348b, Spring 2013

Torsten Moller

James T. Kajiya

"THE RENDERING EQUATION"

California Institute of Technology Pasadena, Ca. 91125

Michael Doggett

"Path Tracing"

Department of Computer Science Lund university

Eric Lafortune

"Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering"

Department of Computer Science, Faculty of Engineering Katholieke Universiteit Leuven

Petri Häkkinen

"Monte Carlo Path Tracing"

46561N

H. Dammertz¹ J. Hanika A. Keller

"Shallow Bounding Volume Hierarchies for Fast SIMD Ray Tracing of Incoherent Rays"

Christopher Kulla¹ and Marcos Fajardo

"Importance Sampling Techniques for Path Tracing in Participating Media"

¹Sony Pictures Imageworks, Culver City, USA ²Solid Angle, Madrid, Spain

"The Henyey-Greenstein phase function."

Steve Marschner

"Multiple scattering"

Cornell CS 6630 Fall 2009

"Participating Media"

CMPT 461/761 Image Synthesis

Steve Marschner

"Volumetric Path Tracing"

Cornell University CS 6630 Spring 2012, 8 March

Leonardo Da Vinci

"Light Transport in ParticipatingMedia"

Wojciech Jarosz

"State of the Art in Photon Density Estimation Participating Media Basics"

Diego Gutierrez Henrik Wann Jensen Srinivasa G. Narasimhan Wojciech Jarosz

"Scattering Course notes"

SIGGRAPH Asia 2008

patrick coleman

"subsurface scattering"

january 30, 2006

Olav Madsen Anders Kyster

"Real-time Rendering of Sub-surface Scattering"

IT University of Copenhagen, August 1st, 2002

Gladimir V. G. Baranoski Aravind Krishnaswamy Bradley Kimmel

"Revisiting the Foundations of Subsurface Scattering"

Natural Phenomena Simulation Group, School of Computer Science, University of Waterloo, Canada Technical Report CS-2003-45

Tom Mertens¹ Jan Kautz Philippe Bekaert Frank Van Reeth Hans-Peter Seidel

"Efficient Rendering of Local Subsurface Scattering"

"CIE XYZ"

Janusz Ganczarski

Chris Wyman Peter-Pike Sloan Peter Shirley

"Simple Analytic Approximations to the CIE XYZ Color Matching Functions"

NVIDIA

Brian Smits

"An RGB to Spectrum Conversion for Reflectances"

University of Utah

Michael Ashikhmin Peter Shirley

"An Anisotropic Phong BRDF Model"

August 13, 2000

David Cline Parris Egbert

"A Practical Introduction to Metropolis Light Transport"

E. Veach, L. J. Guibas

"Metropolis light transport,"

In Proc. of SIGGRAPH '97, pp. 65-76 (1997)

C. Kelemen, L. Szirmay-Kalos, G. Antal, F. Csonka,

"A Simple and Robust Mutation Strategy for the Metropolis Light Transport Algorithm,"

Computer Graphics Forum, 21(3) (Proc. of EUROGRAPHICS 2002), pp. 531-540 (2002)

D. Cline, J. Talbot, P. Egbert,

"Energy redistribution path tracing,"

ACM Transactions on Graphics, 24(3) (Proc. SIGGRAPH 2005), pp. 1186-1195 (2005)

Christopher Batty

"Implementing Energy Redistribution Path Tracing"

Department of Computer Science

The University of British Columbia