

X-Slit を用いた光線群サンプリングによる効率的な BRDF 計測

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情報科学研究科 〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地 5

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

概要: コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスでは、ピンホールモデルなどの投影中心の存在するモデルを用いることが多い。しかし、これらの光線は投影中心に拘束されるため自由度が低い。対して X-Slit と呼ばれるねじれの関係にある 2 本のスリットを通る光線を定義することにより高自由度の射影を実現できる。本論文では目的に応じた光線のサンプリングについて述べ、特に BRDF 計測に適用した場合の結果を示す。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。

キーワード: 光線空間, X-Slit 射影モデル, BRDF

1. はじめに

コンピュータビジョン (CV) やコンピュータグラフィックス (CG) では通常、人間の眼や撮影過程をピンホールモデルとしてシンプルに取り扱うことが多い。一方で、画像を取得するのではなく光線そのものをサンプリングをしたい場合などでは、これらの光線は投影中心に拘束されるため自由度が低く、多様に光線をサンプリングできるとは限らない。近年、光線空間を取得するカメラが市販されている [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 [9]、マイクロレンズを用いた方法 [6]、X-Slit と呼ばれる 2 本のスリットを用いた方法 [4] などがあるが、中でも X-Slit カメラは他の手法に比べ自由度が高い射影を実現できる。

この X-Slit について、X-Slit 射影モデルを定義したもの [3, 7, 12] やエピソード幾何について述べたもの [3]、画像のモザイク技術 [12]、符号化撮像技術 [10]、光線空間を用いたリフォーカス技術 [4] などに応用したものが報告されているが、我々は新たに双方向反射率分布関数 BRDF (Bi-directional Distribution Function) [5] の計測に適用することを考える。

本論文では、X-Slit のパラメータを変えることで効率的に BRDF 計測ができる可能性について言及する。ピンホールは X-Slit の特殊なケースであり、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

図 1 のように、ピンホールモデルでは光線が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 本のスリット上を光線が通過する。ピンホールカメラと X-Slit カメラで撮影される画像は図 2 のようになる。図 2(a) はピンホールモデル、(b) と (c) は X-Slit モデルによって撮影される画像を生成した CG であり、特に (b) と (c) は人間の眼による見え方とは異なる。図 2(b) は図 1 のように水平垂直のスリットによ

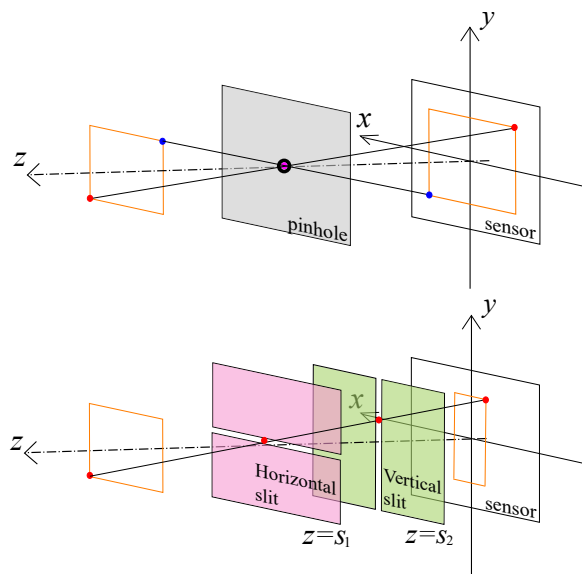


図 1 ピンホールモデルと X-Slit モデル

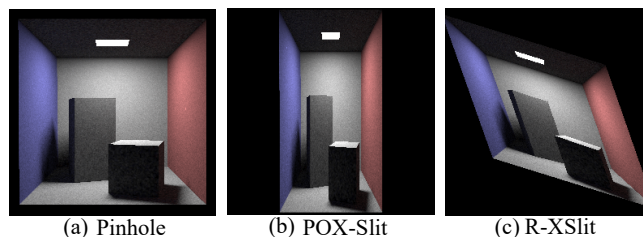


図 2 各カメラモデルに基づいた CG

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 2(c) は (b) のスリットを図 1 の z 軸の周りに回転させた場合の投影の結果である。X-Slit の 2 つ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る。

2.2 BRDF 計測

BRDF は、物体表面上のある点における任意の照明方向から

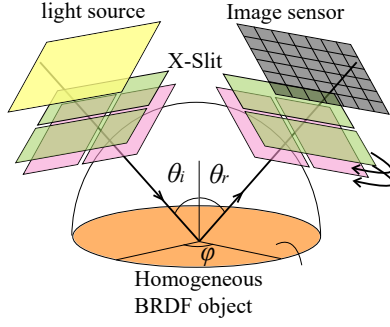


図3 BRDF 計測システム

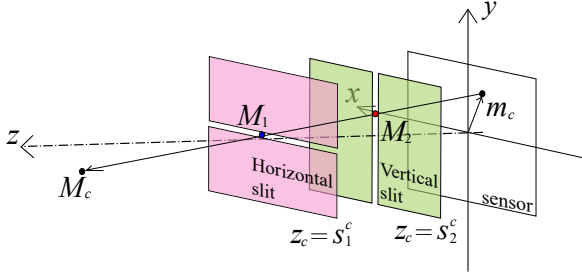


図4 POX-Slit カメラモデル

の入射光に対する任意の観測方向への反射率を表す双方向反射率分布関数であり、その計測には角度の膨大な組み合わせを必要とする。そのため効率的な BRDF 計測手法が提案されているが、[5] ではピンホールモデルが仮定されており、BRDF が物体表面で一様であるとき、センサ上の各画素分だけ角度の組み合わせを取得できる。そこで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より効率的な BRDF 計測となるのではないかと考え、その X-Slit を用いた BRDF 計測の概略図を図 3 に示す。本論文では [5] と同様に BRDF が物体表面で一様であることを前提とする。

2.3 X-Slit の内部パラメータ

図 3 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。ここでステレオカメラのようにカメラ座標と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、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座標 $M_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ は 2 本のスリット上を通りセンサ上に投影される。ここでセンサ平面は $z_c = 0$ で表すものとする。図 4 に示す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、図 1 の下図や図 2(b) に対応する [2]。さらに図 5 のように水平スリットと垂直スリットはそれぞれ z_c -軸と d_1^c と d_2^c だけ隔てていると仮定し、回転角 $\vartheta_1^c, \vartheta_1^c$ と $\vartheta_2^c, \vartheta_2^c$ を用いて各スリットを表現する直線が一般化される。

同様に、光源座標における三次元点 $M_l = (x_l, y_l, z_l)^T$ は光源のある平面上のある点 $m_l = (u_l, v_l, 0)^T$ に投影され、それぞれのスリットは距離のパラメータ d_1^l, s_1^l と d_2^l, s_2^l で定義され、加えて回転角 $\vartheta_1^l, \vartheta_1^l$ と $\vartheta_2^l, \vartheta_2^l$ により一般化される。

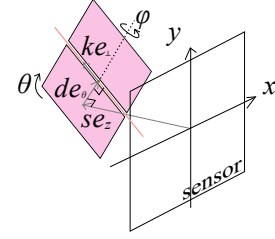


図5 内部パラメータ

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 (拡張ベクトル) \mathbf{a} を用いてセンサ面上あるいは光源面上の \mathbf{m} に投影され

$$\begin{aligned} M &= (M)_z \mathbf{a} + \mathbf{m}, \\ \mathbf{a} &= (p, q, 1)^T \end{aligned} \quad (1)$$

($)_z$ は第三成分を表す。 M_1 と M_2 はそれぞれ水平スリットと垂直スリットの直線上の点であるとし、以下の式で表される。

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

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

2.3 で述べたように、X-Slit の一般的な射影モデルを考える。三次元空間における直線は一般に 4 つのパラメータを用いて記述できる。図 5 において、スリットの直線と \mathbf{e}_z は z 軸 ($\mathbf{e}_z = (0, 0, 1)^T$) 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、 \mathbf{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 \mathbf{e}_ϑ 軸周りの回転角を φ と定義する。このとき、2 本の直線上の点は以下の方程式で表すことができる。

$$\begin{aligned} M_1 &= s_1 \mathbf{e}_z + d_1 \mathbf{e}_{\vartheta_1} + k_1 M(\mathbf{e}_{\perp 1}, \mathbf{e}_{\vartheta_1}, \varphi_1) \\ &= \begin{bmatrix} d_1 \sin \vartheta_1 - k_1 \cos \vartheta_1 \\ d_1 \cos \vartheta_1 + k_1 \sin \vartheta_1 \\ s_1 + \sin \varphi_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= s_2 \mathbf{e}_z + d_2 \mathbf{e}_{\vartheta_2} + k_2 M(\mathbf{e}_{\perp 2}, \mathbf{e}_{\vartheta_2}, \varphi_2) \\ &= \begin{bmatrix} d_2 \cos \vartheta_2 + k_2 \sin \vartheta_2 \\ -d_2 \sin \vartheta_2 + k_2 \cos \vartheta_2 \\ s_2 + \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで k_1 と k_2 は直線上の移動量を表す定数である。また M はロドリゲスの回転式でありベクトル \mathbf{v} を軸 \mathbf{k} の周りに角 α だけ回転させる作用を持ち、以下の式で表現される。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{rot} &= (I + \sin \alpha [\mathbf{l}]_{\times} + (1 - \cos \alpha) [\mathbf{l}]_{\times}^2) \mathbf{v} \\ &= M(\mathbf{v}, \mathbf{l}, \alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 I は単位行列であり、 $[\mathbf{l}]_{\times}$ は \mathbf{l} の各成分により構成される 3×3 の歪対称行列である。

ここで、式 (4) と (5) は 5 つのパラメータ ($s, d, k, \vartheta, \varphi$) で表されており、スリットの直線は k を除いた 4 つのパラメータを用いて表され、これらを 1 本のスリットの内部パラメータと定

義する.

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-XSlit (Rotational X-Slit) と呼ばれ, 図 2(c) に対応する [4, 11]. このとき式 (4) と式 (5) は以下のようなになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= s_1 \mathbf{e}_z + d_1 \mathbf{e}_{\vartheta_1} + k_1 \mathbf{e}_{\perp 1} \\ &= \begin{bmatrix} d_1 \sin \vartheta - k_1 \cos \vartheta \\ d_1 \cos \vartheta + k_1 \sin \vartheta \\ s_1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_2 &= s_2 \mathbf{e}_z + d_2 \mathbf{e}_{\vartheta_2} + k_2 \mathbf{e}_{\perp 2} \\ &= \begin{bmatrix} d_2 \cos \vartheta + k_2 \sin \vartheta \\ -d_2 \sin \vartheta + k_2 \cos \vartheta \\ s_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで式 (2), (3), (7), (8) から k_1 と k_2 が得られる.

$$k_1 = -\frac{s_1}{s_2} d_2 - \left(1 - \frac{s_1}{s_2}\right) (u \cos \vartheta - v \sin \vartheta), \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{s_2}{s_1} d_1 + \left(1 - \frac{s_2}{s_1}\right) (u \sin \vartheta + v \cos \vartheta) \quad (10)$$

この k_1 と k_2 を式 (7) と (8) に代入することで \mathbf{M}_1 と \mathbf{M}_2 が内部パラメータのみで表現される. さらに式 (2)(あるいは式 (3)) から方向ベクトル \mathbf{a} が求まる.

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{M}_1 - \mathbf{m}}{(\mathbf{M}_1)_z} = A(\mathbf{m} + \mathbf{e}_z) \quad (11)$$

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.

$$\begin{aligned} A_{11} &= -\frac{1}{s_1} \sin^2 \vartheta - \frac{1}{s_2} \cos^2 \vartheta \\ A_{12} &= \left(\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1}\right) \sin \vartheta \cos \vartheta \\ A_{13} &= \frac{d_1}{s_1} \sin \vartheta + \frac{d_2}{s_2} \cos \vartheta \\ A_{21} &= A_{12} \\ A_{22} &= -\frac{1}{s_1} \cos^2 \vartheta - \frac{1}{s_2} \sin^2 \vartheta \\ A_{23} &= \frac{d_1}{s_1} \cos \vartheta - \frac{d_2}{s_2} \sin \vartheta \\ A_{31} &= 0 \\ A_{32} &= 0 \\ A_{33} &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

以降, A_c を X-Slit 側の射影変換, A_l を光源側の射影変換として既知のものであるとする.

仮に 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. さらにこのピンホールが z 軸上に存在する場合, z 軸の周りに ϑ 回転させても, 式 (11) が ϑ に依存しないため計測数は増加しない.

2.5 外部パラメータ

簡単のため計測対象の物体を平面であると仮定する. 図 6 は外部パラメータを表している. カメラ座標系における物体平面

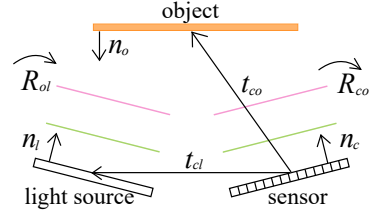


図 6 外部パラメータ

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} で表される.

$$\mathbf{n}_o = -R_{co} \mathbf{n}_c \quad (13)$$

また面光源の法線ベクトル \mathbf{n}_d は物体平面から面光源への回転行列 R_{ol} を用いることで得られる.

$$\mathbf{n}_l = -R_{ol} \mathbf{n}_o = R_{ol} R_{co} \mathbf{n}_c \quad (14)$$

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,

$$\mathbf{n}_o^\top (\mathbf{M}_c - \mathbf{t}_{co}) = 0 \quad (15)$$

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), (15), (12) によって各画素 \mathbf{m}_c について計算され,

$$(\mathbf{M}_c)_z = \frac{\mathbf{n}_o^\top (\mathbf{t}_{co} - \mathbf{m}_c)}{\mathbf{n}_o^\top A_c (\mathbf{m}_c + \mathbf{n}_c)} \quad (16)$$

となる. \mathbf{M}_c に対応する, 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.

$$\mathbf{M}_l = (R_{ol} R_{co})^{-1} (\mathbf{M}_c - \mathbf{t}_{cl}) \quad (17)$$

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 (12) の内部パラメータ行列 A_l を用いて,

$$\mathbf{M}_l = (\mathbf{M}_l)_z A_l (\mathbf{m}_l + \mathbf{n}_l) + \mathbf{m}_l \quad (18)$$

と導け, この式から \mathbf{m}_l が求められる.

$$\mathbf{m}_l = -\mathbf{n}_l + ((\mathbf{M}_l)_z A_l + I)^{-1} (\mathbf{M}_l + \mathbf{n}_l) \quad (19)$$

ここで, $(\mathbf{M}_l)_z A_l + I$ は正則であるとする. この \mathbf{m}_l と式 (11) から方向ベクトル \mathbf{a}_l が得られる.

以上で, ある画素 \mathbf{m}_c と X-Slit を通過する光線の方向ベクトル \mathbf{a}_c とその点と光源側の X-Slit を通過する光線の方向ベクトル \mathbf{a}_l を, X-Slit の内部パラメータ行列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 $\boldsymbol{\omega}_i$ と反射

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}	t_{co}	t_{cl}
$(0, 0)$	$(0, 0)$	I	I	$\begin{bmatrix} -10 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -20 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

光線 ω_r は

$$\omega_i = \frac{-R_{co}^{-1} \mathbf{a}_c}{\| -R_{co}^{-1} \mathbf{a}_c \|}, \quad (20)$$

$$\omega_r = \frac{-R_{ol} \mathbf{a}_l}{\| -R_{ol} \mathbf{a}_l \|}$$

として正規化される．ここで、 $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ という BRDF を表す角度のパラメータ空間は以下のように Rusinkiewicz 座標を用いて定義される [8]．

$$\mathbf{h} = \frac{\omega_i + \omega_r}{\| \omega_i + \omega_r \|}$$

$$\mathbf{b}_o = (0, 1, 0)^\top$$

$$\theta_h = \arccos(\mathbf{h})_z$$

$$\phi_h = \arctan \frac{(\mathbf{h})_y}{(\mathbf{h})_x} \quad (21)$$

$$\mathbf{d} = M(M(\omega_i, \mathbf{n}_o, -\phi_h), \mathbf{b}_o, -\theta_h)$$

$$\theta_d = \arccos(\mathbf{d})_z$$

$$\phi_d = \arctan \frac{(\mathbf{d})_y}{(\mathbf{d})_x}$$

2.7 R-XSliit による計測

2.3 で述べたように、ピンホールが回転軸である z 軸上になれば X-Sliit を回転させることによって $\theta = (\theta_h, \theta_d, \phi_d)$ の観測数を増やすことが可能である．ここで、回転角 ϑ に対して観測される θ の集合を S_ϑ であるとし、これら全ての和集合を S とする．

$$S = \cup_{\vartheta=\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n} S_\vartheta \quad (22)$$

なお、 n は回転させる回数とする．

3. シミュレーションによる評価

カメラの X-Sliit の内部パラメータ $(s_1^c, s_2^c, d_1^c, d_2^c, \vartheta_1^c, \vartheta_2^c, \varphi_1^c, \varphi_2^c)$ 、光源の X-Sliit 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 $(R_{co}, R_{ol}, t_{co}, t_{cl})$ を既知であるとする．実際には、図 7 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 (s_1, s_2) は画角 (FoV_h, 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-XSliit モデルにおいて BRDF 計測を行う．また (d_1, d_2) は $(0, 0)$ と $(3, 3)$ の場合について行う．

画角は水平スリットと垂直スリットでそれぞれ FoV_h 、 FoV_v と定義され、センサのサイズ $(2u_{max}, 2v_{max})$ によって以下の

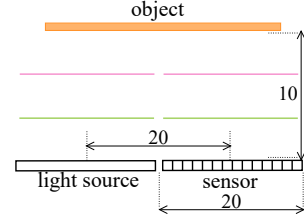


図 7 シミュレーションの設定値

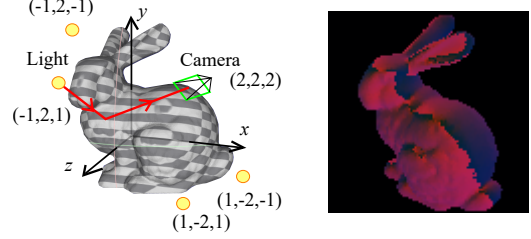


図 8 評価に用いる CG のレンダリング環境

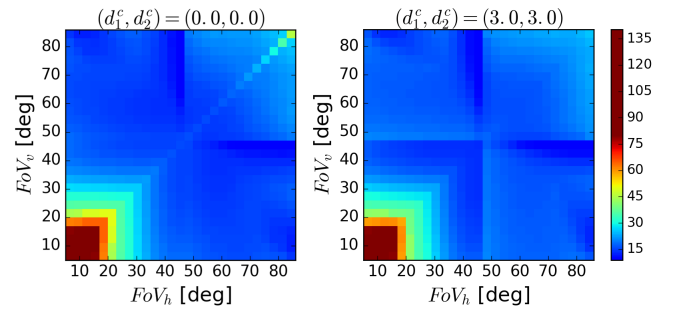


図 9 距離誤差の平均値

ように計算される．

$$FoV_h = \arctan \frac{v_{max}}{s_2}$$

$$FoV_v = \arctan \frac{u_{max}}{s_1} \quad (23)$$

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．得られる S を評価するために、図 8 に示すレンダリング画像を用いる．レンダリング画像上の各画素 (u, v) に対して θ' が得られ、図 8 の右図の (r, g, b) はそれぞれ $(\phi_d, \theta_d, \theta_h)$ に対応している．このときの距離の誤差を

$$E(u, v) = \min_{\theta \in S} \|\theta - \theta'(u, v)\| \quad (24)$$

とする．また、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

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{(u, v) \in B} E(u, v) \quad (25)$$

として、BRDF を評価する．

後述するシミュレーション環境は図 8 のある一つの光源位置を用いたものとなっているが他の光源位置によってシミュレーション結果に大きく影響しないため、以下ではある一つの光源位置による結果となっている．

図 9 は画角 (FoV_h, FoV_v) の変化に対する平均値 μ を求め

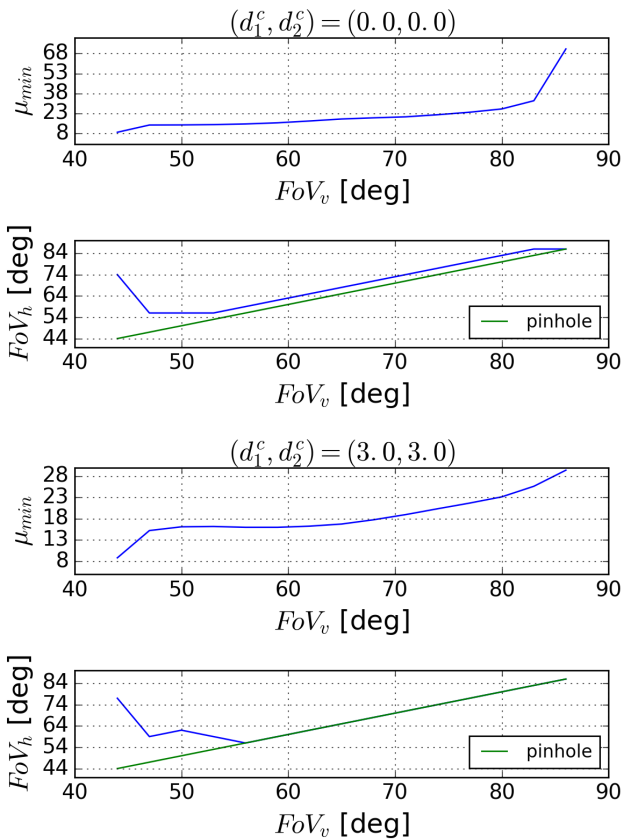


図 10 各 FoV_v に対する最小の平均値 μ_{min} とそのときの FoV_h

た結果を示している。図 9 の左図は $(d_1, d_2) = (0, 0)$ の場合の結果を示す。X-Slit ($FoV_h \neq FoV_v$) のときの平均値がピンホール ($FoV_h = FoV_v$) よりも小さいことを示しているが、これは 2.3 で述べたように、ピンホールが回転軸である z_c 軸上に存在するため、観測数が X-Slit より少ないためである。また、 $(d_1, d_2) = (3, 3)$ の場合の結果を図 9 の右図に示す。 $(FoV_h = FoV_v)$ のとき、ピンホールが回転軸上にないため観測数は増え $(d_1, d_2) = (0, 0)$ の場合と比べて平均値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平均値が最小値となるのは $FoV_v = 45^\circ$ のときである。これはスリットが対象物体に最接近するからであり、実装するのは困難である。そのため $FoV_v > 45^\circ$ の場合における、各 FoV_v に対する最小の平均値 μ_{min} とそのときの FoV_h について調べたものが図 10 になる。 $(d_1, d_2) = (0, 0), (3, 3)$ のいずれの場合においても μ_{min} は FoV_v に対して図示した定義域において単調増加であり、 $FoV_v = 50^\circ$ のとき最小となる FoV_h は $(d_1, d_2) = (0, 0), (3, 3)$ のそれぞれの場合において、 $FoV_v = 56^\circ, 62^\circ$ となり、X-Slit の方がピンホールのときよりも良い結果を得ていると言える。ただし、画角が大きい $FoV_v > 55^\circ$ の場合には緑の直線に示すように X-Slit とピンホールは平均値が漸近する結果を得た。

4. 結論と今後の課題

人間の眼似た性質を持つピンホールカメラによる撮影では光線を多様にサンプリングできるとは限らない。そこで光線その

もののサンプリングについて述べ、特に X-Slit という 2 本のスリットを用いた高自由度の射影による光線サンプリングを BRDF 計測に適用した。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効率的な BRDF が可能だと示唆した。しかし、X-Slit の内部パラメータである φ などを考慮した場合に、さらに効率的な BRDF 計測が可能になるかどうかなど調査する必要がある。

今後の課題として、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 [10]。また、入射方向と反射方向を対応付けるための手法についても、光源をパターン光としたアクティブステレオを用いるなど、検討していく予定である。

5. 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP25240027, JP15H05918(新学術領域「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. Lafortune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. In *Rendering Techniques*, 1999.
- [6] 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.
- [7] Tomáš Pajdla. Geometry of two-slit camera. 2002.
- [8] Szymon Rusinkiewicz. A new change of variables for efficient BRDF representation. In *Proc. of EGWR*, June 1998.
- [9] Vaibhav Vaish, Bennett Wilburn, Neel Joshi, and Marc Levoy. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays. In *Proc. of CVPR*, 2004.
- [10] 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.

- [11] Jinwei Ye, Yu Ji, and Jingyi Yu. A rotational stereo model based on xslit imaging. In *Proc. of ICCV*, pages 489–496, 2013.
- [12] Assaf Zomet, Doron Feldman, Shmuel Peleg, and Daphna Weinshall. Mosaicing new views: The crossed-slits projection. *TPAMI*, 25(6):741–754, 2003.