

高精細BTF撮影のためのティルトカメラの開発

山根 孝太¹ 日浦 慎作^{1,a)}

概要: CGによる実物体の質感再現が様々な分野で求められているが、布や革など複雑な質感を持つ物体の高精度な再現は困難であり、それを実現するために様々な手法が提案されている。その一つが双方向テクスチャ関数 (Bidirectional Texture Functions: BTF) と呼ばれるもので、素材表面の反射に関する情報をカメラで撮影することにより取得することが出来る。しかし、この手法では測定対象の素材 (被写体) を傾けて撮影するため、対象全体がカメラの被写界深度内に収まらないことや、レンズの絞りを絞ることによって生じる解像度の低下が再現精度を低下させてしまう。そのため本研究では、撮像素子と被写体が平行でない場合でもレンズの絞りを絞ることなくピントが合った画像を撮影出来る手法であるティルト撮影を利用する。BTF計測装置の動きに合わせて自動的に2軸のティルト撮影を行う装置を開発し、それをを用いたティルト撮影が従来の撮影方法に対してどの程度、解像度の低下を抑制することができるかを検証した。

1. はじめに

ゲームや映画、VRなどでは、実物のCG再現の正確性が強く求められるようになってきている。また、工業製品の外觀設計や衣類等のインターネット販売等でもCGが用いられることが増加しており、使用される素材等の実物体の質感を計測し、それをを用いて物体を再現する技術の重要性が増している。しかし、世の中には布や革、石材のように光の反射や透過、表面の凹凸による微細な影などの特性によって複雑な質感を有する物体も存在しており、それらの質感を反射モデル等の数式で表現することや、そのパラメータを求めることは難しい。そこでこれらの物体の再現における精度を向上させるために、これまで様々な質感計測の手法が提案されてきた。本研究では、それらの手法の一つである双方向テクスチャ関数 (Bidirectional Texture Functions: 以下 BTF と呼称) の計測をより高精細化する手法について述べる。

BTFとは素材表面の光の反射に関する情報を、光源方位 (素材と光源とのなす角)、観測方位 (素材と観測カメラとのなす角)、素材表面の位置 (座標) の6自由度を引数として取得し、戻り値として画素値を出力する仮想的な関数である。実際のBTF撮影では、素材に対して様々なカメラ方向、光源方向から撮影を行って画像を取得する。画像の再現時には、必要な光源方位・観測方位・位置に関する画素値を取り出し、補間して利用する。BTFによるモデル化を行えば、複雑な質感の特徴を持った素材でも、高精細

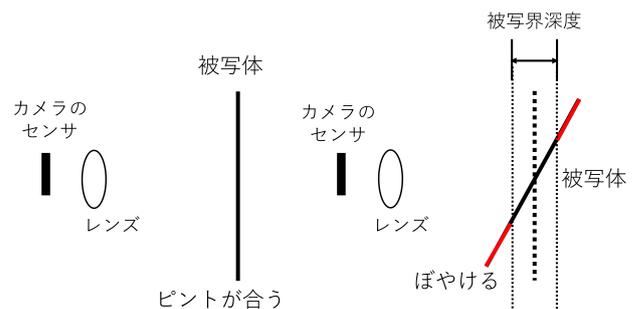


図 1: BTF取得の解像度における課題。(左) 計測対象がカメラに対して傾いてない場合、全ての面にピントが合うので、高い解像度を得られる。(右) 計測対象が傾くと、ピントが合わない場所があるので、解像度が低下してしまう

な質感再現を行うことが出来る。

このBTFにおける質感のモデル化において、BTF撮影時の画像の解像度の低下が問題になることがある。BTFの計測時には、素材に対して様々な観測方位から撮影を行う。よって、平面的な素材を斜めから撮影することになり、素材全体がレンズの被写界深度内に収まらないことがある。例えば素材の中央にピントを合わせた場合、その点より近い点や遠い点にはピントが合わず、画像の解像度が低下する (図 1)。高精細な質感再現を行いたい場合や、大量の画像を用いて機械学習を行いたい場合などに、この解像度の低下が問題となる。

この課題を改善する方法としてレンズの絞りを絞る方法が考えられる。レンズを絞ると被写界深度が深くなり、被写体全体にピントが合った画像を撮影することが出来る。

¹ 兵庫県立大学

^{a)} hiura@eng.u-hyogo.ac.jp

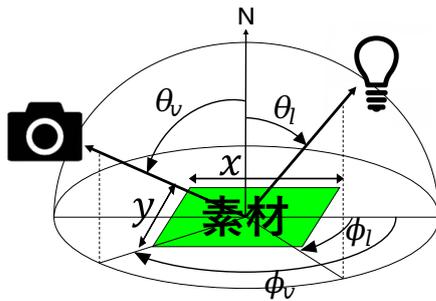


図 2: BTF の模式図

しかし、レンズを絞るとレンズに入射する光量が減少し、同一の露光量を得るためには露光時間が長くなってしまふ。またレンズの口径（開口数）が小さくなると回折現象により撮影画像の解像度が低下する。近年の画像センサの高精細化に伴い、回折現象は無視できない影響を生じるようになってきている。

以上から、高精細な BTF 撮影のためには、カメラに対して平面の被写体が傾いている状態でもレンズを絞らずにピントが合った画像を撮影することが望ましい。そこで、本研究ではシャインフリュークの法則 [1] の考え方を利用した 2 軸のティルトカメラを BTF 計測に利用する手法を提案する。BTF 計測装置における被写体の姿勢に応じてティルトカメラのティルト角を自動制御して BTF 撮影を行い、通常の方法で撮影した場合と解像度を比較することで有効性を確認する。

2. 関連研究

Dana らによって提案された双方向テクスチャ関数 (BTF)[2] は図 2 に示すように、素材表面に関する情報を光源方位 (θ_l, ϕ_l), 観測方位 (θ_v, ϕ_v), 素材表面の座標 (x, y) で表される 6 つのパラメータ ($x, y, \theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v$) を引数とし、それに対する画素値を戻り値とする関数によって素材の反射特性を取得する。BTF を用いることにより、素材内部の微小な光の相互作用や相互反射、自己影などの非局所的な効果を高精度にモデル化することが出来る [3]。

これまで、高精度な BTF 取得のために様々な研究が行われてきた。その内の一つが Havran[3] らが提案した手法である。彼らの装置では図 3 に示すように、レンズに対し撮像素子を傾けて装着し、シャインフリュークの法則により対象物体全体にピントを合わせている。しかしこのティルト角が固定されているため、図 4 に示すようにカメラを天頂角方向に動かすことができる構造でありながら 6 台のカメラを要している。

そこで本研究ではモーターによりティルト角を制御できるカメラを開発し、BTF 計測装置と連動させることで常に被写体面に合焦させることができる手法を提案する。

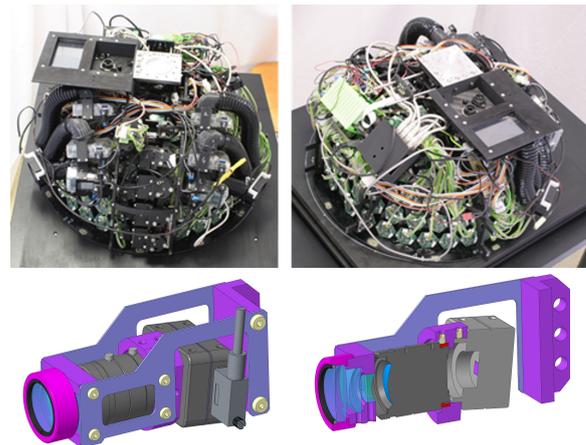


図 3: Havran らの BTF 計測装置と、搭載されているカメラモジュールの例 [3]

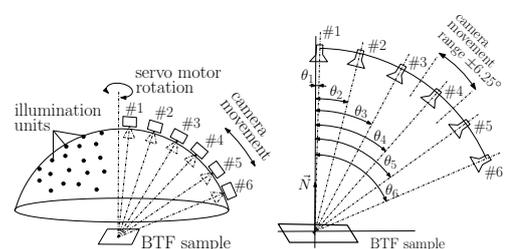


図 4: Havran らが提案した BTF 取得の模式図 [3]

3. 提案手法

高精細な BTF 取得のための撮影手法として、本研究ではティルト撮影により合焦点の傾きを変化させる手法を提案する。

3.1 シャインフリュークの法則

ティルト撮影は、シャインフリュークの法則に基づいて撮影を行う手法である。シャインフリュークの法則とは図 5 に示すように、平面上の被写体が光軸に対して垂直でない場合であってもそのレンズによる像は再び平面となり、さらに被写体面と像面の交線はレンズが置かれた面（レンズ主面）の上に乗るという法則である [1]。すなわち、被写体がレンズに対して傾いている場合、その被写体の像に一致するようにカメラの撮像素子を傾けて配置すれば、傾いた被写体に対してピントが合った画像を撮影することが出来る。

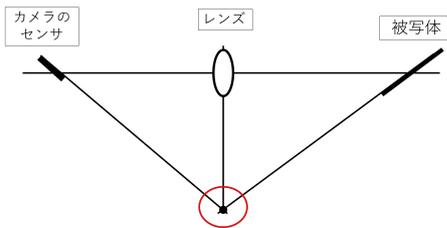


図 5: シャインフリュークの法則



図 6: BTF 撮影のための 2 軸ティルトカメラ

3.2 2軸ティルトカメラ

本研究では、BTF 取得時に自動的にティルト撮影することができるティルトカメラを開発した。装置の外観を図 6 に示す。この装置では 2 つの回転軸がレンズ光軸上で交差するよう、横方向ステージ（横軸周りのティルトのためのステージ）に円弧状のレールを持つゴニオステージを用い、その上の縦方向ステージ（縦軸周りのスイングのためのステージ）として通常の回転ステージを用いた。ステージとレンズの間に可動領域を設けるため、レンズマウントはバックフォーカスの長い一眼レフカメラ用のマウント（ニコン F マウント）を用い、レンズとして Carl Zeiss Makro Planar T* ZF.2 50mm F2 を用いた。

このカメラと組み合わせる BTF 計測装置を図 7 に示す。この装置は 4 つの可動軸を有している。光源は鉛直軸 1 軸周りに回転し、これにより固定設置されたカメラと光源のなす角を変化させることができる。測定対象（素材）は 3 軸のステージに搭載されており、法線の方位角・仰角と、素材の法線周りの回転を行うことができる。これによりあらゆる BTF 撮影に必要なあらゆる角度からの撮影を行うことができる。また、ステージには円弧状のレールを用いることにより、どのような条件でもステージにより素材がカメラや光源から隠されることがない。BTF 計測装置に 2 軸ティルトカメラを組み合わせると BTF を計測する様子を図 8 に示す。

3.3 ティルト角の計算

開発したティルトカメラおよび BTF 計測装置は各部の回転角を正確に制御することができるため、BTF 計測装置が設定した被写体の傾き角からシャインフリュークの法

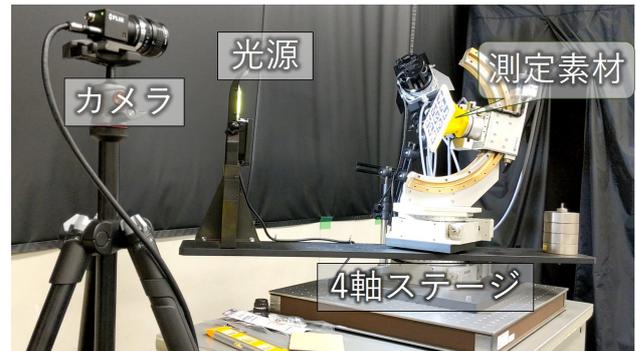


図 7: BTF 計測装置

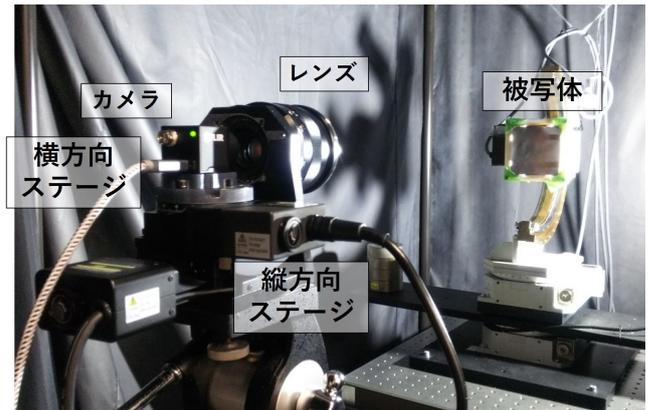


図 8: ティルトカメラを用いた BTF 取得装置の外観

則に基づき撮像素子のティルト角を求めることが出来れば、ティルト撮影を行うことが可能である。ティルトカメラの 2 つの回転軸とレンズの光軸は撮像素子の中心に一致しているため、画像の中心でピントを合わせておけば、ティルトによりその点のピントがずれることはない。そこでここでは、ティルト角を求める手法を示す。

まず、図 9 に示すようにレンズ光軸が z 軸となるよう各軸を定義する。ここで、図 9 では撮像素子と被写体面がシャインフリュークの法則を満たしているものとする。また a はレンズから被写体までの距離、 b はレンズから撮像素子（被写体の像）までの距離であり、レンズの焦点距離を f とするとレンズの公式から

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

が成り立つ。また、図 9 中の点 O, P はそれぞれ撮像素子と被写体の中心を表すこととし、軸の定義からそれぞれの座標は $O(0, 0, 0)$, $P(0, 0, a + b)$ となる。さらに、被写体と撮像素子の法線ベクトルをそれぞれ $\mathbf{n}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, $\mathbf{n}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ とおく。

これらの関係を用いて、シャインフリュークの法則が成立するティルト角を求める。一般に、点 (x_c, y_c, z_c) を通り、法線ベクトルが $\mathbf{n} = (a, b, c)$ の平面の方程式は

$$a(x - x_c) + b(y - y_c) + c(z - z_c) = 0 \quad (2)$$

と表される。これに撮像素子上の点 $P(0, 0, a + b)$ と法線ベ

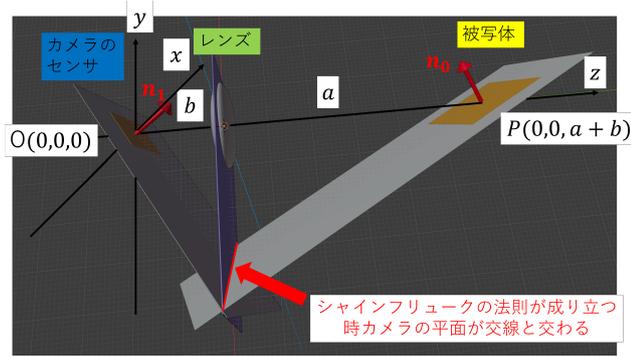


図 9: カメラにおける傾き角の計算方法

クトル \mathbf{n}_0 を代入すると

$$x_0x + y_0y + z_0(z - (a + b)) = 0 \quad (3)$$

が得られる。また、図 9 よりレンズ主面の方程式は $z = b$ であるから、これを式 (3) に代入すると図 9 中の交線 (赤線) の方程式が

$$x_0x + y_0y - az_0 = 0 \quad (4)$$

のように得られる。同様に、撮像素子を含む平面の方程式は

$$x_1x + y_1y + z_1z = 0 \quad (5)$$

であり、これに $z = b$ を代入すると

$$x_1x + y_1y + z_1b = 0 \quad (6)$$

が得られる。式 (4) と式 (6) は同一の交線、つまり恒等的に等しい式であるため、これらの各係数を比較すると、撮像素子の法線ベクトル $\mathbf{n}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ は $(bx_0, by_0, -az_0)$ に平行なベクトルであることがわかる。さらに $|\mathbf{n}_1| = 1$ とすると、

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{bx_0}{\sqrt{(bx_0)^2 + (by_0)^2 + (az_0)^2}} \\ y_1 &= \frac{by_0}{\sqrt{(bx_0)^2 + (by_0)^2 + (az_0)^2}} \\ z_1 &= \frac{-az_0}{\sqrt{(bx_0)^2 + (by_0)^2 + (az_0)^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

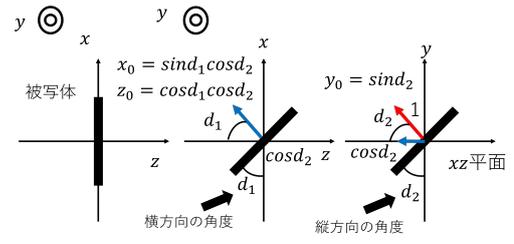
となる。

次に、図 10(a) に示すように被写体の横方向の傾き角 (法線の方位角) を d_1 、縦方向の傾き角 (法線の仰角) を d_2 とする。また、図 10(b) のように撮像素子の横方向と縦方向のティルト角をそれぞれ t_1, t_2 とおく。すると、被写体及び撮像素子の法線ベクトルはそれぞれ

$$\mathbf{n}_0 = (\sin d_1 \cos d_2, \sin d_2, \cos d_1 \cos d_2) \quad (8)$$

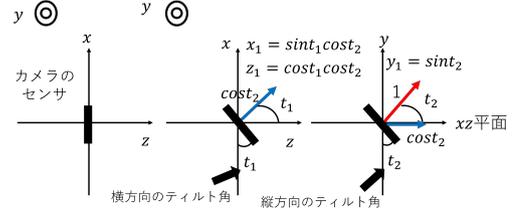
$$\mathbf{n}_1 = (\sin t_1 \cos t_2, \sin t_2, \cos t_1 \cos t_2) \quad (9)$$

と表される。式 (7) 中の x_0, y_0, z_0 は式 (8) より求められ、



$$\mathbf{n}_0 = (x_0, y_0, z_0) = (\sin d_1 \cos d_2, \sin d_2, \cos d_1 \cos d_2)$$

(a) 被写体の傾き角と法線ベクトル



$$\mathbf{n}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (\sin t_1 \cos t_2, \sin t_2, \cos t_1 \cos t_2)$$

(b) カメラの傾き角と法線ベクトル

図 10: 被写体・カメラの傾き角と法線ベクトルの関係



(a) 横縞

(b) 縦縞

図 11: 撮影に用いた被写体

a, b についても BTF 計測装置からカメラまでの距離と式 (1) のレンズの公式から求めることができる。

最後に、撮像素子の法線ベクトル $\mathbf{n}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ から式 (9) を用いてカメラのティルト角 t_1, t_2 を求める。それにはまず

$$t_2 = \sin^{-1} y_1 \quad (10)$$

により t_2 を求める。これを用いて $r = \cos t_2$ を求めると t_1 は

$$t_1 = \sin^{-1} \frac{x_1}{r} = \cos^{-1} \frac{z_1}{r} \quad (11)$$

で求められる。

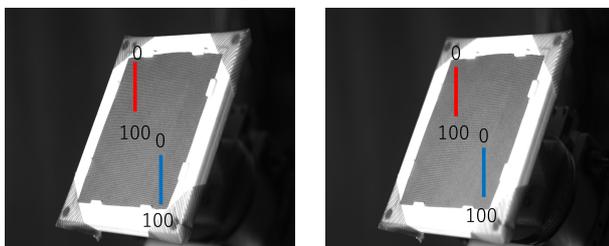
以上から、BTF 撮影装置の制御情報から取得した被写体の角度 d_1, d_2 からティルト角 t_1, t_2 を求めることができる。

4. 実験結果

BTF 計測時にティルトを行うことによる画質の向上効果を実験により評価する。評価に用いる対象物体を図 11 に示す。高空間周波数領域におけるコントラストを用いて評価を行うため、対象物体には高精細な縞模様を印刷した紙を用いた。

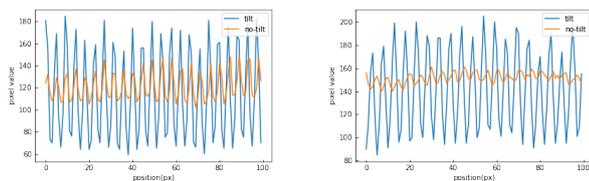
4.1 撮影画像と解析結果

様々な条件で評価を行った中から、ここでは被写体を横方向に 45° 、縦方向に 30° 傾けた場合について、ティルトを用いて撮影した画像とティルトを用いずに撮影した画像をそれぞれ図 12 に示す。また、図 12 中の左上 (赤)・右下 (青) の線分に沿って抽出した画素値の変化を図 13 に示す。ただし、用いた撮像素子は Bayer 配列のカラーフィルタを備えているため、この影響を避けるために RAW 画像から画素値を 1 つ飛ばして抽出した。この時の被写体とレンズの距離は $a = 0.82\text{m}$ であり、レンズの焦点距離は 50mm 、絞りは $f=2$ (開放) であった。被写体は細かい縞模様状であるため、画素値のグラフにおける振幅が大きいほどピントが合っており、高コントラストの画像であるということが出来る。図 13 より、ティルト撮影を用いた画像の方が振幅が大きく、より高コントラストな画像を撮影することが出来たことが分かる。



(a) ティルトあり (b) ティルトなし

図 12: 被写体を方位 45° 、仰角 30° に回転させたときの撮影画像



(a) 画像の左上 (赤線) (b) 画像の右下 (青線)

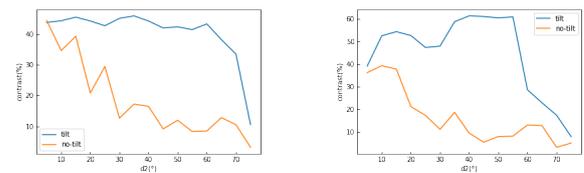
図 13: 図 12 中の直線上の画素値の分布

4.2 対象の傾き角に対する解像度の変化

被写体における縦方向の傾き角 (仰角) d_2 を 0° から 75° まで変化させた時のコントラストをティルトあり、ティルトなしでそれぞれ撮影し評価した。被写体とレンズの距離は $a = 0.82\text{m}$ 、レンズの焦点距離は 50mm 、絞りは $f=2$ (開放) である。横軸に被写体の仰角 d_2 、縦軸に画素値のコントラストをとったグラフを図 14 に示す。ここでコントラストとは、振幅を輝度で正規化した値のことである [4]。この実験ではカメラの露出値を変化させていないため、振幅値 A を最大値 255 で割った値であるとした。振幅値 A の計算には正弦波の波形の性質を利用し、画素値の標準偏差

の $2\sqrt{2}$ 倍を振幅とした。対象物体を縦に回転させているため、ティルトなしの場合は画像の上下でピントが合わなくなる。よって画像の上部と下部で評価を行った。図 14(a) が画像の上部、図 14(b) が画像の下部で求めた値である。

図 14 から、傾き角 d_2 が小さい時はティルトありとティルトなしどちらの場合もコントラストが高く、高い解像度を持っていることが分かる。しかし、 d_2 が大きくなるとティルトなしの場合はコントラストが減少する一方で、ティルトありの場合はコントラストの低下が抑制されていることが分かる。



(a) 画像の上側 (b) 画像の下側

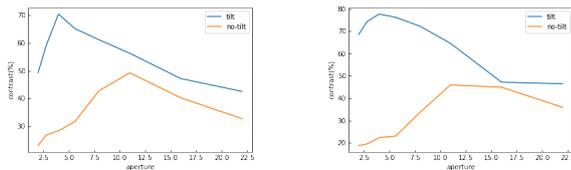
図 14: 被写体の仰角 d_2 に対するコントラスト変化

4.3 レンズの絞り値に対する解像度の変化

被写体の横方向の傾き (方位角) を $d_1 = 50^\circ$ で一定にして、レンズの絞りを $f=2$ (開放) から徐々に絞っていき $f=22$ (最小絞り) まで絞った時のコントラスト変化をティルトあり、ティルトなしでそれぞれ調べた。横軸にレンズの絞り値 f 、縦軸にコントラストをとったグラフを図 15 に示す。図 15(a) が画像の左側、図 15(b) が画像の右側を表している。この時の被写体とレンズの距離は $a = 0.82\text{m}$ であり、レンズの焦点距離は 50mm 、算出したティルトカメラの撮像素子の傾き角は横方向に $t_1 = 4.42^\circ$ であった。

図 15 から、ティルトなしの場合、絞り値 f が小さい時はコントラストが低く、絞っていくと被写界深度が深くなることで徐々に解像度が高くなるのがわかる。しかし、絞り値が $f=10$ 前後から小絞りによる回折現象によりコントラストが低下していることが分かる。一方、ティルトありの場合は絞りが開いている (f が小さい) 時からコントラストが高く、絞りを絞っていくとティルトなしと同様にコントラストが減少していくことが分かる。また、その場合でも依然としてティルトありのほうが高コントラストとなっている。ただし絞り開放時はコントラストが若干低下しており、これはレンズ自身の収差によるものと考えられる。

以上の結果から、被写界深度を深くするために絞りを絞ると回折現象によりコントラストが低下するため、必ずしも高コントラストな像を得ることが出来ないこと、およびティルトを行うことでより絞りを開いた状態で高コントラストな画像を撮影することが出来ることが分かる。



(a) 画像の左側

(b) 画像の右側

図 15: レンズの絞りを变化させた時のコントラスト

5. まとめ

本研究では、高精細 BTF 撮影のために傾いた被写体を高解像度で撮影することが出来るティルト撮影を提案した。実験結果より、ティルト撮影は傾いた被写体を撮影する際により高解像度・高コントラストな撮影が可能であることが分かった。ただし、ティルトカメラを用いた撮影でも被写界深度自身は浅く、被写体とカメラのずれにより解像度が低下しやすい。今後の課題として、焦点距離や装置の取付誤差などのパラメータを画像処理により自動的に取得・補正することが考えられる。

参考文献

- [1] 日浦慎作. コンピュータショナルフォトグラフィ理解のための光学系入門. 情報処理学会 CVIM-171-13, Vol. 2010, No. 13, pp. 1-12, 2010.
- [2] Kristin J. Dana, Bram van Ginneken, Shree K. Nayar, and Jan J. Koenderink. Reflectance and texture of real world surfaces. *ACM Transactions on Graphics*. 18 (1): 1-34, 1999.
- [3] Vlastimil Havran, J Hošek, Š Němcová, and J Čáp. Increasing the spatial resolution of btf measurement with scheidpflug imaging. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 38, pp. 592-609. Wiley Online Library, 2019.
- [4] 松阪喜幸. デジタル画像処理 [改訂第二版]. 公益財団法人画像情報教育振興協会 (CG-ARTS), 2020.