環境照明下におけるImageworksライティングモデルを用いた材質のリアルタイムレンダリング

2020/09/19

SQUARE ENIX CO., LTD.
Advanced Technology Division
Mizokuchi Tomohiro
Vongsay Kitti

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

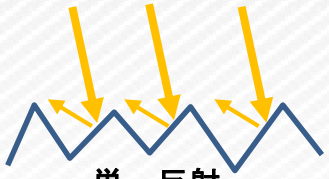
本日の議題

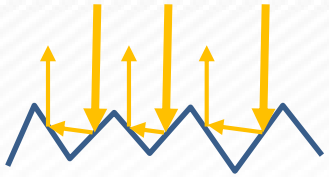
- Imageworksライティングモデルとは
- 環境照明とは
- 研究目的
- 既存手法
- 提案する実装方法
- データ圧縮 (Optional)
- 結果画像
- 今後の予定

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Imageworksライティングモデルとは

- Revisiting Physically Based Shading at Imageworks [Kulla 2017]
  - エネルギー保存則を完全に満たす金属と非金属を効率的に描画
  - Sony Pictures Imageworks Inc.が携わった映画等で利用
  - 単一反射光のみを考慮すると粗い物体表面で描画結果がより暗くなる
  - 多重反射光を考慮することで失われたエネルギーを補填





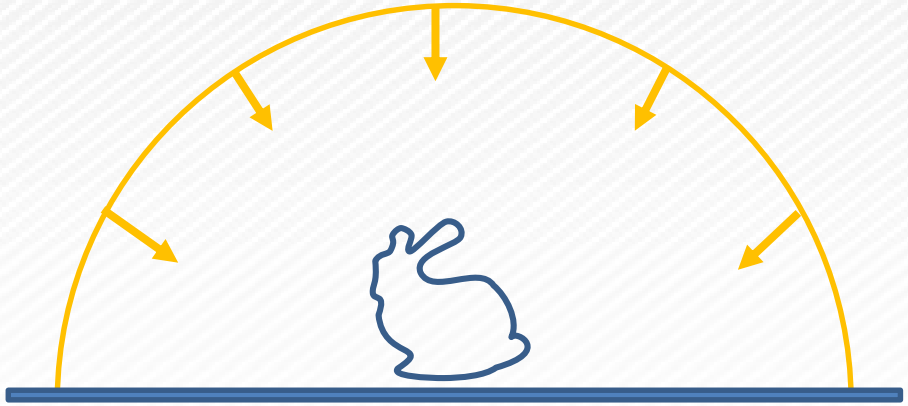
- 環境照明下で高速に描画する実装の詳細が明らかではない

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明とは

- シーン全体を覆う全球面から入射する光
- 現実世界の複雑な環境を考慮した材質の描画が可能
- 環境照明の近似手法: イメージベースドライティング
  - 環境照明をキューブマップ等に保存
  - 物体表面を基準とする上半球から入射する環境照明を用いて材質を描画

キューブマップ



環境照明

- あらゆる方向から入射する光を考慮するため計算コストが高い

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

研究目的

- 環境照明下でImageworksライティングモデルを用いた材質を高速に描画
  - Split Integral法を用いて環境照明の計算を高速化
  - Split Integral法に必要なテーブルデータのサイズを削減

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Split Integral法
Imageworksライティングモデル
Artist Friendly Fresnel

既存手法

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

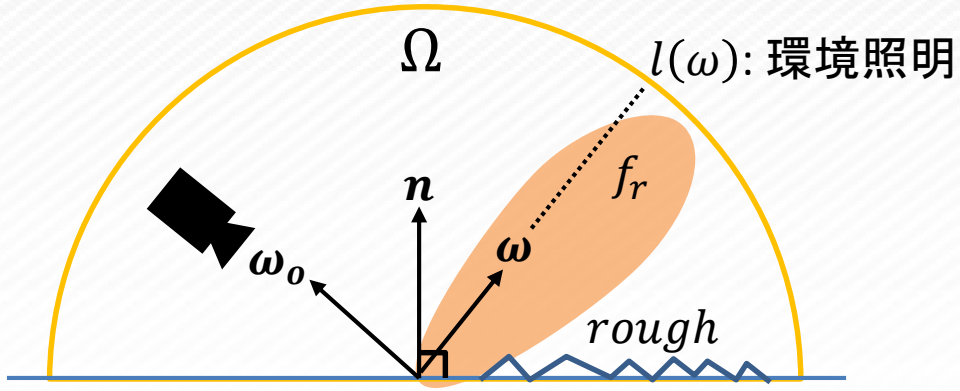
Split Integral法 [Karis 2013]

- 事前に構築したテーブルデータで環境照明の計算に必要な積分を高速に計算
- 指向性アルベド項

$$D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough) = \int_{\Omega} f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}$$

- 環境照明の畳み込み項

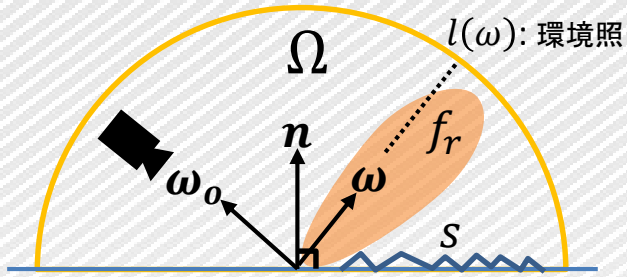
$$L(\boldsymbol{\omega_o}, rough) = \frac{\int_{\Omega} l(\omega) f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}}{D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough)}$$



表：単一反射光の双方向反射率分布関数f_r (BRDF)
本実装におけるBRDFの構成要素 ＊フレネルは別途考慮する
GGX分布 height-correlated masking & shadowing

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Split Integral法 [Karis 2013]



f_r : 単一反射光の双方向反射率分布関数(BRDF)

本実装におけるBRDFの構成要素

GGX分布

height-correlated masking & shadowing

- 事前に構築したテーブルデータで環境照明の計算に必要な積分を高速に計算
- 指向性アルベド項

$$D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough) = \int_{\Omega} f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}$$

- 環境照明の畳み込み項

$$L(\boldsymbol{\omega_o}, rough) = \frac{\int_{\Omega} l(\omega) f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}}{D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough)}$$

- 環境照明の畳み込み項は$\boldsymbol{\omega_o} = \boldsymbol{n}$と仮定して計算
- 各項をテーブルデータとして構築
- 環境照明の計算は各項のテーブルデータの単純な掛け算のみ

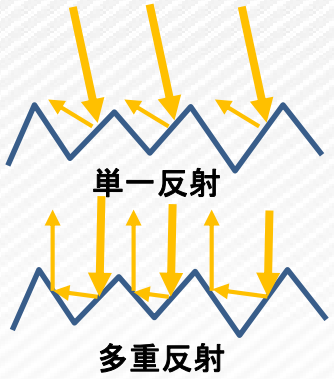
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Imageworksライティングモデル [Kulla 2017]

- 微細表面の多重反射光は指向性アルベド項を用いたBRDFで補填

$$f_{ms}(\mu_o, \mu_i) = \frac{\left(1 - D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough)\right)\left(1 - D(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}, rough)\right)}{\pi(1 - D_{avg})}$$

D_{avg} ：指向性アルベド項の平均

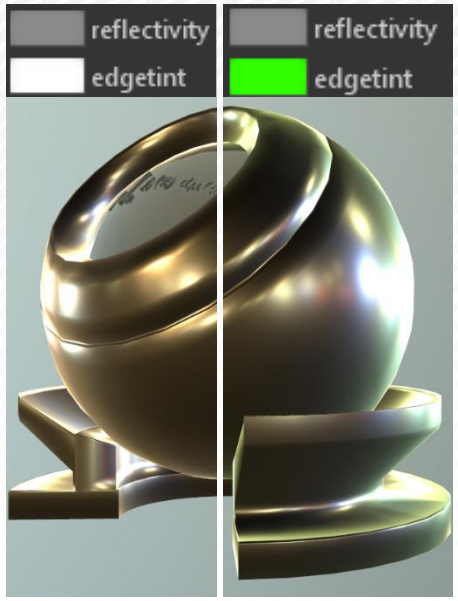


- 微細表面の拡散反射光も上記と同じ方法で補填
  - 拡散反射光の指向性アルベド項D'を計算しテーブルデータを構築
  - 指向性アルベド項D'はBRDF f_rとf_{ms}そしてフレネル項用いて構築

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Artist Friendly Fresnel [Gulbrandsen 2014]

- 金属の材質特性をアーティストが容易に調整できるパラメータを提案
  - Schlick Fresnelよりも厳密な金属の描画が可能
- 依存パラメータ
  - reflectivity: 物体表面法線から入射する光のフレネル反射率
  - edgetint: reflectivityから導出されたフレネル反射率が単調増加する屈折率の範囲を制御
- edgetint(reflectivityを固定したフレネル反射率した場合)
  - edgetintが0でフレネル反射率は最小となる
  - edgetintが1: フレネル反射率は最大となる
- フレネル反射率はBRDF f_rに掛け合わせる
- テーブルデータの次元数が増加
  - 拡散反射光の指向性アルベド項
  - 拡散反射光の環境照明の畳み込み項



©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

指向性アルベド項

環境照明の畳み込み項

提案する実装方法

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

指向性アルベド項

$$D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough) = \int_{\Omega} f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}$$

- 構築するテーブルデータ
  - $D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, s)$： ２次元データ (例: 32*32*4 bytes = 約4 KB)
  - $D'(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, s, \mathrm{reflectivity}, \mathrm{edgetint})$： ４次元データ (例: 32*32*32*32*4 bytes = 約4 MB)
- 指向性アルベドD'のサイズを削減
  - 非金属だと拡散反射光が支配的なためedgetintも0に近い値となる
  - 指向性アルベドD'のedgetintを0に固定したテーブルデータD_0を利用
  - D_0をそのまま利用すると半導体でエネルギー保存則を満たさない
- 半導体のエネルギー保存則の考慮
  - テーブルデータに関数$f(\mathrm{edgetint}) = \min_{\{\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough, \mathrm{reflectivity}\}} \frac{D'(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough, \mathrm{reflectivity}, \mathrm{edgetint})}{D_0}$ を掛け合わせ
  - 関数$f(\mathrm{edgetint})$はあくまでエネルギー保存則を満たすための上限値
  - 本実装ではより計算コストの低い関数$f'(g) = 1 - \mathrm{edgetint}$を採用

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

Imageworksライティングモデルの改善

- 指向性アルベド項D_0と関数$f'(\mathrm{edgetint})$を利用
  - 拡散反射光のBRDFで利用する指向性アルベド項D'をD_0に置き換え
  - 拡散反射光のBRDFに関数$f'(\mathrm{edgetint})$を掛け合わせる
- 半導体でもエネルギー保存則を満たすようになる

$rough$ = 0　　指向性アルベド項 (reflectivity = 0.5, edgetint = 1, albedo = 1)　　$rough$ = 1

従来のImageworksライティングモデル

改善したImageworksライティングモデル

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明の畳み込み項

$$L(\boldsymbol{\omega_o}, rough) = \frac{\int_\Omega l(\omega) f_r(\boldsymbol{\omega_o}, \boldsymbol{\omega}, rough) \max(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, 0)\, d\boldsymbol{\omega}}{D(\boldsymbol{\omega_o} \cdot \boldsymbol{n}, rough)}$$

- 単一反射光、多重反射光、拡散反射光で環境照明の畳み込み項を計算
  - 各反射光のBRDFを用いて計算
- 拡散反射光の環境照明の畳み込み項
  - 依存パラメータはω_o, $rough$, reflectivity, edgetint
  - 改善したImageworksライティングモデルを用いて畳み込み項を計算
  - 関数$f'(\mathrm{edgetint})$は上記の積分の分母と分子で打ち消しあう
  - テーブルデータがedgetintに依存しなくなるためテーブルデータを削減することができる

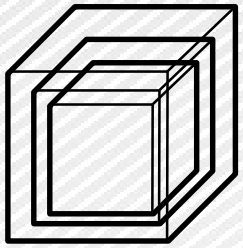
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

データ圧縮 (OPTIONAL)

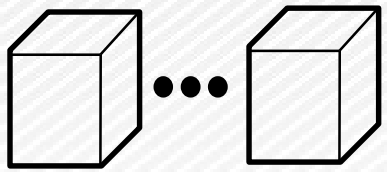
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明の畳み込み項のデータ構造

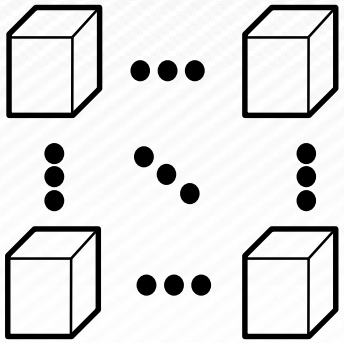
- 単一反射光の環境照明の畳み込み項
  - 物体表面の粗さ$rough$によるミップ付きキューブマップ
  - $rough$が0に近いほど高解像度なデータが必要
- 多重反射光の環境照明の畳み込み項
  - $rough$によるキューブマップの1次元配列
  - 単一反射光よりも低周波なため低解像度なデータを構築
- 拡散反射光の環境照明の畳み込み項
  - $rough$とreflectivityによるキューブマップの2次元配列
  - 多重反射光よりも低周波なため低解像度なデータを構築



Cube map with mip



Cube map 1D array

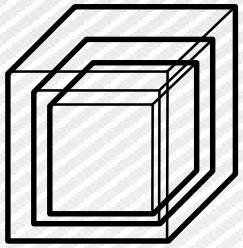


Cube map 2D array

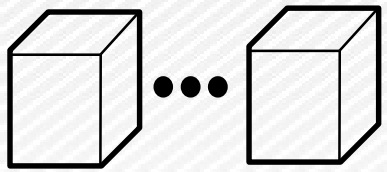
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明の畳み込み項のデータ構造

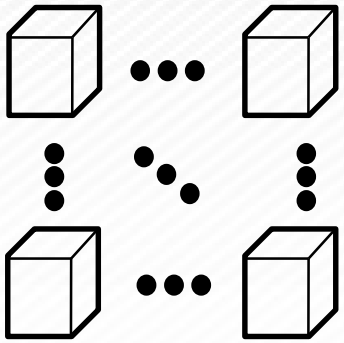
- 単一反射光の環境照明の畳み込み項
  - フォーマット = BC6H_UF16.
  - 解像度 = 512*512*6[面]*9[ミップ]
  - インデックス = $\sqrt{rough}$ * 9[ミップ]
- 多重反射光の環境照明の畳み込み項
  - フォーマット = BC6H_UF16
  - 解像度 = 64*64*6[面]*8[配列数]
  - インデックス = $\sqrt{rough}$*8[配列数]
- 拡散反射光の環境照明の畳み込み項
  - フォーマット = BC6H_UF16
  - 解像度 = 64*64*6[面]*(4, 4)[配列数]
  - インデックス = ($\sqrt{rough}$, reflectivity)*(4, 4)[配列数]



Cube map with mip



Cube map 1D array



Cube map 2D array

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

データ圧縮

- 環境照明の畳み込み項のテーブルデータ
  - BC6Hで圧縮すると各反射光のテーブルデータのサイズは約200~400Kbytes
- 多重反射成分と拡散反射成分の環境照明の畳み込み項
  - キューブマップが低周波の場合基底関数で近似可能
- 様々な基底関数を用いてテーブルデータを圧縮
  - 球面調和関数 (SH): SH3, SH4, SH5.
  - アンビエントダイス (AD): RGB, YCoCg, SRBF.
- 最終的なテーブルデータのサイズ
  - 多重反射光のテーブルデータ: 864bytes ~ 2.4Kbytes.
  - 拡散反射光のテーブルデータ: 432bytes ~ 1.2Kbytes.
- 欠点
  - 近似精度はキューブマップに依存, 近似したキューブマップに負の値が含まれる

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明

環境照明の畳み込み項 (多重反射光)

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 1D Array)

$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
0.002		RMSE = 0.571352	RMSE = 0.540196	RMSE = 0.484989	RMSE = 0.457583	RMSE = 0.463601	RMSE = 0.571733
0.14		RMSE = 0.414258	RMSE = 0.355549	RMSE = 0.32926	RMSE = 0.290568	RMSE = 0.298982	RMSE = 0.400638
0.28		RMSE = 0.266122	RMSE = 0.178733	RMSE = 0.17727	RMSE = 0.141364	RMSE = 0.154181	RMSE = 0.233206
0.42		RMSE = 0.158992	RMSE = 0.118812	RMSE = 0.075932	RMSE = 0.0645063	RMSE = 0.075604	RMSE = 0.147906

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 1D Array)

$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
0.57		RMSE = 0.0899023	RMSE = 0.087853	RMSE = 0.0366953	RMSE = 0.0363633	RMSE = 0.0439921	RMSE = 0.105077
0.71		RMSE = 0.063691	RMSE = 0.0592943	RMSE = 0.0245234	RMSE = 0.0266658	RMSE = 0.0359075	RMSE = 0.0836855
0.85		RMSE = 0.0623491	RMSE = 0.0464078	RMSE = 0.022924	RMSE = 0.0242764	RMSE = 0.0357315	RMSE = 0.0775836
1		RMSE = 0.062588	RMSE = 0.0438467	RMSE = 0.0228335	RMSE = 0.0238406	RMSE = 0.0357957	RMSE = 0.076436

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

環境照明

環境照明の畳み込み項 (拡散反射光)

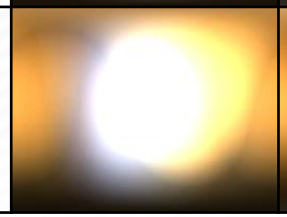
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 2D Array)

specular	$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
0	0		RMSE = 0.0633535	RMSE = 0.0543815	RMSE = 0.0242231	RMSE = 0.025832	RMSE = 0.0360711	RMSE = 0.0816929
0	0.33		RMSE = 0.0547206	RMSE = 0.0489502	RMSE = 0.0186972	RMSE = 0.0233424	RMSE = 0.0327869	RMSE = 0.0743957
0	0.66		RMSE = 0.0511797	RMSE = 0.0503344	RMSE = 0.0191675	RMSE = 0.0249864	RMSE = 0.0322751	RMSE = 0.0720122
0	1		RMSE = 0.0521126	RMSE = 0.0518774	RMSE = 0.0201597	RMSE = 0.0257969	RMSE = 0.0326087	RMSE = 0.0727254

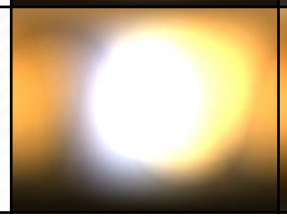
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 2D Array)

specular	$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
0.33	0		RMSE = 0.0571573	RMSE = 0.0566709	RMSE = 0.0224117	RMSE = 0.0274131	RMSE = 0.0344798	RMSE = 0.0779214
0.33	0.33		RMSE = 0.0540253	RMSE = 0.0538879	RMSE = 0.0208884	RMSE = 0.0263596	RMSE = 0.0331682	RMSE = 0.0745169
0.33	0.66		RMSE = 0.0536121	RMSE = 0.0534815	RMSE = 0.0204528	RMSE = 0.0259924	RMSE = 0.0328962	RMSE = 0.0741174
0.33	1		RMSE = 0.0510283	RMSE = 0.0499593	RMSE = 0.0192056	RMSE = 0.0250309	RMSE = 0.0323406	RMSE = 0.0718611

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 2D Array)

specular	$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
0.66	0		RMSE = 0.0655546	RMSE = 0.0602326	RMSE = 0.034926	RMSE = 0.0347999	RMSE = 0.0395627	RMSE = 0.0787497
0.66	0.33		RMSE = 0.0650394	RMSE = 0.0605704	RMSE = 0.0320905	RMSE = 0.0331192	RMSE = 0.0382413	RMSE = 0.0792109
0.66	0.66		RMSE = 0.0564754	RMSE = 0.0564213	RMSE = 0.0218557	RMSE = 0.0270047	RMSE = 0.0335898	RMSE = 0.0762957
0.66	1		RMSE = 0.050936	RMSE = 0.0476247	RMSE = 0.0185262	RMSE = 0.0241725	RMSE = 0.0323597	RMSE = 0.0714479

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

近似結果 (データ構造 = Cube Map 2D Array)

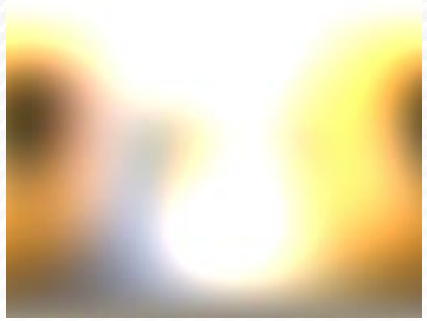
specular	$\sqrt{rough}$	リファレンス	SH3	SH4	SH5	AD RGB	AD YCoCg	AD SRBF
1	0		RMSE = 0.11225	RMSE = 0.0842352	RMSE = 0.0839204	RMSE = 0.069644	RMSE = 0.0736219	RMSE = 0.10493
1	0.33		RMSE = 0.0938861	RMSE = 0.0719985	RMSE = 0.0578288	RMSE = 0.0485627	RMSE = 0.0536436	RMSE = 0.0938258
1	0.66		RMSE = 0.0584925	RMSE = 0.0570699	RMSE = 0.0248793	RMSE = 0.0286543	RMSE = 0.0345669	RMSE = 0.0760983
1	1		RMSE = 0.0499161	RMSE = 0.0483398	RMSE = 0.0186967	RMSE = 0.0245738	RMSE = 0.0320775	RMSE = 0.0707247

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

考察

- アンビエントダイス – RGB, YCoCg.
  - ☺RMSEの結果を考慮すると品質はSH4やSH5とほぼ同じ
  - ☺より周波の高いキューブマップの近似の品質はSH4やSH5よりも高い
  - ☹元のキューブマップの色が暗い所でアーティファクトが発生

リファレンス

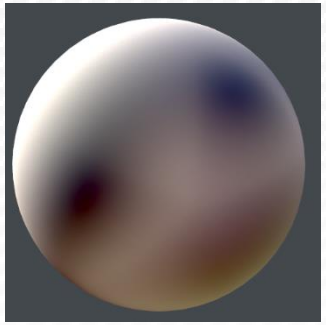


SH5

AD RGB

Pre-filtered Cube Map Approximation

環境照明の畳み込み項 (AD RGB)



球上での描画結果

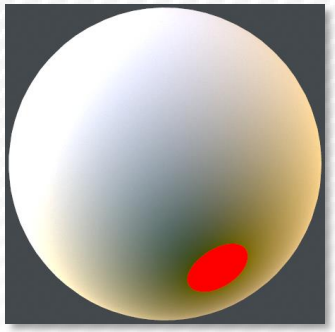
Specific Artifacts

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

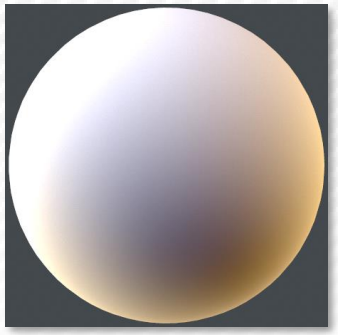
考察

- アンビエントダイス – SRBF.
  - ☺ RMSEの結果を考慮すると品質はSH3とほぼ同じ
  - ☹ 入力であるキューブマップに依存, 近似結果に負の値が含まれる
- 本実装では品質と安定性を考慮してSRBFを採用

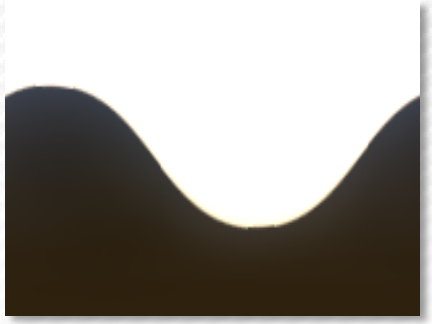
環境照明の畳み込み項
(リファレンス)



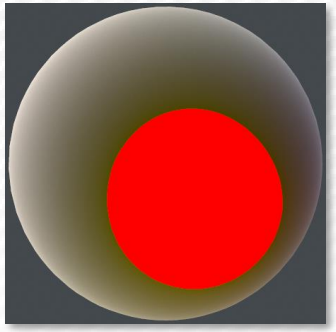
SH3



AD SRBF



環境照明の畳み込み項
(リファレンス)



SH3

AD SRBF

Visualization of Negative Value (Red term is negative)

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

結果画像

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

描画時間

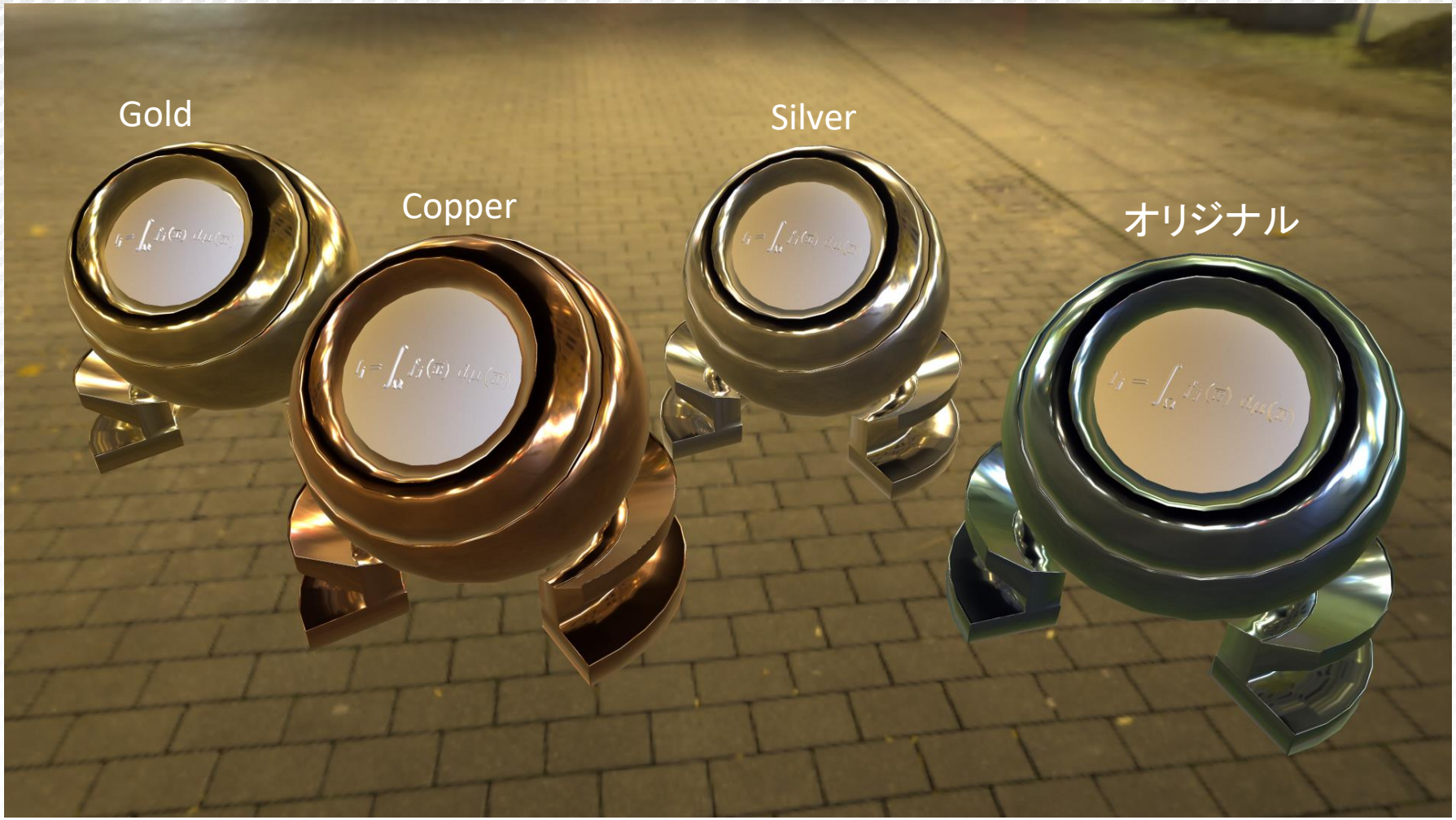
- GPU: NVIDIA® GeForce® GTX 1070
- ツール: Marmoset Toolbag™ 3
- 描画時間の計測はToolbagのエディター内で実施

重点的サンプリング法 (約 11 ms)

Split Integral法 (約 0.5 ms)

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

金属 (Fresnel f0 and edgetint from [Gulbrandsen 2014])



©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

金属 – *rough*

rough = 0 rough = 1

金

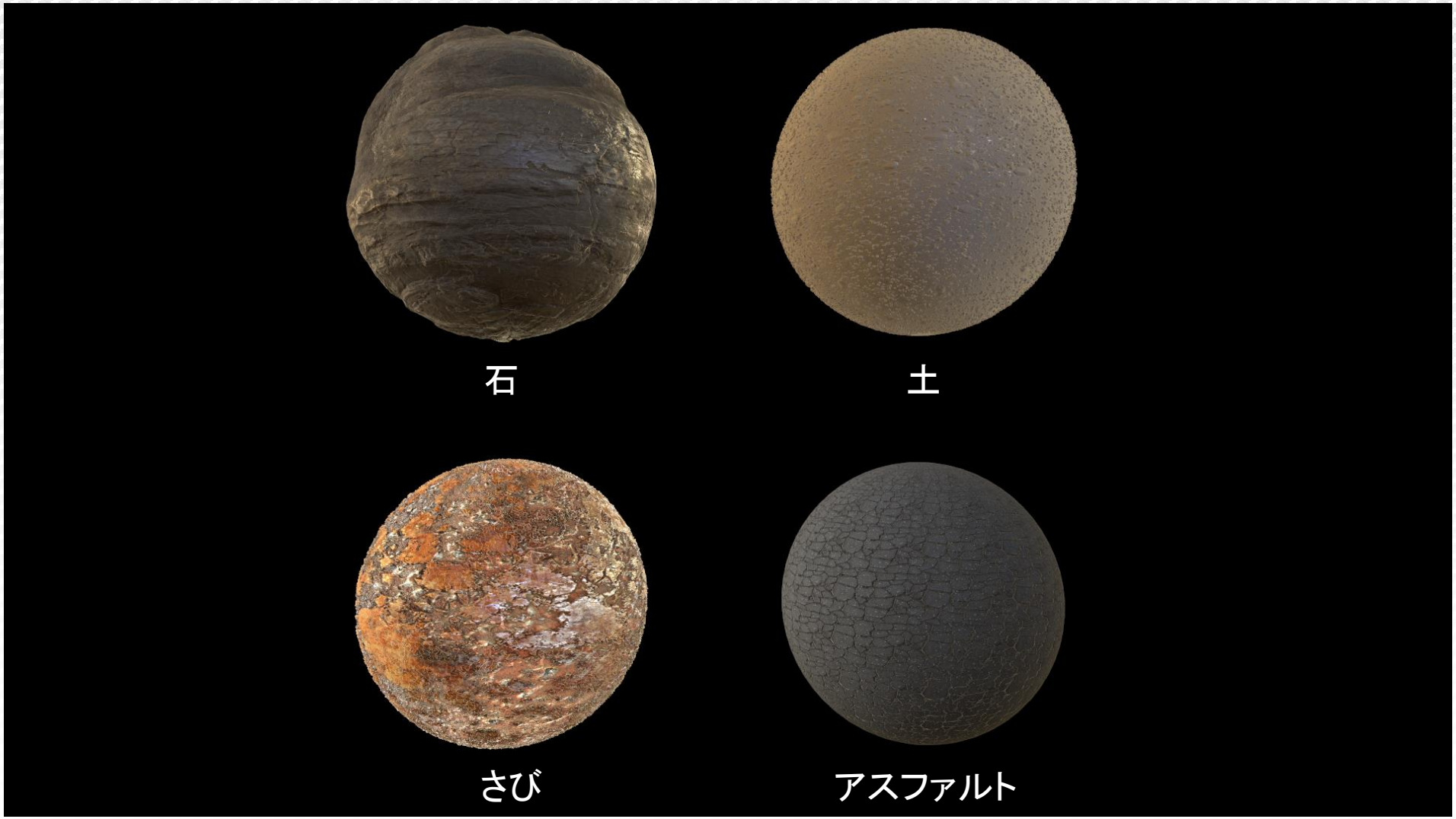
銅

銀

オリジナル

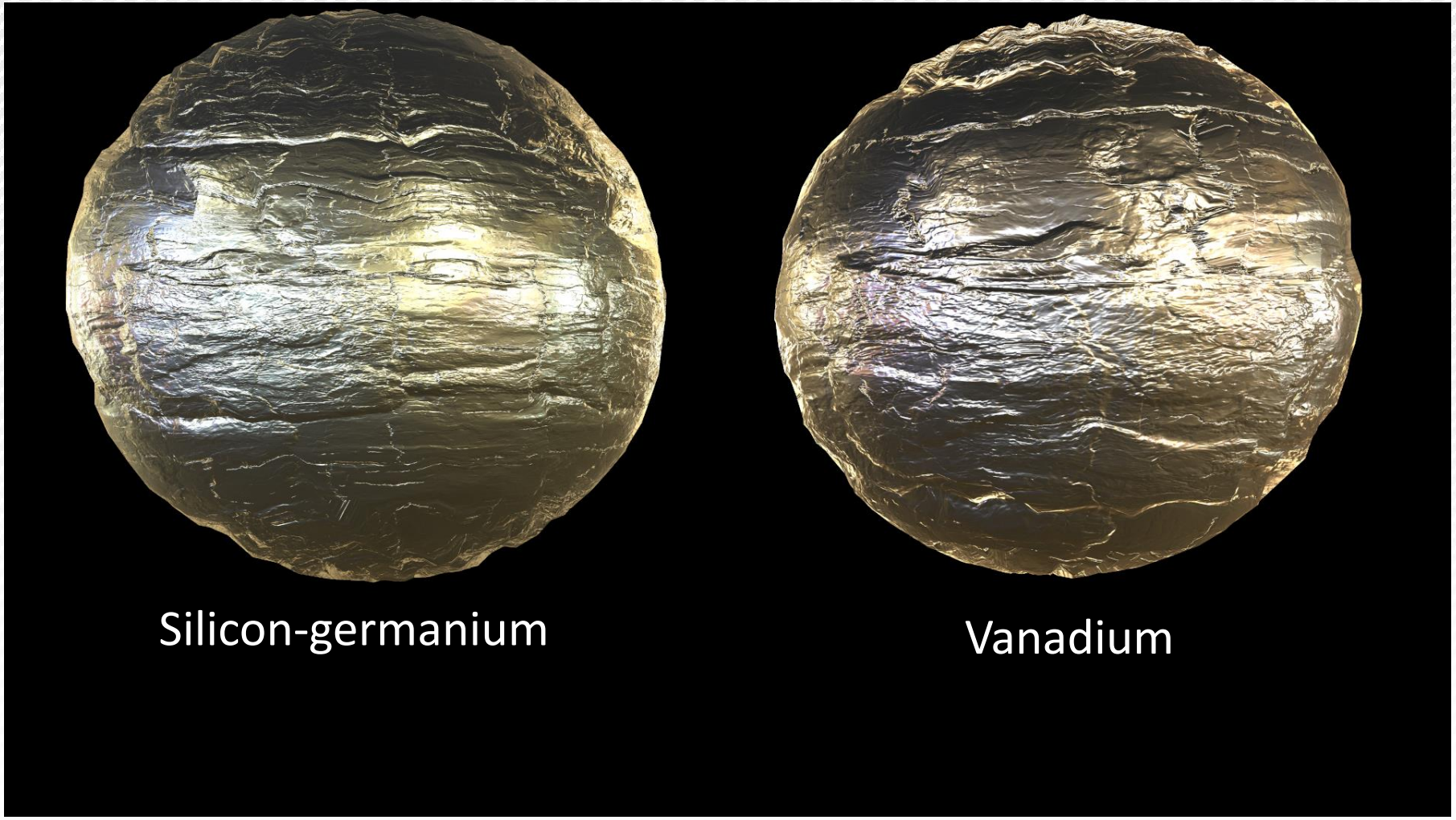
©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

非金属



©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

半導体 (Fresnel reflectivity and edgetint from RefractiveIndex.Info)



©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

まとめと今後の予定

- まとめ
  - 環境照明下でImageworksライティングモデルを用いた材質を高速に描画
  - Split Integral法を用いて環境照明の計算を高速化
  - Split Integral法に必要なテーブルデータのサイズを削減
  - アンビエントダイスを用いたテーブルデータの圧縮
- 今後の予定
  - 異方性BRDFの対応
  - アンビエントダイスのアーティファクトの軽減

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

謝辞

- Adelle Bueno
- Eduardo Mosena
- Isamu Hasegawa
- Yusuke Tokuyoshi

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

参考文献

1. [Gulbrandsen 2014] Ole Gulbrandsen. Artist Friendly Metallic Fresnel.
2. [Iwanicki 2017] Michal Iwanicki and Peter-Pike Sloan. Ambient Dice.
3. [Jakob 2014] Wenzel Jakob, Eugene d'Eon, Otto Jakob and Steve Marschner. A Comprehensive Framework for Rendering Layered Materials.
4. [Karis 2013] Brian Karis. Real Shading in Unreal Engine 4.
5. [Kelemen 2001] Csaba Kelemen and Laszlo Szirmay-Kalos. A Microfacet Based Coupled Specular-Matte BRDF Model with Importance Sampling.
6. [Krivanek 2008] Jaroslav Krivanek and Mark Colbert. Real-time Shading with Filtered Importance Sampling.
7. [Kulla 2017] Christopher Kulla and Alejandro Conty. Revisiting Physically Based Shading at Imageworks.
8. [Lagarde 2014] Sebastien Lagarde and Charles de Rousiers. Moving Frostbite to Physically Based Rendering 3.0.
9. [Lagarde 2018] Sebastien Lagarde and Evgenii Golubev. The Road Toward Unified Rendering with Unity's High Definition Render Pipeline.
10. [Schlick 1994] Schlick, C., An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering.

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.

引用

画像:
p.4: HDRIHAVEN, green_2k.hdr, https://hdrihaven.com/hdri/?c=nature&h=green_sanctuary, CC by 0.0.
p.10: Mori Knob, Yasutoshi Mori, https://casual-effects.com/data/, CC by 3.0.
p.19, 22: HDRIHAVEN, hansaplatz_2k.hdr, https://hdrihaven.com/hdri/?c=outdoor&h=hansaplatz, CC by 0.0.

トレードマーク:
-SONY PICTURESはSony Corporationの登録商標 または 商標です。

©2020 SQUARE ENIX CO., LTD. All Rights Reserved.