

適応的サンプリングによる 双方向テクスチャ関数取得の効率化

泥 祐介^{1,a)} 山本 悠一郎^{1,b)} 日浦 慎作^{1,c)}

概要: 布・革・木目など複雑な質感をもつ物体は、その見た目を CG により正確に再現することは容易ではない。これらの物体では光の反射や透過に加え、表面下散乱、表面の凹凸による微細な影など、複雑な現象が重なっているためである。そこでこのような物体の再現方法として、双方向テクスチャ関数 (Bidirectional Texture Functions: 以下 BTF) を用いる手法が提案されている。しかしカメラを用いて BTF をサンプリングする場合、長時間を要する上、データ量も膨大になるという問題がある。そこで本研究では、物体の反射特性に応じてサンプリング点を適応的に配置することで必要な画像数を絞り、効率的に BTF を取得する手法を提案する。

1. はじめに

ゲームに映画、広告、VR や AR、さらには文化遺産のデジタル保存など、物体の質感を計測・再現する技術は、様々な分野で求められており、また活かされている。しかし、布や革、肌、木目など複雑な質感をもつ物体は、その見た目を CG により正確に再現することは容易ではない。これらの物体では光の反射や透過に加え、表面下散乱、表面の凹凸による微細な影など、複雑な光学現象が重なっているため、反射特性を精密にモデル化するのが簡単ではないからである。そこで、そのような物体の再現方法として、BTF を用いる手法が提案されている。

BTF とは図 1 のような光源方位 (θ_l, ϕ_l)、観測方位 (θ_v, ϕ_v)、素材表面の座標 (x, y) の合計 6 自由度 ($x, y, \theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v$) の入力に対し、対応する画素値を出力する関数で、Dana らによって提案された概念である [1]。実際には、素材に対して観測方向、光源方向を様々に変化させて撮影した画像群で、CG での物体再現時には、照明条件と物体の形状に合わせて適切な画像を選択し、画像間を補間することで、物体の反射特性を精密にモデル化することなく、実物体により近い質感の CG を再現できる。

しかし、BTF を用いた計測とレンダリングにもデータ量の膨大さに起因する問題がある。例えば光源方位、観測方位を各 5° おきの間隔で測定した場合、1,682,209 枚の画像を取得しなければならない。これには 1 秒に 1 枚の画像

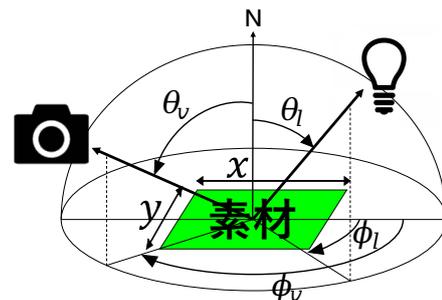


図 1: BTF の概要図。光源方位 (θ_l, ϕ_l)、観測方位 (θ_v, ϕ_v)、素材表面の座標 (x, y) の合計 6 自由度の関数として表される。

の取得で 19 日と約 11 時間という長時間を要するという問題が発生する。また、これらの画像を保存するためのデータ容量も膨大となり、レンダリングにも時間を要してしまう。従来、測定時間の長さに関する問題に対しては、複数のカメラや光源を用いて測定を高速化する手法 [4]、データ量が膨大になるという問題に対しては、取得後の BTF データを圧縮する手法 [2][3] などが取られてきた。しかし、BTF の複雑さや冗長性は物体依存性や方位依存性が高く、あらゆる物体に対し同様かつ均等にサンプリングすることは効率的ではない。例えば光沢のある物体では、光沢が観測される方位では高い方位分解能が必要である一方で、それ以外の方位では拡散反射物体と同様にほとんど見えの変化がない。また、光沢が鋭いほど高い方位分解能を要する一方で、それが必要となる領域は小さくなる。そこで本研究では、物体の反射特性に応じてサンプル点を適応的に配置することで必要な画像数を絞り、効率的に BTF を取得

¹ 兵庫県立大学

a) yus.doro@gmail.com

b) ei20s030@steng.u-hyogo.ac.jp

c) hiura@eng.u-hyogo.ac.jp

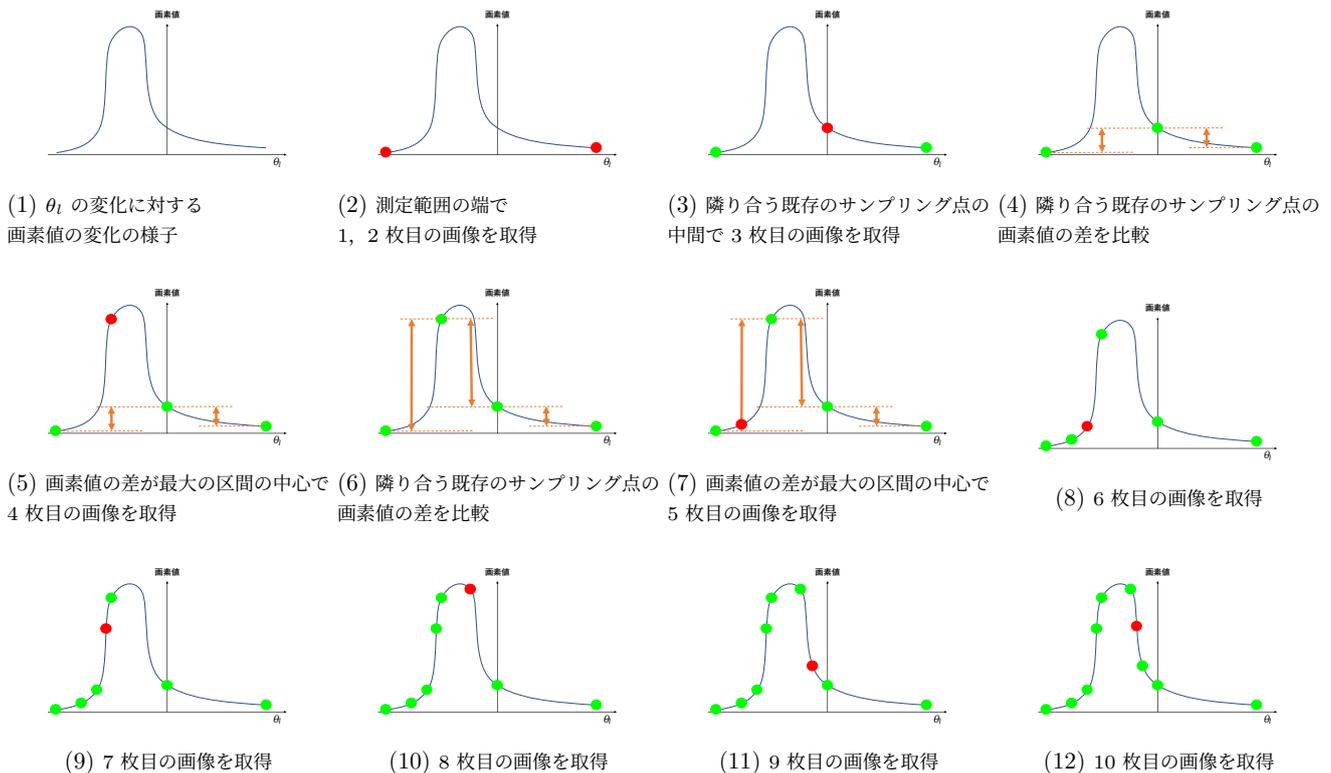


図 2: BTF の適応的サンプリングの例. 青線は θ_l の変化に対する画素値の真値, 赤点を新たなサンプリング点, 緑の点を既存のサンプリング点とする. 測定条件として θ_l 以外のパラメータは固定, 画像取得枚数 $n = 10$ とする.

する手法を提案する.

2. BTF の適応的サンプリング

前述のとおり, 細かい角度でサンプリング数を増やすと, 多くの時間を要し, データ量も膨大になる. 一方, サンプリング数を減らせば原信号を表現することができなくなり, 質感の再現度が低下する. しかし, BTF はどの方位でも同じように変化しているとは限らない. 例えば, 鏡面反射のように輝度値が大きく変化する方位がごく一部に存在する一方で, 見え方がほとんど変化しない方位も存在する. そこで, 測定中に画像輝度の変化が大きいところは密に測定し, 変化が小さいところは疎に測定することで, データ量を少なくしながらも, 質感の再現度低下を小さくできると考えられる. 物体の反射特性に応じてサンプリング点を適応的に選択するこの手法を, BTF の適応的サンプリングと呼ぶ. 本研究で提案する BTF の適応的サンプリングのアルゴリズムは以下の通りである. また, この提案手法による画像取得の例を図 2 に示す.

- (i) 取得する画像枚数 n と, $(\theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v)$ の範囲を決める.
- (ii) 取得範囲の端に光源とカメラを移動して画像を取得する. (図 2(2))
- (iii) 取得した全画像のうち, 隣り合うサンプル間の画像

の差を求める. そしてその差が最大となる区間を求め, その区間の中間に光源とカメラを移動して新たな画像を取得する. (図 2(3)~図 2(12))

- (iv) 光源とカメラの角度分解能の上限に達するか, 取得した画像枚数が n に達するまで (iii) を繰り返す.

このアルゴリズムにより, 画像の輝度変化の大きいところを重点的にサンプリングした BTF が取得できる.

θ_l のみを変化させ, 取得する画像枚数 n を 10 と定めた場合の例を図 2 に示す. 図 2(2) はアルゴリズムの (ii), 図 2(3) から図 2(12) はアルゴリズムの (iii) に従って画像の取得を行っている. サンプリング終了後の図 2(12) を見ると, 画素値の変化が大きい中央より左手側にサンプル点が集中していることが分かる.

3. 実験方法と結果および考察

3.1 実験方法

BTF の測定には図 3 の 4 軸ステージを用いる. この装置ではカメラを固定し, 測定物の向きと光源の位置を変化させる. カメラは FLIR 社の BFS-U3-23S3C-C, 4 軸ステージは特注のもので, 1 軸 (パン) は可動域 $-90^\circ \sim +90^\circ$ (分解能 0.002°), 2 軸 (チルト) は可動域 $0^\circ \sim 90^\circ$ (分解能 0.001°), 3 軸 (ロール) は可動域 360° 無限回転 (分解能 0.002°), 4 軸 (光源) は可動域 360° 無限回転 (分解能 0.002°) のステージである. また, 画像は 512×512 画素, ビット深度 32bit

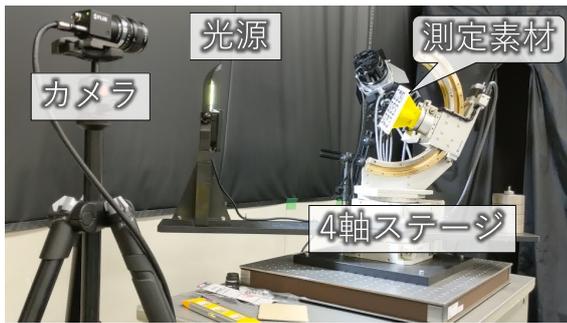
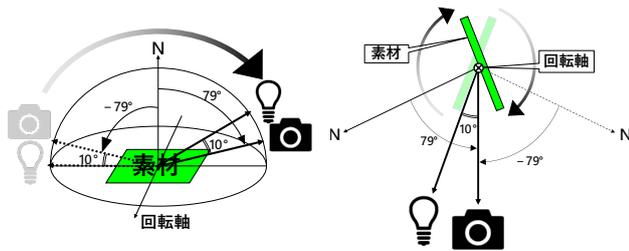


図 3: BTF 計測装置



(1) 素材を中心とした測定条件

(2) カメラを中心とした測定条件

図 4: BTF の測定条件. $\theta_l = \theta_v - 10$, $\phi_l = \phi_v = 0$, θ_v は -79° から 79° まで角度分解能の上限を 1° として変化

の HDR 撮影で取得する。

実験の測定条件として、光源とカメラのなす角を 10° に固定し、素材平面上にとった軸を中心に素材を回転させることとした。具体的な $(\theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v)$ の条件としては、 $\theta_l = \theta_v - 10$, $\phi_l = \phi_v = 0$, とし、 θ_v を -79° から 79° まで角度分解能の上限を 1° として変化させた。この測定条件を図示したものが図 4 である。

測定された BTF からは、円筒の形状にレンダリングした画像 (以下円筒状画像と言う) を生成した。円筒上の各点の法線は鉛直軸周りに回転しており、また光源とカメラのなす角は一定であるため、前述の条件で測定した BTF によって物体全体をレンダリングすることができる。測定条件の範囲で取得できる、全 159 枚の 1° 間隔の画像を用いて生成した円筒状画像を正解画像とする。また、提案法を用いて適応的にサンプリングした BTF と、それと同じサンプル数であるが等間隔にサンプリングした BTF から同様に円筒状画像を生成し、正解画像との類似度を SSIM (Structural SIMilarity[5]) により評価した。SSIM とは画像構造の類似度を 0 から 1 の値で表したもので、類似度が高いほど 1 に近い値となる。また、SSIM による客観的なスコアと人間の主観的なスコアには強い相関関係があるとされる。

3.2 実験結果

実験では、レジン 13 種類、金属 15 種類、布 15 種類の合計 53 種類の素材を測定対象として用いた。これらの素材に対し、提案手法である適応的サンプリングによって BTF を取得し、等間隔にサンプリングした BTF と比較した。

それらの中でも、まずは等間隔サンプリングに対し提案手法によるサンプル数の削減が顕著に表れた、図 5(1) に示す緑色のレジンを素材とした実験についてまとめる。

3.2.1 緑色のレジンについての実験結果

サンプル数を変化させたときの評価値 (SSIM) の変化を図 6 に示す。図 6 より、提案手法によってサンプリングした BTF の円筒状画像は、サンプル数が 20 前後から正解画像との SSIM が急激に 1 に近づいていることが確認できる。さらに等間隔のサンプリングと比較して、より少ないサンプル数でより高品質な画像を生成できていることが分かる。また、提案手法により、159 サンプルを必要とする画像を、30 サンプルほどで再現することができており、サンプル数を大幅に削減することができることも分かる。

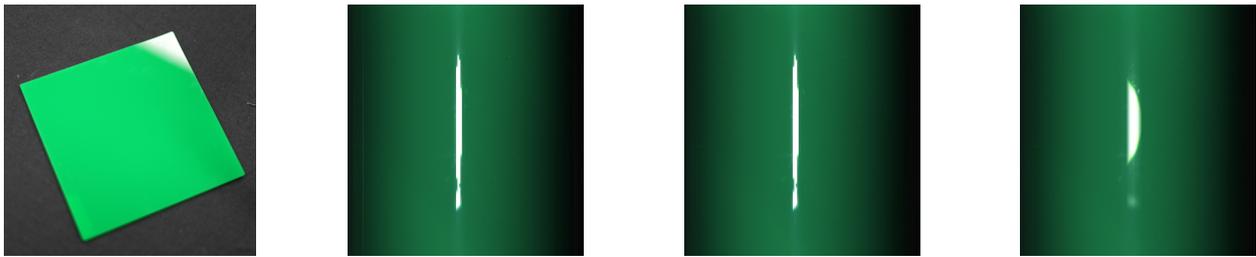
サンプル数が 30 のときの円筒状画像として、適応的サンプリングによるものを図 5(3) に、等間隔サンプリングによるものを図 5(4) に示す。また正解画像として、全 159 サンプルを用いて生成した円筒状画像を図 5(2) に示す。図 5(2) の正解画像と図 5(3) の SSIM の値は 0.999、正解画像と図 5(4) の SSIM の値は 0.969 となり、提案手法による図 5(3) が、等間隔サンプリングによる図 5(4) と比較して、正解画像との類似度が高いことが確認できる。

また、サンプル数を 30 としたときのサンプル点の配置と、各サンプル点における画像全体の平均輝度の関係を図 7 に示す。この図から、サンプル点は光沢により輝度が大きく変化する $\theta_v = 5$ の周辺に密に配置されたことが確認できる。なお、この $\theta_v = 5$ は $\theta_l = \theta_v - 10$ の条件下で $\theta_l = -\theta_v$ となり鏡面反射が起こる角度である。

3.2.2 全素材についての実験結果

測定対象とした 53 種類の素材について、観測方位 θ_v に対する輝度変化を図 8 に示す。横軸に θ_v 、縦軸に正規化した輝度として、レジン素材のものを図 8(1) に、金属素材のものを図 8(2) に、布素材のものを図 8(3) に示す。図 8 より、素材ごとにおおよその輝度変化の特徴があることが確認できる。レジン素材と金属素材の輝度は、いずれも θ_v の変化に対して、およそ 0° で急激に増加した後およそ 15° で急激に減少する。レジン素材と金属素材の違いは、レジン素材が θ_v が 0° , 15° で輝度変化の傾きが急激に変化するのに対し、金属素材は θ_v が 5° の周辺に近づくにつれ、徐々に傾きが変化している。布素材は、レジン素材と金属素材と比較して、 θ_v の変化に対し、輝度の変化が緩やかであるという特徴が見られる。図 8(3) より、多くの布素材は θ_v が 5° のときを最大値とするような輝度変化をするが、赤線で示している 2 素材 (黒のピロード、青のピロード) については θ_v が 80° に近づくにつれて、輝度が大きくなる変化をしている。

ここで全素材を、レジン、金属、ピロードを除く布、ピロードの 4 つに分類する。それぞれの分類で、図 6 と同様に横軸にサンプル数、縦軸には評価値 (SSIM) の平均とし



(1) 計測対象 (2) 全 159 サンプルング (3) 提案手法によるサンプルング (4) 等間隔サンプルング

図 5: 計測対象と円筒状にレンダリングした結果. (1) 計測対象の緑色のレジン (2) 測定範囲の全 159 サンプルから生成した正解画像となる円筒状画像 (3) 提案手法によって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.999)(4) 等間隔サンプルングによって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.969)

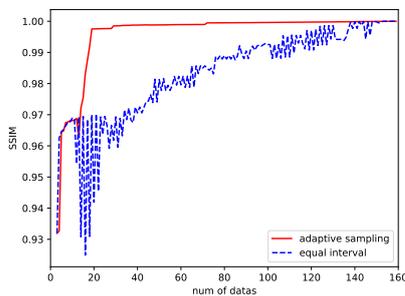


図 6: 緑色のレジンにおける, サンプル数と SSIM の関係. 実線が適応的サンプルング, 破線が等間隔サンプルングに対応する.

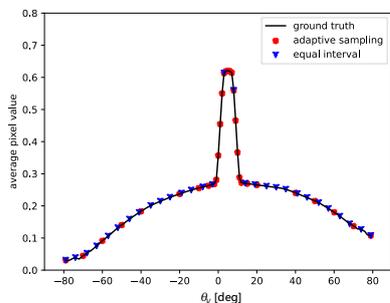


図 7: 緑色のレジンの BTF のサンプル分布

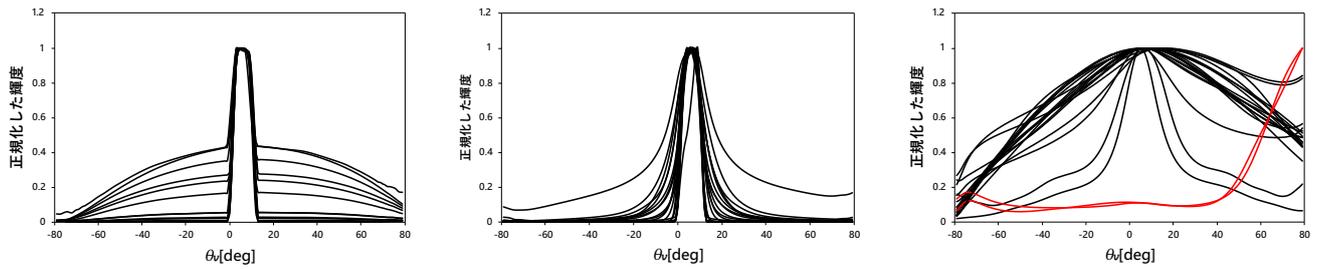
て, 提案手法である適応的サンプルングの結果を実線で, 等間隔サンプルングの結果を破線で示すと, それぞれ図 9(1), 図 9(2), 図 9(3), 図 9(4) となる. 図 9(1) より, レジン素材については図 6 に見られる緑色のレジンと同様の特性を持ち, 提案手法を用いることで, 等間隔のサンプルングよりも少ないサンプル数でより高品質な画像を生成できることが確認できる. 図 9(2), 図 9(3) より, 金属素材およびピロードを除く布素材については提案手法と等間隔サンプルングに大きな違いは見られないことが分かる. 図 9(4) より, ピロード素材については提案手法を用いると, 高品質な画像の生成には, 等間隔サンプルングよりも多くのサンプル数を要することが分かる.

3.3 考察

サンプル数の削減について, 金属, ピロードを除く布については, 提案手法と等間隔サンプルングが同等であった. またピロードについては提案手法のほうが劣ることが分かった. この理由について考察する.

金属, ピロードを除く布, ピロードを代表する素材として, それぞれ SUS 2B, ベージュ色のフリース, 黒のピロードを用いて考える. サンプル数を 30 とした時の SUS 2B, ベージュ色のフリース, 黒のピロードのサンプル点の配置と, 各サンプル点における画像全体の平均輝度の変化を表すと, それぞれ図 10(1), 図 10(2), 図 10(3) となる. また, SUS 2B, ベージュ色のフリース, 黒のピロードそれぞれについて, 正解画像となる全 159 サンプルを用いて生成した円筒状画像および, サンプル数を 30 としたときの提案手法と等間隔サンプルングを用いて取得した BTF の円筒状画像を図 11, 図 12, 図 13 に示す. 図 10(1) より, 金属のサンプル点は, 輝度が急激に変化する θ_v が 5° の周辺に密に存在することが確認できる. 図 10(2) より, 布は輝度変化が緩やかであるため, どこか特定の θ_v にサンプル点が集中していない様子が確認できる. 図 10(3) については, ピロードのサンプル点は, 輝度が急激に変化する θ_v が 60° より大きい領域に集中していることが分かる.

ベージュ色のフリースについては, 図 10(2) に見られるように, 提案手法と等間隔サンプルングで, サンプル点の配置があまり変わらないため, サンプル数の削減にも違いが見られないと考えられる. SUS 2B とピロードについては, 図 10(1), 図 10(3) に見られるように, アルゴリズム通りに提案手法のサンプル点の密度は変化しているが, SSIM による評価では, 提案手法は等間隔サンプルングと同等または提案手法の方が劣るという結果が出た. このようになった理由の 1 つとして, サンプル点が密になっていないところに類似度が高くなる要因があったと考えられる. 本研究の提案手法では, 画像全体の平均輝度の変化に着目しているため, 例えば金属なら小さな傷の見え方の変化などは, 平均輝度には反映されづらい. そのため, 平均輝度は



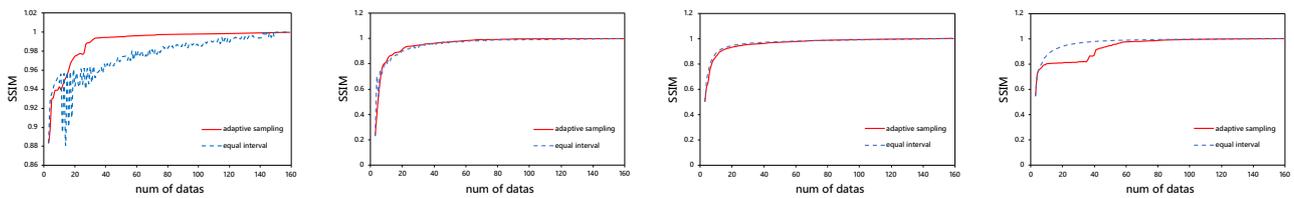
(1) レジン素材 13 種

(2) 金属素材 15 種

(3) 布素材 15 種

(黒, 青のピロードは赤線で表示)

図 8: 素材の法線に対する観測方向の角度 θ_v に対する輝度変化. $\theta_l = \theta_v - 10$, $\phi_l = \phi_v = 0$



(1) レジン素材
13 種

(2) 金属素材
15 種

(3) 布素材 (ピロードを除く)
13 種

(4) 布素材 (ピロードのみ)
2 種

図 9: サンプル数と円筒状画像の SSIM の平均値の関係

大きく変化しないが見た目は変化する, といった状況では, 今回の手法ではその特徴を逃してしまう. また, 図 10(3) のピロードのように, 一部でサンプル点が過密になり, θ_v が 0° 以下で 2 点しかサンプル点がなくなるといった場合も, サンプル点の間隔が広く, 見え方の変化の特徴を逃していると考えられる.

以上から改善の策として, 平均輝度ではなく見た目の特徴を評価する数値による, サンプル点の選択を実現することや, 今回の手法で初期サンプリング点が測定範囲の端であったのに対し, 初期条件として, ある程度等間隔にサンプリングすることなどが考えられる.

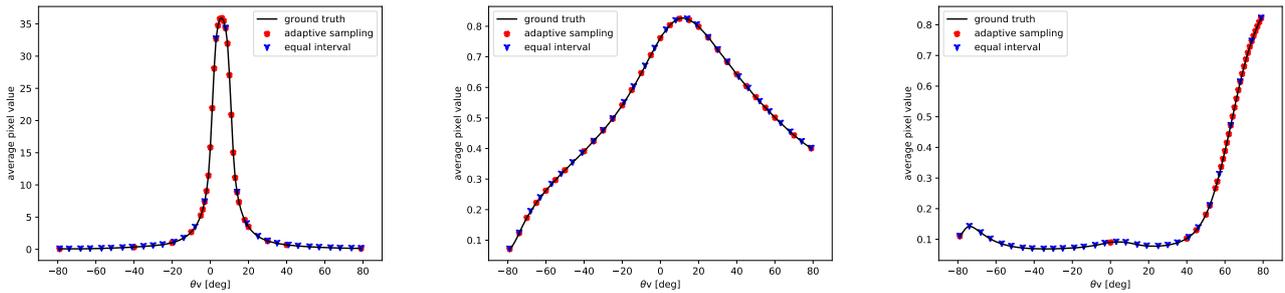
4. まとめ

本研究では BTF 取得時に, 画像の輝度変化が大きい方位を密に撮影する適応的サンプリング法を提案した. 実験結果より, レジンのような輝度変化の激しい素材に対しては, 輝度変化の大きい領域で密にサンプリングすることで, 有効にサンプル数を削減できることが確認できた. しかし, 布のような輝度変化の緩やかな素材に対してはサンプリング密度を変化させる効果に乏しく, 結果として等間隔サンプリングと同じようになることも確認できた. また金属や一部の布については, 輝度変化への影響が少ない見た目の変化を逃しているために, 提案手法が等間隔サンプリングと同等または提案手法の方が劣るという結果が出た. 今後の課題として, BTF の各変数のうち方位に関する 4 変数すべてについて適応的にサンプリングを行うアルゴリズム

の開発が挙げられる.

参考文献

- [1] Dana, K. J., Van Ginneken, B., Nayar, S. K. and Koenderink, J. J.: Reflectance and texture of real-world surfaces, *ACM Transactions On Graphics (TOG)*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–34 (1999).
- [2] Rainer, G., Jakob, W., Ghosh, A. and Weyrich, T.: Neural btf compression and interpolation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 38, No. 2, Wiley Online Library, pp. 235–244 (2019).
- [3] Ruiters, R. and Klein, R.: BTF compression via sparse tensor decomposition, *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, No. 4, Wiley Online Library, pp. 1181–1188 (2009).
- [4] Schwartz, C., Sarlette, R., Weinmann, M. and Klein, R.: DOME II: A Parallelized BTF Acquisition System., *Material Appearance Modeling*, Citeseer, pp. 25–31 (2013).
- [5] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R. and Simoncelli, E. P.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE transactions on image processing*, Vol. 13, No. 4, pp. 600–612 (2004).

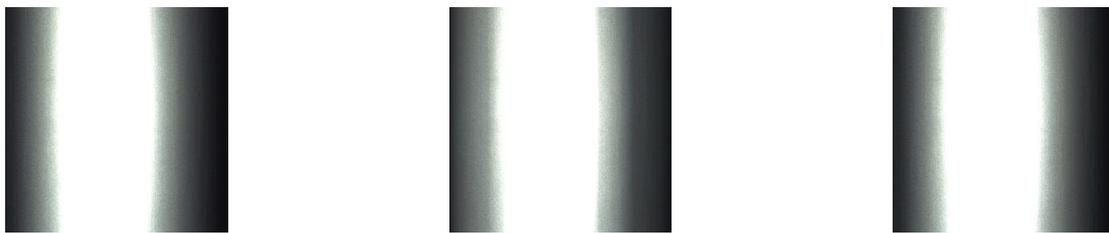


(1) SUS 2B(金属)

(2) ベージュ色のフリース (布)

(3) 黒のビロード (布)

図 10: BTF のサンプル分布 (サンプル数は 30)

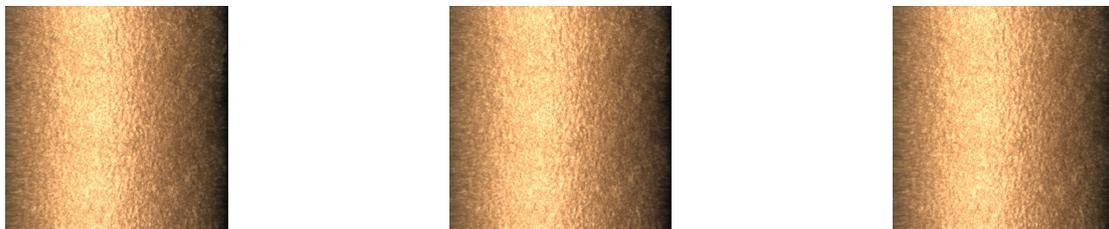


(1) 全 159 サンプリング

(2) 提案手法によるサンプリング

(3) 等間隔サンプリング

図 11: SUS 2B(金属) を円筒状にレンダリングした結果. (1) 測定範囲の全 159 サンプルから生成した正解画像となる円筒状画像 (2) 提案手法によって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.931)(3) 等間隔サンプリングによって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.925)



(1) 全 159 サンプリング

(2) 提案手法によるサンプリング

(3) 等間隔サンプリング

図 12: ベージュ色のフリース (布) を円筒状にレンダリングした結果. (1) 測定範囲の全 159 サンプルから生成した正解画像となる円筒状画像 (2) 提案手法によって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.976)(3) 等間隔サンプリングによって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.976)



(1) 全 159 サンプリング

(2) 提案手法によるサンプリング

(3) 等間隔サンプリング

図 13: 黒のビロード (布) を円筒状にレンダリングした結果. (1) 測定範囲の全 159 サンプルから生成した正解画像となる円筒状画像 (2) 提案手法によって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.833)(3) 等間隔サンプリングによって取得した 30 サンプルから生成した円筒状画像 (正解画像との SSIM:0.961)