

X-Slit を用いた光線群サンプリングによる広域 BRDF 計測

Ray Sampling by using X-Slit for wide BRDF measurement

宮田 明裕[†] 船富 卓哉[†] 久保 尋之[†] 向川 康博[†]

Akihiro MIYATA[†], Takuya FUNATOMI[†], Hiroyuki KUBO[†], and Yasuhiro MUKAIGAWA[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

E-mail: [†]{miyata.akihiro.lq9,funatomi,hkubo,mukaigawa}@is.naist.jp

あらまし 物体表面の反射特性を表す BRDF を計測することは、物体表面への入射光線と反射光線をサンプリングする問題と捉えられる。本論文では、多様な光線のサンプリングを実現できる X-Slit に着目し、これを備えたイメージセンサと面光源を組み合わせた BRDF 計測装置を提案する。X-Slit はねじれの関係にある 2 本のスリットを光線が通過するため、ピンホールのように 1 点に束縛されず、多様な光線をサンプリングできる。この X-Slit の投影モデルに基づき、スリットのパラメータとサンプリングされる BRDF パラメータとの関係の定式化を行う。X-Slit を用いた BRDF 計測をシミュレーションにより評価し、通常のピンホールモデルに比べて広域な計測が実現できることを示す。

1. はじめに

コンピュータグラフィックス分野では、双方向反射率分布関数 BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) と呼ばれる物体の反射特性を記述したモデルが重要であり、実物体の BRDF を計測したデータベースも活用されている [6]。この BRDF は、物体への光の入射方向と反射方向に依存するため、その計測は入射光線に対する反射光線をサンプリングする幾何的な問題であると捉えられる。近年、このようなサンプリングに利用できる装置として、光線空間カメラが市販されるようになってきている [1]。光線空間を取得する方法としては、他にもカメラアレイを用いる方法 [10]、マイクロレンズを用いた方法 [7] などが挙げられるが、中でも X-Slit と呼ばれる 2 本のスリットを用いた方法 [4] は他の手法に比べ自由度が高い射影を実現できることが知られている。

従来から、X-Slit に関連する研究として、射影モデルを定義した研究 [3, 8, 13] やエピソード幾何について述べた研究 [3]、画像のモザイクング技術 [13]、符号化撮像技術 [11]、光線空間を用いたリフォーカス技術 [4] に応用した研究などが報告されている。それに対して、我々は新たに X-Slit を BRDF の計測 [5] に適用することを考える。

本論文では X-Slit の高自由度のパラメータを変えることで、BRDF 計測における入射光線や反射光線を多様にサンプリングできる可能性について検討する。X-Slit は従来のピンホールを一般化したモデルと捉えることができ、後述のシミュレーション実験ではピンホールと X-Slit の BRDF 計測における相違を評価する。

2. X-Slit を用いた BRDF 計測

2.1 X-Slit の原理

ピンホールモデルを用いる場合、図 1 のように、撮像素子に

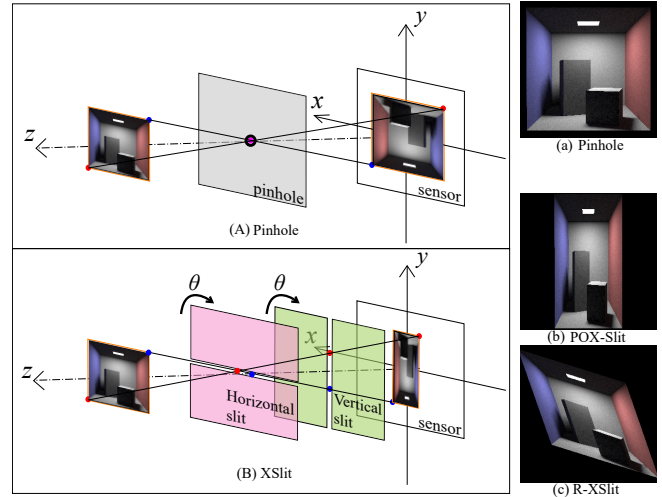


図 1 ピンホールモデルと X-Slit モデル、および各モデルによる CG

到達する光線は必ずある一点を通過するのに対し、X-Slit モデルではねじれの関係にある 2 本のスリットを光線が通過する。このとき、各モデルとその撮影画像を図 1 に示す。図 1(a) にはピンホールモデル、(b), (c) には X-Slit モデルによって撮影される画像を CG によるシミュレーションで生成した。図 1(b) は図 1(B) のように水平と垂直の 2 本のスリットによる投影の結果、水平方向の画角と垂直方向の画角が異なることがわかる。また図 1(c) は図 1(B) においてスリットを z 軸周りに回転させた場合の結果である。

X-Slit の 2 本のスリットを同じ位置に配置するとピンホールになることから、X-Slit はピンホールを内包する一般化した射影モデルであり、ピンホールより入射光線と反射光線を多様にサンプリングできる可能性があることを示している。

2.2 BRDF 計測

BRDF は、物体表面上のある点における任意の方向からの入

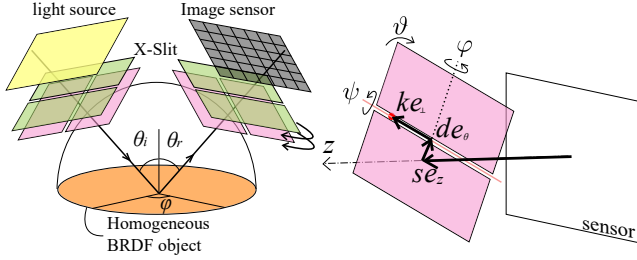


図2 BRDF 計測システム

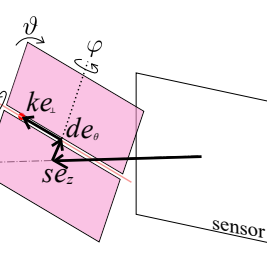


図3 内部パラメータ

射光に対する任意の方向への反射率を表す関数であり、BRDFの完全な計測のためには膨大な角度の組み合わせが必要となる。そのため広域な方向からBRDFを計測する手法が提案されており、[5]ではピンホールモデルを用いてセンサの画素数分だけ角度の組み合わせをサンプリングしている。そこで我々は、ピンホールモデルではなくX-Slitモデルを使用した場合に、その自由度の高さから、より広域なBRDF計測を実現できると考えた。本研究で想定するX-Slitを用いたBRDF計測の概略図を図2に示す。本研究では[5]と同様にBRDFが物体表面で同様であることを前提とする。

2.3 X-Slitの内部パラメータ

X-Slitを三次元空間での2本の直線として表現する内部パラメータの定義と、内部パラメータと光線サンプリングの関係について説明する。

本研究では、図2に示すようにカメラと面光源のそれぞれにX-Slitを用いる。ここで、カメラ座標と面光源座標を定義する。カメラ座標の原点をイメージセンサ（以降では単にセンサと呼ぶ）の中心、面光源座標の原点を面光源の中心とする。カメラ座標における三次元空間中の点 $M_c = (x_c, y_c, z_c)^\top$ は、2本のスリットを通り、センサ上のある点 $m_c = (u_c, v_c, 0)^\top$ に投影される。図1(B)のように、水平スリットと垂直スリットをそれぞれ $z_c = s_1^c$ と $z_c = s_2^c$ に配置する。このときの水平垂直のスリットによる投影はPOX-Slit projection(Parallel-Orthogonal X-Slit)と呼ばれる[2]。さらに図3のように水平スリット、垂直スリットはそれぞれ z_c -軸と d_1^c, d_2^c だけ隔てているものとし、回転角 $\vartheta_1^c, \varphi_1^c$ と $\vartheta_2^c, \varphi_2^c$ を用いて各スリットを表現する直線が一般化される。これら $(s_1^c, s_2^c, d_1^c, d_2^c, \vartheta_1^c, \vartheta_2^c, \varphi_1^c, \varphi_2^c)$ をカメラ側のX-Slitの内部パラメータとする。これらを用いた射影モデルの詳細は2.4にて説明する。

同様に、面光源座標における三次元空間中の点 $M_l = (x_l, y_l, z_l)^\top$ は光源のある平面上のある点 $m_l = (u_l, v_l, 0)^\top$ に投影され、このときのスリットを表現するパラメータ $(s_1^l, s_2^l, d_1^l, d_2^l, \vartheta_1^l, \vartheta_2^l, \varphi_1^l, \varphi_2^l)$ を面光源側のX-Slitの内部パラメータとする。

2.4 X-Slitの射影モデル

図4に示すように三次元点 M は、方向ベクトル a を用いて、以下の式によりセンサ面上あるいは光源面上の m に投影される。

$$M = (M)_z a + m, \quad a = (p, q, 1)^\top \quad (1)$$

なお、 $(\cdot)_z$ は第3成分を表す。水平スリットと垂直スリットの

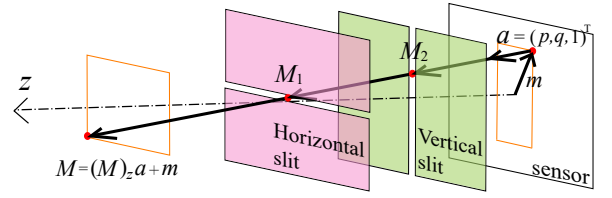


図4 X-Slit カメラにおける投影

直線上の点をそれぞれ M_1 と M_2 とすると、以下の式で表される。

$$M_1 = (M_1)_z a + m, \quad (2)$$

$$M_2 = (M_2)_z a + m \quad (3)$$

図3において、スリットの直線と e_ϑ は z 軸 ($e_z = (0, 0, 1)^\top$) から最も近い2点間を結ぶ直線方向ベクトルとして定義し、 e_ϑ の xy 平面内における y -軸とのなす角を ϑ とする。この e_ϑ 軸周りの回転角を φ と定義する。また軸の方向を $e_\perp$ をスリットの直線方向を表す方向ベクトルとし、この軸周りの回転角を ψ とする。

簡単のため、 $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ を仮定する。このとき ϑ 回転するX-SlitはR-XSliit(Rotational X-Slit)と呼ばれる[4, 12]。このとき直線上の移動量を表す k_1 と k_2 を用いて、 M_1 と M_2 はそれぞれ

$$M_1 = s_1 e_z + d_1 e_{\vartheta_1} + k_1 e_{\perp_1} = \begin{bmatrix} d_1 \sin \vartheta - k_1 \cos \vartheta, d_1 \cos \vartheta + k_1 \sin \vartheta, s_1 \end{bmatrix}^\top, \quad (4)$$

$$M_2 = s_2 e_z + d_2 e_{\vartheta_2} + k_2 e_{\perp_2} = \begin{bmatrix} d_2 \cos \vartheta + k_2 \sin \vartheta, -d_2 \sin \vartheta + k_2 \cos \vartheta, s_2 \end{bmatrix}^\top \quad (5)$$

と表され、式(2)、(3)、(4)、(5)から k_1 と k_2 が得られる。

$$k_1 = -\frac{s_1}{s_2} d_2 - (1 - \frac{s_1}{s_2})(u \cos \vartheta - v \sin \vartheta), \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{s_2}{s_1} d_1 + (1 - \frac{s_2}{s_1})(u \sin \vartheta + v \cos \vartheta) \quad (7)$$

この k_1 と k_2 を式(4)と(5)に代入することで M_1 と M_2 が内部パラメータ $(s_1, s_2, d_1, d_2, \vartheta_1, \vartheta_2, \varphi_1, \varphi_2)$ で表現される。さらに式(2)(あるいは式(3))から方向ベクトル a が求まる。

$$a = \frac{M_1 - m}{(M_1)_z} = A(m + e_z) \quad (8)$$

ここで A はX-Slitにおける 3×3 の射影変換であり、内部パラメータを用いて以下のように表される。

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{s_1} \sin^2 \vartheta - \frac{1}{s_2} \cos^2 \vartheta & (\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1}) \sin \vartheta \cos \vartheta & 0 \\ (\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1}) \sin \vartheta \cos \vartheta & -\frac{1}{s_1} \cos^2 \vartheta - \frac{1}{s_2} \sin^2 \vartheta & 0 \\ \frac{d_1}{s_1} \sin \vartheta + \frac{d_2}{s_2} \cos \vartheta & \frac{d_1}{s_1} \cos \vartheta - \frac{d_2}{s_2} \sin \vartheta & 1 \end{bmatrix}^\top \quad (9)$$

以降、 A_c をカメラ側の射影変換、 A_l を光源側の射影変換とし

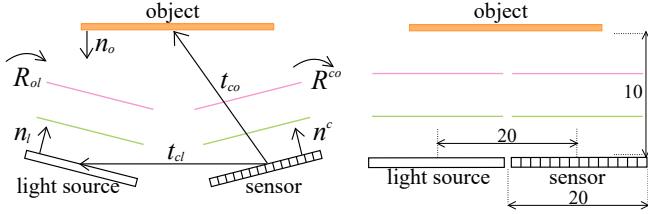


図5 外部パラメータとシミュレーションの設定値

て既知のものであるとする。

2.5 外部パラメータ

簡単のため、計測対象の物体は平面であると仮定する。図5はカメラ・光源・物体の間の外部パラメータを表す。カメラ座標系における物体平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_o$ はカメラの姿勢 $\mathbf{n}_c = (0, 0, 1)^\top$ と両者の間の回転行列 R_{co} を用いて $\mathbf{n}_o = -R_{co}\mathbf{n}_c$ と表される。また面光源の法線ベクトル $\mathbf{n}_l$ は物体平面から面光源への回転行列 R_{ol} を用いて $\mathbf{n}_l = -R_{ol}\mathbf{n}_o = R_{ol}R_{co}\mathbf{n}_c$ と表される。

カメラ座標系の原点から、物体平面上のある点までの並進ベクトルを $\mathbf{t}_{co}$ 、面光源の中心までの並進ベクトルを $\mathbf{t}_{cl}$ とする。

2.6 BRDF を表す角度パラメータ

カメラ座標系における三次元点 $\mathbf{M}_c$ が物体平面上に存在するとき、

$$\mathbf{n}_o^\top (\mathbf{M}_c - \mathbf{t}_{co}) = 0 \quad (10)$$

が成立する。カメラ座標系における奥行き $(\mathbf{M}_c)_z$ は式 (1), (9), (10) によって各画素 $\mathbf{m}_c$ について計算され、

$$(\mathbf{M}_c)_z = \frac{\mathbf{n}_o^\top (\mathbf{t}_{co} - \mathbf{m}_c)}{\mathbf{n}_o^\top \mathbf{A}_c (\mathbf{m}_c + \mathbf{n}_c)} \quad (11)$$

となる。 $\mathbf{M}_c$ に対応する、面光源座標系における三次元点 $\mathbf{M}_l$ は外部パラメータを用いて以下のように書き表される。

$$\mathbf{M}_l = (R_{ol}R_{co})^{-1}(\mathbf{M}_c - \mathbf{t}_{cl}) \quad (12)$$

面光源座標系における物体上の三次元点 $\mathbf{M}_l$ が光源側の X-Slit を通過して面光源に投影されるので、式 (1) と (9) の射影変換 $\mathbf{A}_l$ を用いて、 $\mathbf{m}_l$ が求められ、

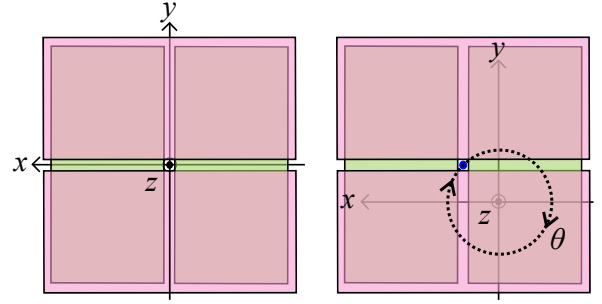
$$\mathbf{m}_l = -\mathbf{n}_l + ((\mathbf{M}_l)_z \mathbf{A}_l + I)^{-1}(\mathbf{M}_l + \mathbf{n}_l) \quad (13)$$

この $\mathbf{m}_l$ と式 (8) から方向ベクトル $\mathbf{a}_l$ が得られる。

以上で、物体表面上のある三次元点が X-Slit を通過する光線の方向ベクトル $\mathbf{a}_c$ 、光源側の X-Slit を通過する光線の方向ベクトル $\mathbf{a}_l$ を、X-Slit の内部パラメータによる射影変換と外部パラメータによって表現することができた。

BRDF を表す角度パラメータは光源の入射光線と反射光線の方向によって記述される。 $\mathbf{a}_c$ と $\mathbf{a}_l$ を物体平面の座標系で表すこととすると、物体平面の座標系における入射光線 ω_i と反射光線 ω_r は以下のように正規化して表される。

$$\omega_i = \frac{-R_{co}^{-1}\mathbf{a}_c}{\| -R_{co}^{-1}\mathbf{a}_c \|}, \quad \omega_r = \frac{-R_{ol}\mathbf{a}_l}{\| -R_{ol}\mathbf{a}_l \|} \quad (14)$$



(a) $(d_1, d_2) = (0, 0, 0)$

(b) $(d_1, d_2) \neq (0, 0, 0)$

図6 回転軸 (z 軸) 上にピンホールがある場合とない場合

表1 実際に用いる内部パラメータと外部パラメータ

(s_1^c, s_2^c)	(s_1^l, s_2^l)	(d_1^c, d_2^c)	(d_1^l, d_2^l)	$(\vartheta_1^c, \vartheta_2^c)$	$(\vartheta_1^l, \vartheta_2^l)$
(s_1, s_2)	(s_1, s_2)	(d_1, d_2)	(d_1, d_2)	$(\vartheta_c, \vartheta_c)$	$(0, 0)$

$(\varphi_1^c, \varphi_2^c)$	$(\varphi_1^l, \varphi_2^l)$	R_{co}	R_{ol}	$\mathbf{t}_{co}$	$\mathbf{t}_{cl}$
$(0, 0)$	$(0, 0)$	I	I	$[-10, 0, 10]^\top$	$[-20, 0, 0]^\top$

ここで得られた ω_i, ω_r から、BRDF を表す角度のパラメータ空間は Rusinkiewicz 座標を用いて $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ と表せる [9]。

2.7 R-XSlit による計測

前節で述べたことは、入射光線と反射光線から得られる BRDF の角度パラメータ $\theta = (\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ は X-Slit の回転角 ϑ に依存していることを示している。そのため、 ϑ を変化させながら観測を行えば、BRDF のサンプル数が増えることを意味している。ここで、回転角 ϑ に対して観測されるサンプル点 θ の集合を S_ϑ であるとし、これら全ての和集合を $S = \cup_{\vartheta=\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n} S_\vartheta$ とする。ここで、 n は回転させる回数とする。

なお、仮に $s_1 = s_2$ で 2 本のスリットを表す直線が交点を持つ場合、X-Slit 射影モデルはピンホールモデルに相当する (図6)。ここで (a) のように $(d_1, d_2) = (0, 0)$ の場合、ピンホールが z 軸上に存在し z 軸の周りに ϑ 回転させても、式 (8) が ϑ に依存しないため光線のサンプル数は増加しない。一方で、(b) のように $(d_1, d_2) \neq (0, 0)$ の場合、ピンホールであっても ϑ に依存するため光線のサンプル数が増えることがわかる。

3. シミュレーションによる評価

3.1 BRDF 計測におけるサンプル点の分布

カメラ側の X-Slit の内部パラメータ $(s_1^c, s_2^c, d_1^c, d_2^c, \vartheta_1^c, \vartheta_2^c, \varphi_1^c, \varphi_2^c)$ 、光源側の X-Slit の内部パラメータ $(s_1^l, s_2^l, d_1^l, d_2^l, \vartheta_1^l, \vartheta_2^l, \varphi_1^l, \varphi_2^l)$ 、外部パラメータ $(R_{co}, R_{ol}, \mathbf{t}_{co}, \mathbf{t}_{cl})$ を既知とする。実際には、図5の右図のように簡単な場合においてシミュレーションを行い、内部パラメータと外部パラメータは表1に記した。またセンサのサイズ $(2u_{max}, 2v_{max})$ を用いることで、画角 (field of view) は水平スリットと垂直スリットでそれぞれ $\theta_{fov_h} = \arctan(v_{max}/s_2)$ 、 $\theta_{fov_v} = \arctan(u_{max}/s_1)$ と計算される。ここで、 $(u_{max}, v_{max}) = (10, 10)$ と固定し、センサの解像度は 16×16 とする。 (s_1, s_2) は画角 $(\theta_{fov_h}, \theta_{fov_v})$ を変える可変なパラメータである。 $\vartheta_c = 0^\circ, 10^\circ, \dots, 90^\circ$ 、 $\vartheta_l = 0^\circ$ として特殊な R-XSlit モデルにおいて BRDF 計測を行う。

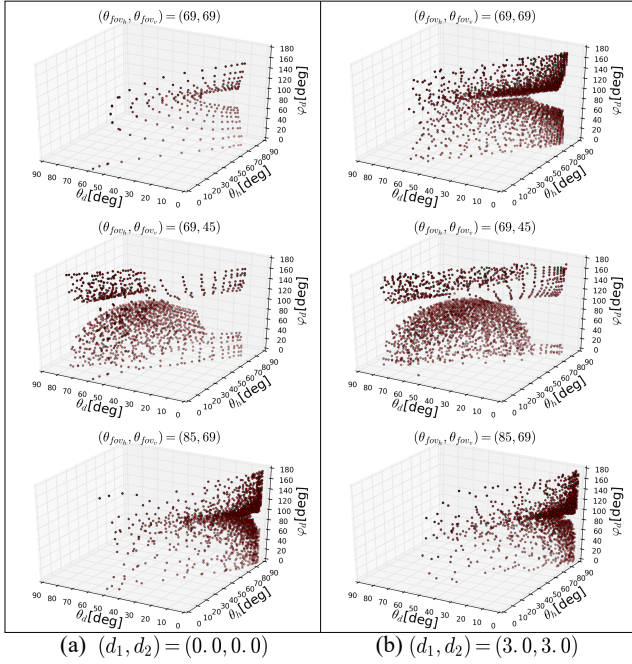


図7 パラメータ空間 $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ における分布

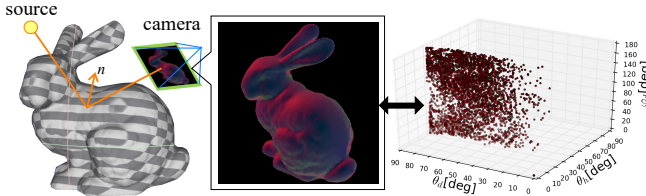


図8 評価に用いる CG のレンダリング環境

特に、図6の(a): $(d_1, d_2) = (0, 0)$ と(b): $(d_1, d_2) = (3, 3)$ の場合について、3つの画角の組み合わせに対するシミュレーションを行ったところ、パラメータ空間 $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ における分布は図7のようになった。1行目の画角の組み合わせ $(69, 69)$ はピンホール $(\theta_{fov_h} = \theta_{fov_v})$ であり、回転軸上にある(a)と比べ、回転軸上にない(b)はサンプル点が多いことがわかる。2行目と3行目の画角の組み合わせはいずれも X-Slit $(\theta_{fov_h} \neq \theta_{fov_v})$ であるが、2行目では広く分布するのに対し、3行目は密に分布するという違いが見られる。

この分布の広がり相違によって、実際にシーンをレンダリングする際の再現性にどのような影響を及ぼすのかについて、次節で定量的な評価を行うことで明らかにする。

3.2 定量的評価

シミュレーションにより計測されるサンプル点を用いることで、図8に示すレンダリング画像を再現できるかどうかについて評価する。つまり、あるシーンを完全に再現できる場合を真値として評価を行う。具体的にはレンダリング画像上の各画素 (u, v) に対して真値 θ' が得られ、図中のレンダリング画像の (r, g, b) はそれぞれ $(\phi_d, \theta_d, \theta_h)$ に対応している。サンプル点 θ の真値 θ' に対する誤差は

$$E(u, v) = \min_{\theta \in S} \|\theta - \theta'(u, v)\| \quad (15)$$

として与えられる。なお、この誤差は画角の組み合わせやレン

ダリング環境の光源位置、そして使用する 3D モデルの形状などの要因に依存するため、これらの要因を変えた場合の結果を図9に示す。異なる光源位置・異なる 3D モデルの場合でも、結果の特性に差異は見られるが、特に画角の変化による誤差の変化について考察する。

レンダリング画像内の物体領域 B 内の N 画素分の平均を

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{(u,v) \in B} E(u, v) \quad (16)$$

とし、画角 $(\theta_{fov_h}, \theta_{fov_v})$ の変化に対する誤差平均 μ を求めた結果を図10に示す。ただし、レンダリング環境の光源位置や使用する 3D モデルは図9の (L1), (A) の場合とした。図10の(a): $(d_1, d_2) = (0, 0)$ では、X-Slit $(\theta_{fov_h} \neq \theta_{fov_v})$ のときの誤差平均がピンホール $(\theta_{fov_h} = \theta_{fov_v})$ よりも小さいことを示しているが、これは前節の図7のサンプル点の分布からもわかるように、ピンホールによるサンプル数が X-Slit より少ないためであると考えられる。一方の(b): $(d_1, d_2) = (3, 3)$ では、 $(\theta_{fov_h} = \theta_{fov_v})$ のとき、図7のサンプル点の分布からもわかるように、サンプル数は増えることから(a)と比べて誤差平均が小さくなっていることがわかる。

また $(d_1, d_2) = (0, 0), (3, 3)$ のいずれの場合においても誤差平均が最小値となるのは $\theta_{fov_v} = 45^\circ$ のときである。これはスリットが対象物体に最接近する特異点だからである。そこでスリットが特異な位置にない $\theta_{fov_v} > 45^\circ$ の場合における、各 θ_{fov_v} に対する最小の誤差平均 μ_{min} とそのときの θ_{fov_h} について調べることとし、その結果を図11に示す。 $(d_1, d_2) = (0, 0), (3, 3)$ のいずれの場合においても、 θ_{fov_v} が小さくなると μ_{min} は減少する傾向にあり、画角は小さい方がシーンの再現性が高いことがわかる。また、画角が大きい $\theta_{fov_v} > 55^\circ$ の場合には緑の直線で示すピンホールとし、画角が小さい $\theta_{fov_v} < 55^\circ$ の場合には X-Slit とする方が再現性が高くなること示されており、大域的には画角 θ_{fov_v} を小さくし、X-Slit $(\theta_{fov_h} \neq \theta_{fov_v})$ とすることでシーンの再現性が高くなる。

4. 結論と今後の課題

本論文では、BRDF 計測を入射光線と反射光線をサンプリングする問題として捉え、X-Slit と呼ばれる 2 本のスリットを光源側とセンサ側の両方に備えた装置による広域な BRDF 計測方法を提案した。シミュレーションでは、X-Slit の画角を変化させることにより広域な BRDF 計測となる可能性があり、シーンの再現性を高めることが可能であることを定量的評価により示した。

今後の課題として、X-Slit の内部パラメータである φ など considering した場合に、さらに広域な BRDF 計測が可能かどうか調査する必要がある。また、X-Slit による BRDF 計測システムを実装するにあたり、有限の開口を考慮したシリンダカルレンズを設計する必要がある [11] ことも課題として挙げられる。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP25240027, JP15H05918(新学術領

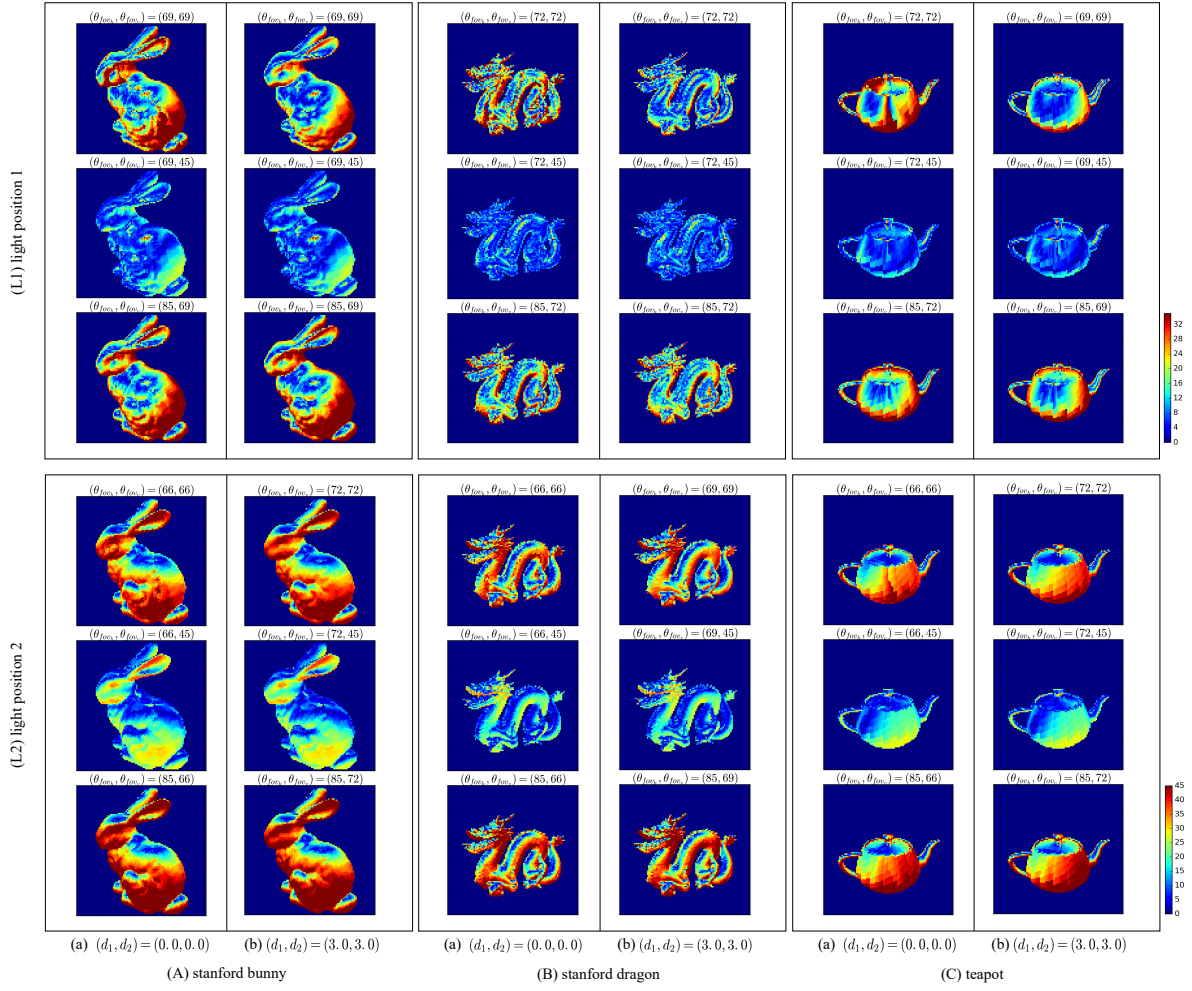


図 9 シーンを完全に再現できる場合に対する誤差

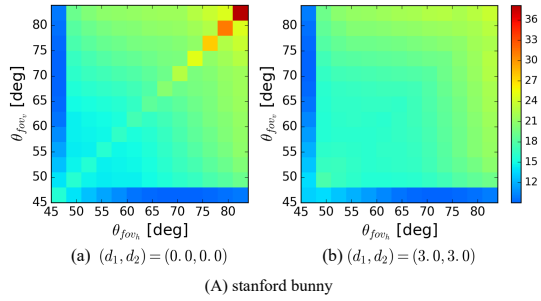


図 10 X-Slit の画角変化に対する誤差平均

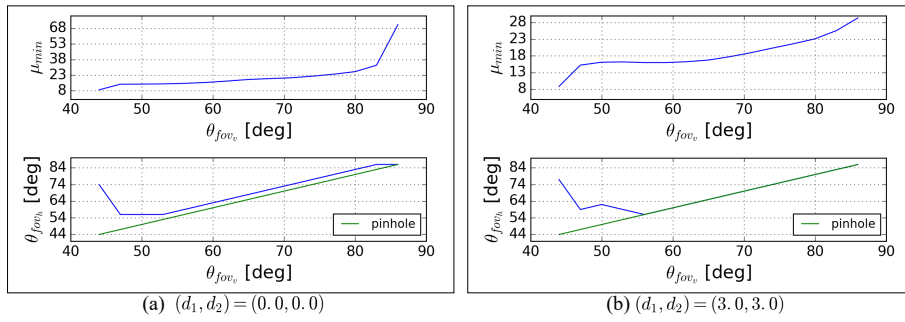


図 11 各 θ_{fov_v} に対する最小の誤差平均 μ_{min} とそのときの θ_{fov_h}

域「多元質感知」)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] <https://illum.lytro.com>.
- [2] D. Feldman, A. Zomet, S. Peleg, and D. Weinshall. Video synthesis made simple with the x-slits projection. In *Proc. of WMVC*, pages 195–200, 2002.
- [3] Doron Feldman, Tomáš Pajdla, and Daphna Weinshall. On the epipolar geometry of the crossed-slits projection. In *ICCV*, 2003.
- [4] Nianyi Li, Haiting Lin, Bilin Sun, Mingyuan Zhou, and Jingyi Yu. Rotational crossed-slit light field. In *Proc. of CVPR*, June 2016.
- [5] Steve Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. Lafor-tune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. In *Rendering Techniques*, 1999.
- [6] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matthew Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Trans. Graph.*, 22:759–769, 2003.
- [7] Ren Ng, Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz, and Pat Hanrahan. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. In *CSTR*, 2005.
- [8] Tomáš Pajdla. Geometry of two-slit camera. 2002.
- [9] Szymon Rusinkiewicz. A new change of variables for efficient BRDF representation. In *Proc. of EGWR*, June 1998.
- [10] Vaibhav Vaish, Bennett Wilburn, Neel Joshi, and Marc Levoy. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays. In *Proc. of CVPR*, 2004.
- [11] Jinwei Ye, Yu Ji, Wei Yang, and Jingyi Yu. Depth-of-field and coded aperture imaging on xslit lens. In *Proc. of ECCV*, pages 753–766, 2014.
- [12] Jinwei Ye, Yu Ji, and Jingyi Yu. A rotational stereo model based on xslit imaging. In *Proc. of ICCV*, pages 489–496, 2013.
- [13] Assaf Zomet, Doron Feldman, Shmuel Peleg, and Daphna Weinshall. Mosaicing new views: The crossed-slits projection. *TPAMI*, 25(6):741–754, 2003.