

モバイルプロジェクタカメラ系のためのオンライン光学補償

川口 敬宏^{1,a)} 天野 敏之^{1,b)} 大槻 正樹^{2,c)}

概要: プロジェクタとカメラを併用した空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality: SAR) は、光投影によって現実世界の見かけの操作を可能にする。近年、プロジェクタの小型化が進んでいることからモバイル機器を用いた SAR が実現可能となっている。しかし、モバイル SAR システムでは様々な照明環境での利用が想定されるため、事前に光学応答を較正することは困難である。そこで、本研究はこの問題の解決法として DLP プロジェクタを使用し、正確なシーンの反射率を求めることで環境照明の変化に対して不変な制御を実現する。

キーワード: プロジェクタカメラ系, 光学補償, オンライン較正, 反射率推定

Online photometric calibration for the mobile projector camera system

KAWAGUCHI TAKAHIRO^{1,a)} AMANO TOSHIYUKI^{1,b)} OHTSUKI MASAKI^{2,c)}

Abstract: The spatial augmented reality technique that consists of a projector and a camera enables the appearance manipulation of real world by the illumination projection. Today, since the projector keeps getting smaller, the SAR made composed by mobile devices became a realistic story. However, it is difficult to calibrate an optical response beforehand because the use in various illumination environment is supposed for the mobile SAR system. In this research, we propose the method that achieves an invariant appearance manipulation for the various ambient lighting by the accurate reflectance estimation using DLP projector.

Keywords: Projector camera system, Optical compensation, Online calibration, Reflectance estimation

1. はじめに

プロジェクタにカメラを組み合わせたプロジェクタカメラシステムは光学的に実世界に働きかけることができ、投影歪みの幾何学補償や不均一な反射率を有するスクリーンに対する光学補償の他に光投影による見かけ上の色彩やコントラストの改善などを始めとする空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality: SAR) を実現する [1].

Grossberg ら [3] は光投影により物体表面上の見かけをあらかじめ与えられた見かけに変化する手法を提案した。

Bimber ら [2] はプリントアウトや電子ペーパーに投影像を重ね合わせることで、高いダイナミックレンジや色彩補正などを実現するディスプレイ技術を提案している。これらの技術はいずれもあらかじめ取得された対象やシーンに対して静的な見かけの操作を実現している。また、予め学習した対象に対して見かけを操作だけでなく、動的に変化するシーンに対する光学補償技術も提案されている。Fujii ら [4] は Grossberg らの方法を発展させ、ビームスプリッタによりプロジェクタとカメラの焦点位置を一致させた同軸光学系を用いることで、動的な光学補償を実現した。

一方、近年ではプロジェクタの小型化が進んでいることから、屋内などのように強い照明がない環境においてモバイルデバイスによる SAR の実現が期待できる。しかし、屋内環境に限定しても想定される照明条件は多様であるため、事前にプロジェクタカメラ系の光学応答を較正するこ

¹ 和歌山大学システム工学部

〒640-8441 和歌山県栄谷 930

² 株式会社ニコン映像カンパニー開発本部

〒140-8601 東京都品川区西大井 1-6-3

a) s151013@sys.wakayama-u.ac.jp

b) amano@sys.wakayama-u.ac.jp

c) Masaki.Ohtsuki@nikon.com

とは困難である。

そこで、本稿ではまずプロジェクタカメラ系の明度応答モデルより照明条件の変化により動的な光学補償が実現できないことを示す。その後、DLP プロジェクタの投影シーケンスを応用したオンライン反射率推定方法を提案し、実験によりその有効性を示す。

1.1 プロジェクタカメラシステム

プロジェクタカメラ系の明度応答は、事前に応答を線形化したプロジェクタとカメラにおける投影画素 $P = (P_R, P_G, P_B)^T$ と対応する撮影画像の画素 $C = (C_R, C_G, C_B)^T$ において、環境照明成分 $F = (F_R, F_G, F_B)^T$ を考慮すると、

$$C = K(F + MP) \quad (1)$$

と表現できる [4]。ただし、 M は色混合行列

$$M = \begin{pmatrix} m_{rr} & m_{rg} & m_{rb} \\ m_{gr} & m_{gg} & m_{gb} \\ m_{br} & m_{bg} & m_{bb} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

K はシーンの反射率

$$K = \begin{pmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{pmatrix} \quad (3)$$

である。この K は白色基準面の反射率を $K = \text{diag}(1, 1, 1)$ とした相対的な反射率であり、 M および F を事前の較正により算出しておけば、 F が不変の仮定のもとで、 P と C から K を推定することができる。しかし、環境照明が変化する状況では K の推定の度に光学較正により F の取得が必要となる。

そこで、本研究では、このように環境照明が変化する状況において、DLP プロジェクタの投影シーケンスを応用することで、 F に影響されない K の推定を実現する。これにより、環境照明が変化する状況において連続的に光学補償を行う、オンライン光学補償を実現する。

2. 提案手法

照明が変化する環境において連続的に投影補償を適用するためには、環境照明の変化に影響されない反射率 K の推定ができればよい。

あらかじめ、 K が既知な基準面に対してプロジェクタから白色光を投影した全照射時と消灯した無照射時におけるカメラ画像 C を撮影し、これらより F と M を取得しておけば、プロジェクタから光を投影している状態において P と C から K を推定することができる。しかし、環境照明が変化する場合、較正で算出した F を用いることができないため、 K を正確に推定することはできない。そこで、本研究では時間的に RGB の光源を点滅している DLP プロ

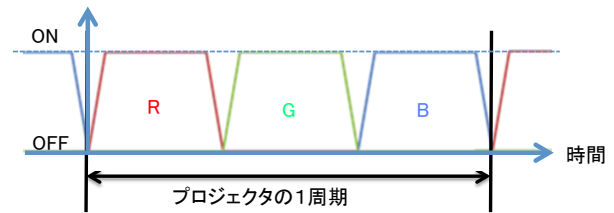


図 1 DLP プロジェクタの投影シーケンス

Fig. 1 Projection sequence of DLP projector

ジェクタを用い、プロジェクタ光の投影時と無投影時の画像を演算で生成し、これによって F に影響されない K の推定方法を提案する。

2.1 DLP プロジェクタ

図 1 に示すように、DLP プロジェクタはあるタイミングでは RGB のチャンネルのうち 1 つだけを投影し、投影し終わると次のチャンネルを投影する。この切り替えを高速に行くと残像効果により人間はカラーの映像を知覚する。

一方、カメラは露光時間内に露光された光量を積分して映像化するものであるため、図 1 のようにカメラの露光時間を設定することで RGB の投影のうちいずれかのチャンネルが投影されていない状態を取得することができる。本研究ではこの DLP プロジェクタの投影シーケンスを利用し、適切な露光時間を設定したカメラで撮影することによって RGB の投影のうちいずれかのチャンネルが投影されていないキャプチャ画像を複数枚取得する。そして、得られた画像群に演算を行うことで映像を投影している状態においてプロジェクタ光の全照射時と無照射時の画像を生成する。

DLP プロジェクタのリフレッシュレート (60Hz 程度を想定) を $1/T$ とし、R,G,B チャンネルの発光タイミング $R(t), G(t), B(t)$ を

$$\begin{aligned} R(t) &= \begin{cases} 1, & nT \leq t < (\frac{1}{3} + n)T \\ 0, & otherwise \end{cases} \\ G(t) &= \begin{cases} 1, & (\frac{1}{3} + n)T \leq t < (\frac{2}{3} + n)T \\ 0, & otherwise \end{cases} \\ B(t) &= \begin{cases} 1, & (\frac{2}{3} + n)T \leq t < (1 + n)T \\ 0, & otherwise \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

とする。また、プロジェクタへの入力を P_r, P_g, P_b とすると、プロジェクタから出力される光量の時間変化は

$$I_p(\lambda, t) = (I_{pr}(\lambda)P_rR(t), I_{pg}(\lambda)P_gG(t), I_{pb}(\lambda)P_bB(t))^T \quad (5)$$

と表現できる。ただし、 $I_{pr}(\lambda), I_{pg}(\lambda), I_{pb}(\lambda)$ はプロジェクタの各チャンネルにおける光源のスペクトル特性である。このとき、カメラとプロジェクタの色特性が同一であり、また異なるチャンネルへの干渉がないことを仮定すれば、

$$I_p(t) = g_p(P_r R(t), P_g G(t), P_b B(t))^T \in R^3 \quad (6)$$

と記述できる。これはすなわち、 I_p の各要素は対応するカメラのR,G,Bチャンネルのいずれか一つのみに影響することを意味する。ここで、環境光を $I_0(\lambda, t) = I_0(\lambda)$ とおけば、カメラに入射される光は

$$\begin{aligned} I_c(t) &= K(I_p(t) + I_0) \\ &= g_p K S P + K I_0 \end{aligned} \quad (7)$$

と記述できる。ただし、

$$S(t) = \begin{pmatrix} R(t) & 0 & 0 \\ 0 & G(t) & 0 \\ 0 & 0 & B(t) \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} P_r \\ P_g \\ P_b \end{pmatrix} \quad (8)$$

である。ここで、カメラゲインを g_c 、カメラの露光時間を w 、位相を ψ とし、カメラでの露光のタイミングを

$$E_x(\psi, t) = \begin{cases} 1, & \psi \leq \text{mod}(t, T) < w + \psi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

と表現する。また、露光の位相 ψ におけるキャプチャ画像は

$$\begin{aligned} C(\psi) &= g_c \int_0^T E_x(\psi, t) I_c(t) dt \\ &= g_c g_p K \int_0^T E_x(\psi, t) S(t) P dt + g_c K I_0 \int_0^T E_x(\psi, t) dt \\ &= g_c g_p K \left(\int_0^T E_x(\psi, t) S(t) dt \right) P + g_c w K I_0 \\ &= \frac{3}{T} K D(\psi) P + K F \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ただし、

$$D(\psi) = \begin{pmatrix} d_r(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & d_g(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & d_b(\psi) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} d_r(\psi) &= \int_0^T E_x(\psi, t) R(t) dt \\ d_g(\psi) &= \int_0^T E_x(\psi, t) G(t) dt \\ d_b(\psi) &= \int_0^T E_x(\psi, t) B(t) dt \end{aligned} \quad (11)$$

であり、簡単のために $g_c = 1, g_p = 1, w I_0 = F$ とした。

ここで、 $\frac{T}{3} \leq w \leq \frac{2}{3}T$ であれば $D(\psi)$ の対角要素の最大値は $T/3$ 、最小値は0となるため、様々な位相のキャプチャ画像の集合に対して \max, \min 演算を施したものを C_{max}, C_{min} とすると、

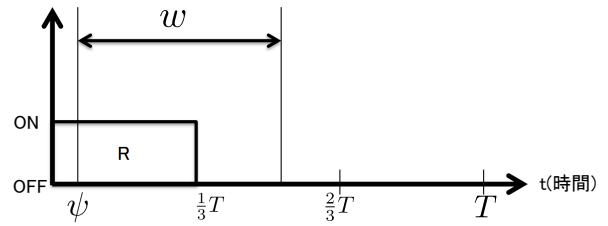


図2 DLP プロジェクタの投影シーケンスと露光の関係

Fig. 2 A relation between DLP projection sequence and exposure

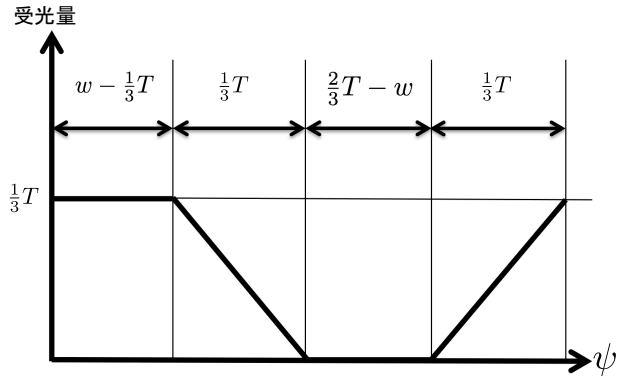


図3 位相 ψ における受光量

Fig. 3 Illumination at phase ψ

$$\begin{cases} C_{max} = \max\{C(\psi) | 0 \leq \psi < T\} = K(P + F) \\ C_{min} = \min\{C(\psi) | 0 \leq \psi < T\} = KF \end{cases} \quad (12)$$

となる。また、プロジェクタとカメラの色空間の違いを考慮し、これに色混合行列 M を適用すると、

$$\begin{cases} C_{max} = K(MP + F) \\ C_{min} = KF \end{cases} \quad (13)$$

となる。すなわち、無作為に十分な回数画像のキャプチャを行い、最大値 C_{max} と最小値 C_{min} を求めることで、プロジェクタから P が連続的に投影されている状態の画像(全照射画像)と無照射時の画像(無照射画像)が得られる。

2.2 カメラの露光時間の設定

RGBの光が等間隔で投影される理想的なDLPプロジェクタの投影周期を T とすると、あるチャンネルの投影時間は $1/3T$ と表現できる(図2)。また、あるチャンネルの像が正しい明度で撮影されるためには、カメラの露光時間 w は

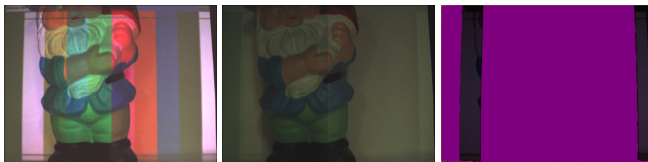
$$\frac{1}{3}T \leq w \leq \frac{2}{3}T \quad (14)$$

の範囲になければならない。このとき、 ψ が変化することによってあるチャンネルの受光量は図3のように表現できる。この図から、ある位相 ψ においてキャプチャされる画像の受光量 I が最大となる確率と最小となる確率は、 T に



(a) C_{max} (b) C_{min} (c) Reflectance
図 4 白色投影時における反射率推定結果

Fig. 4 Estimated reflectance on white projection



(a) C_{max} (b) C_{min} (c) Reflectance
図 5 colorbar 投影時における反射率推定結果

Fig. 5 Estimated reflectance on color bar projection

対するそれぞれの区間の長さとなる。これらの確率が等しいとき、全照射画像と無照射画像が正しく推定できる期待値が等しくなるため、本研究では $w = \frac{1}{2}T$ に設定する。

2.3 反射率推定

前節で求めた露光時間をカメラに設定し、複数回撮影した画像から C_{max} , C_{min} を生成する。そして、式 (13) より F を消去した

$$K = (C_{max} - C_{min}) ./ MP \quad (15)$$

に代入することによって反射率を求めることができる。ただし、./ は要素毎の除算である。この式 (15) では F を含まないため環境照明に影響されずに反射率が推定できる。しかし、この手法では投影光 P の要素が 0 の成分については反射率を推定することができない。

図 4 はプロジェクタから白色光を投影した場合の反射率推定結果である。このとき、投影光 P において、RGB の値は全て 0 以外の値である。また、プロジェクタから colorbar 画像を投影した場合の反射率推定結果を図 5 に示す。ただし、反射率の推定ができない部分は紫色で表現している。この場合、式 (15) の手法では投影しているシーンの反射率が推定できないため、光学補償ができない。そこで、投影光の R,G,B チャンルのうちいずれかの要素が 0 でなければ反射率推定を行うことができる手法を提案する。ただし、 F は白色であることを仮定する。

あるチャンネル $i \in \{r, g, b\}$ の反射率 k_i を

$$k_i = tn_i \quad (16)$$

とおく。ただし $\sum_i n_i^2 = 1$ とし、 n_i は色相と彩度を表す成分とする。また、 t は反射強度を表すものとする。本研究ではこの式において、 n_i, t をそれぞれ独立に求めることで反射率を推定する方法を提案する。

チャンネル i における無投影時の画像は

$$C_{min_i} = k_i F_i = tn_i F_i \quad (17)$$

と表現できる。ここで F が白色であると仮定すれば

$$\frac{C_{min_i}}{\sqrt{\sum C_{min_i}^2}} = \frac{tn_i F_i}{tF_i \sqrt{\sum (n_i)^2}} = n_i \quad (18)$$

のように反射強度は分からないが F の強度に影響されずに対象物体の色彩を推定することができる。また、 C_{max_i} と C_{min_i} の差分 ΔC_i は

$$\Delta C_i = k_i \sum_{j \in \{r, g, b\}} m_{ij} P_j \quad (19)$$

である。これを整理すると

$$k_i = \frac{\Delta C_i}{\sum_j m_{ij} P_j} \quad (20)$$

である。また、式 (16) より $\sum k_i^2 = t^2$ であるので、

$$t = \sqrt{\sum_i k_i^2} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta C_i}{\sum_j m_{ij} P_j} \right)^2} \quad (21)$$

である。このように k_i を t と n_i に分解することによって、 $P = 0$ でない場合に F が白色という仮定のもとで K の推定が可能になる。

3. 実験

3.1 実験環境

本実験では DLP プロジェクタ (Dell-M109S, 解像度 800×600) とカメラ (Pike F-100B, 解像度 780×580) で構成された、光学的に瞳位置が一致したシステム (図 6) を使用した。このシステムにおいて、プロジェクタのリフレッシュ周波数は 60Hz であるが、5 倍速駆動であるため $T = 3.33msec$ であった。そのためカメラのシャッタ速度は $1.66msec$ に設定した。また、本実験では $K = diag(1, 1, 1)$ となる白色基準面として、白色のスチレンボードを用い、反射率推定のためのテストシーンとして図 4 のように白色のスチレンボードの前に陶器の人形を配置した。

3.2 実験結果

プロジェクタから colorbar の画像を投影し、キャプチャ画像より C_{max} と C_{min} を生成し、これらより正しい反射率の推定結果が得られるか検証した。ただし、本実験では様々な位相におけるキャプチャ画像を得て、全照射時と無照射時の画像を正確に推定できる十分な数として 50 枚の画像を取得した。

カメラの露光時間が正しく設定されているならば、RGB のチャンネルのうちいずれかが欠けたキャプチャ画像が得られるはずであるが、図 7 に示すキャプチャ画像をみると、

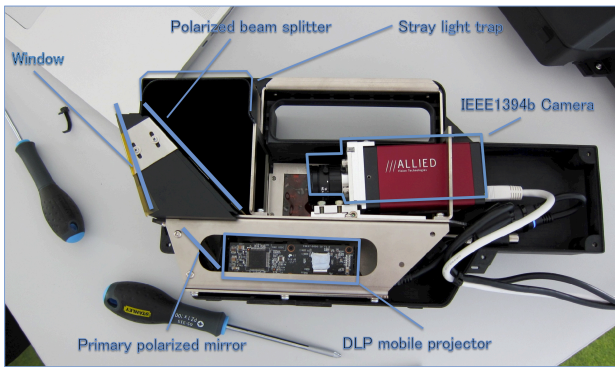


図 6 手持ち式プロジェクタカメラシステム
 Fig. 6 Hand held projector camera system

赤, 青, 緑などいずれかの色彩に着色された画像が見られ, カメラの露光時間が正しく設定されていることが確認できる. これらの画像を用いて式 (12) により C_{max}, C_{min} を算出したところ, 図 8 の (c) と (d) に示す結果が得られた. これらを図 8 の (a),(b) と比較すると, 同様の見かけの画像が計算により得られており, 演算によって全照射時と無照射時の画像が推定できることが確認できる.

図 9 に反射率推定の結果を示す. 図 9 において, t の推定結果で白色で示されている範囲は t の推定ができなかったことを意味している. 提案手法では R,G,B のいずれかのチャンネルが 0 でなければ反射率推定ができるが, この箇所は黒色の投影であったために t の推定ができなかった. それ以外の部分では, 反射率の推定ができているが, t の結果において照射した colorbar 映像の色の境界で段差が生じていることが確認できる.

3.3 誤差に対する考察

図 9 に示した t の推定において発生した推定誤差の原因を調べるために, 白色面において同様の反射率推定を行った結果を図 9 に示す. また, この結果の $A-A'$ 断面において t の推定結果をグラフで表したものを図 10 に示す.

これらの結果を見ると画像中心部に比べて周辺部の反射率が低く推定されている. 図 8 をみると画像の周辺部では画像の明度低下が確認できるが, これは口径食によるものであり, この明度低下が t の推定に影響を及ぼしたものである.

図 11 のグラフにおいて, 前述の画像周辺部における明度低下を考慮して投影色ごとの t の推定値を比較すると, RGB のチャンネルのうちいずれか一つによる投影よりも 2 つによる投影のほうが t は小さく推定されており, 3 つ, すなわち白色の場合は最も小さく推定されている. このような推定誤差の要因としては, 色混合行列の推定誤差やプロジェクタとカメラの応答の線形化の誤りに起因する色空間の不整合が考えられる. 今後の研究ではカメラとプロジェクタの明度応答および色の整合性について詳しく調査し,

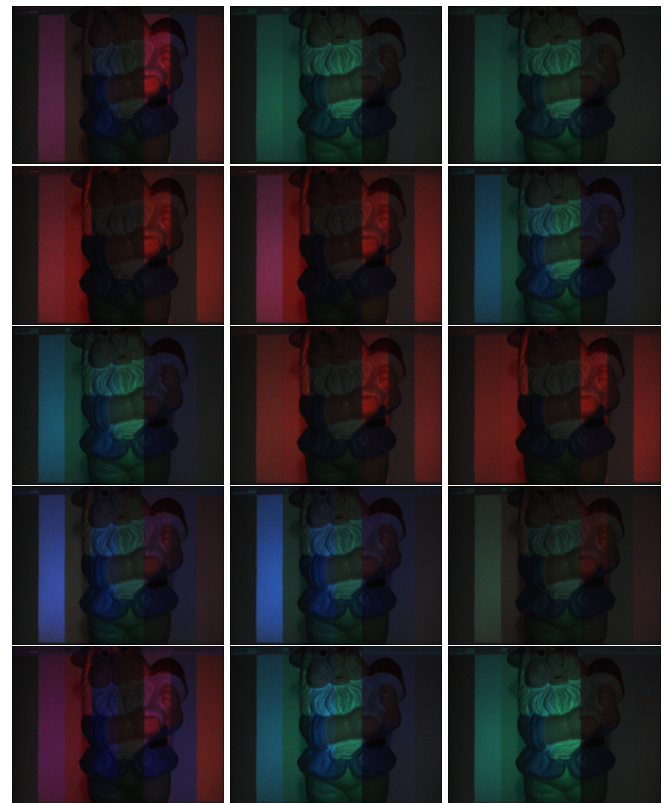


図 7 colorbar 投影時のキャプチャ画像の一例
 Fig. 7 Capture images on the color bar projection

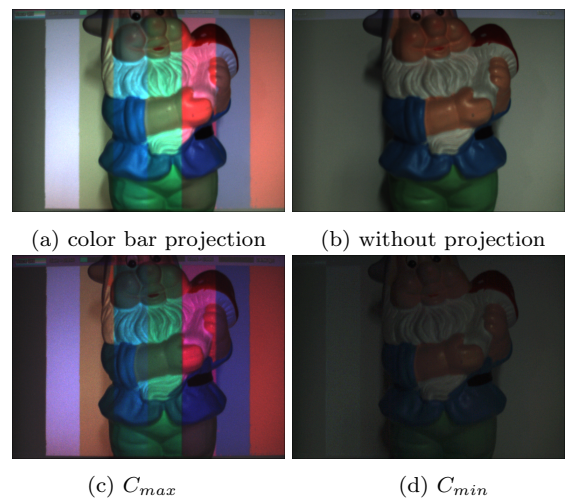


図 8 推定画像

Fig. 8 Estimated images

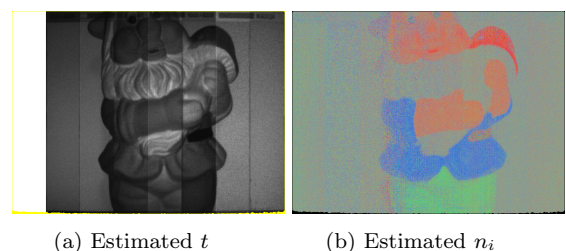


図 9 推定された反射成分

Fig. 9 The estimated reflection components

この原因を解明する予定である.

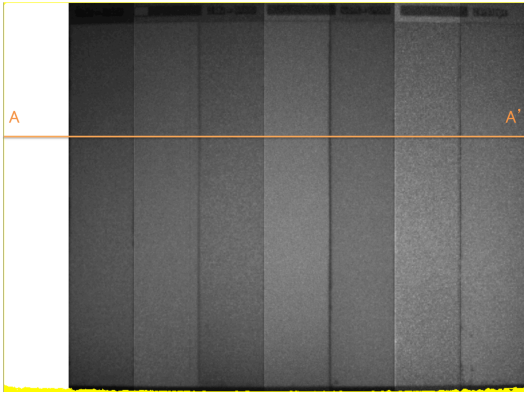


図 10 白色面における t の推定結果

Fig. 10 The estimated result of t on a white surface

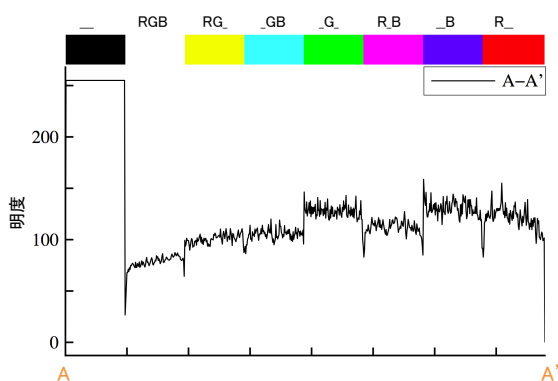


図 11 A-A' における反射強度の分布

Fig. 11 A reflectance distribution on A-A'

3.4 少数のキャプチャによる C_{max} と C_{min} の算出

実験より無作為に十分な回数撮影した画像群に対して最大と最小を求めることで C_{max} と C_{min} が生成できることが確認できたが、これらを正確に算出するためには多くのキャプチャが必要であり、動的な応用を行う際に処理コストと遅延が問題となる。

しかし、図 3 からわかるように、位相 ψ に対するキャプチャ画像の明度は台形波となる。ここで、この形状を大雑把に

$$\begin{aligned} C(\psi) &= C_{max} \sin(\psi + \psi_0) + C_{min} \\ &= A \sin(\psi) + B \cos(\psi) + C_{min} \end{aligned} \quad (22)$$

とおけば、相対的なキャプチャタイミングが既知の 3 枚の画像 $C(\psi_1), C(\psi_2), C(\psi_3)$ より A, B, C_{min}, ψ_0 を算出することができる。例えば、キャプチャのタイミングを $\frac{1}{9}T$ 間隔でずらして 3 枚の画像をキャプチャして、それぞれを $C(0), C(2\pi/3), C(4\pi/3)$ とすることで A, B, C_{min} が算出でき、これらより C_{max} も算出できる。

4. まとめ

モバイル SAR システムでは様々な環境照明で用いられ

ることが考えられる。しかし環境照明の変化に対して動的に光学応答を校正することは困難である。

本論文では、シーンの反射率を動的に求めることにより環境照明が変化に対して制御する方法を提案した。

今後の研究では、カメラ入力画像に必要な画像数を少なくすることで、処理を軽くする予定である。また、本研究での提案手法を応用し、環境光だけでなく、距離に対しても不変な制御を行うアプリケーションを実装する予定である。

参考文献

- [1] Oliver Bimber, Daisuke Iwai, Gordon Wetzstein, and Anselm Grundhöfer.: *The visual computing of projector-camera systems*, Computer Graphics Forum, Vol.27, no.8, pp.2219-2254, 2008
- [2] O. Bimber and D. Iwai.: *Superimposing dynamic range*, ACM Transactions on Graphics, vol.27, no.5, pp.150:1-150:8, 2008
- [3] M. D. Grossberg, H. Peri, S. K. Nayar, P. N. Belhumeur.: *Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System*, Proc. of CVPR, pp.452-459, 2004.
- [4] K.Fujii, M. Grossberg, and S. Nayar.: *A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic*, Computer Graphics Forum, Vol.27, no.8, pp.2219-2254, 2008