

機械走査式ハイパースペクトルイメージングにおける環境光変動補償 Compensation for Temporal Inconsistent Illumination on Whisk-broom Hyperspectral Imaging

小川 岳大[†] 船富 卓哉[†] 田中 賢一郎[†] 久保 尋之[†] 向川 康博[†]

Takehiro Ogawa[†] Takuya Funatomi[†] Kenichiro Tanaka[†] 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: [†] {ogawa.takehiro.ol1, funatomi, ktanaka, hkubo, mukaigawa }@is.naist.jp

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野における近年のセンシング技術の著しい発展により、ヒトの目を越えた知覚の情報処理が行われている。例えば、人間が知覚する赤青緑の波長情報を拡張したハイパースペクトルイメージングは農作物などのモニタリングや生医学工学、バイオメトリクスおよび顔認識などのアプリケーションで活用されている。

RGB 画像から分光画像を推定するいくつかの手法 [1, 2, 3, 4] が提案されているが、任意のシーンに対する精度を保証するものではない。そこで我々は正確な分光画像を取得するため、図 1(a) に示すように高分解能分光計と高速回転ミラーシステムで構成される計測システムを構築した。このシステムでは高速回転ミラーによってシーンを 1 行ずつ走査しながら分光計によって計測を行い、その結果を画像として合成する。図 1(b) の青い矢印は走査方向を示している。このようなシステムは何千バンドもの分光画像の取得を可能にするが、シーン全体を走査するため計測が長時間になるという欠点もある。従って環境光の時間的変動があると、顕著にその影響を受けてしまう。

そこで本稿では、計測システムが持つ自由度の高い走査性と環境光の分光分布における低ランク性に基づき、環境光変動を補償する手法を提案する。具体的には、空間の走査方向に対し垂直な 1 ラインの走査を追加し、これと分光分布の低ランク性によって分光画像における環境光変動を補償する。実環境ならびに実験室環境における実験を通して、提案手法の有効性を確認した。

2. 分光画像の数理モデル

分光画像は一般的に、空間方向の 2 次元に加え、波長方向の 1 次元での値を持つ 3 次元データである。本稿では、環境光の時間的変動に関しても考察を行うため、分光画像を空間座標 (u, v) および波長 λ に加えて、時間 t も合わせた 4 次元変数を持つ関数 $S(u, v, t, \lambda)$ として表す。

計測対象が動かないような静的シーンを計測する

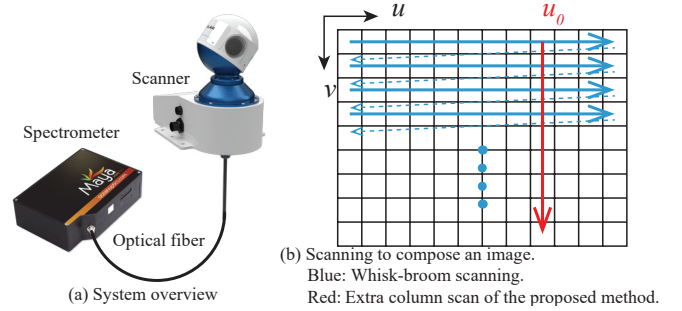


図 1 計測システム

際、環境光に時間的変動があると仮定した場合、分光画像 $S(u, v, t, \lambda)$ は次のように分解できる。

$$S(u, v, t, \lambda) = L(t, \lambda)R(u, v, \lambda) \quad (1)$$

ここで、式中の $L(t, \lambda)$ と $R(u, v, \lambda)$ はそれぞれ、空間的に均一な環境光と時間的に不変なシーンの反射率あるいは透過率である。本稿では、環境光の変動を受けた分光画像 $S(u, v, t, \lambda)$ を時間 t_r における一定の環境光 $L_r(\lambda) = L_r(t_r, \lambda)$ 下での分光画像に変換することを目標とする。これは次のように定義される、

$$S_r(u, v, \lambda) = L_r(\lambda)R(u, v, \lambda) \quad (2)$$

機械走査式のシステムでは、図 1(b) に示すように、分光画像は複数の行から構成される。各行の走査は数秒で終了するため、その間の環境光変動が無視できるほど小さいと仮定すると、計測時刻は画像の行の関数 $t(u)$ として表され、計測される分光画像 $S_{wb}(u, v, t(u), \lambda)$ は次のように定式化される。

$$S_{wb}(u, v, t(u), \lambda) = L(t(u), \lambda)R(u, v, \lambda) \quad (3)$$

3. 提案手法

3.1 補償のための一列走査の追加

S_{wb} の各行は時間的な環境光変動の影響を受けており、その影響を補償するための情報が不足している。そこで、複数行の走査からなる通常の計測に加え、図 1(b) の赤い矢印に対応する単一系列の走査を追加する。この一走査中の環境光変動は各行と同様に無視できると仮定すれば、追加の一走査の計測結果 $S_r(u_r, v, \lambda)$ は次のように定式化される。

$$S_r(u_r, v, \lambda) = L_r(\lambda)R(u_r, v, \lambda) \quad (4)$$

3.2 単純な環境光変動補償手法

図 1(b)の青矢印と赤矢印の交点に対応する画像内の任意の行と追加の一走査の列は 1 画素を共有する。したがって、 S_{wb} と S_r の対応画素を比較することで、各行の波長方向における環境光変動の補償係数 $C_n(v, \lambda)$ を次式のように計算できる。

$$C_n(v, \lambda) = \frac{S_r(u_r, v, \lambda)}{S_{wb}(u_r, v, t(u), \lambda)} = \frac{L_r(\lambda)}{L(t(u), \lambda)} \quad (5)$$

この計算された係数を同一行の画素値に乗算し、 S_r が計測された時刻の環境光下の行のスペクトルを推定できる。単純な手法として、環境光変動に対する補償を以下に示す。

$$S_n(u, v, \lambda) = C_n(v, \lambda) S_{wb}(u_r, v, t(u), \lambda) \quad (6)$$

ここで、 $S_n(u, v, \lambda)$ は単純な手法によって補償された分光画像である。

共有画素が反射率や透過率を標準白色板のような均一な分光特性を持つ場合、単純な手法であっても高精度に環境光変動を補償することができる。しかし、画素が捉えた物体が偏った分光分布を持つ場合、 S_{wb} と S_r の両方において、特定の波長で強度が小さくなる可能性がある。このような波長に対する補償係数は、分子と分母の両方が小さくなるため、不安定になる。

任意のシーンを計測した場合、行内の別の画素が異なる分光特性を持つ物体を捉えることは十分にありうる。しかし、そのような物体の分光分布を不安定な係数によって補償した場合、大きな誤差を生む可能性がある。

3.3 環境光の低ランク性を利用した補償

そこで不安定な係数の影響を抑制するために、提案手法では係数推定に制約を加える。環境光の分光特性が低ランク性を持っていることが一般に知られており[5]、以下のように少数基底を用いて環境光の分光分布を近似できる。

$$L(t, \lambda) \simeq \sum_k w_k(t) l_k(\lambda) \quad (7)$$

ここで、 $l_k(\lambda)$ と $w_k(t)$ は基底となる分光分布とその重みである。 $L_r(\lambda)$ は定数として扱うことができるので、式(2)を以下のように近似する。

$$C_n(v, \lambda) \simeq \sum_k w_k(t(v)) \frac{L_r(\lambda)}{l_k(t(v), \lambda)} l_k(\lambda) = \sum_k w'_k(v) l'_k(\lambda) \quad (8)$$

ここで、 $C_n(v, \lambda)$ は少数の基底 $l'_k(\lambda)$ の線形結合で表現できると仮定した。

一般的に求める補償係数 $C_n(v, \lambda)$ はその逆数である $\frac{1}{C_n(v, \lambda)}$ であればより正確に少数の基底 $l_k(\lambda)$ の線形結合として表せるが、式(6)の計算で数値計算的に不安定に

なるため、 $C_n(v, \lambda)$ を直接近似することとした。

ここで、 $C_n(v, \lambda)$ は理想的には $\sum_k w'_k(v) l'_k(\lambda)$ と近似されるが、 $S_r(u_r, v, \lambda)$ の誤差による外れ値も一部存在する。そこで式(5)のように、ランク k の低ランク係数行列 $C_l(v, \lambda) = \sum_k w'_k(v) l'_k(\lambda)$ とスパースな外れ値成分 C_s の和として $C_n(v, \lambda)$ を表す。

$$C_n(v, \lambda) = C_l(v, \lambda) + C_s \quad (9)$$

低ランク行列を抽出するために Robust PCA [6]を使用した。

$$\min_{C_l(v, \lambda), A} \|C_l(v, \lambda)\|_* + \mu \|C_s\|_1 \quad (10)$$

$$\text{subject to } C_n(v, \lambda) = C_l(v, \lambda) + C_s$$

ここで $\|\cdot\|_*$ と $\|\cdot\|_1$ はそれぞれ核ノルムと L_1 ノルムを表し、定数 μ はスパース性を課す第二項の重みを決めるパラメータである。本稿の実験では $\mu = 10^{-6}$ に設定した。

$C_n(v, \lambda)$ を低ランク係数 $C_l(v, \lambda)$ とスパース行列 C_s に分解し、補償には低ランク係数を利用することで、十分な精度で補償係数を復元できる。復元された係数は他の画素における環境光変動を効果的に補償すると期待される。環境光変動に対する補償は以下の通りである。

$$S_{es}(u, v, \lambda) = C_l(v, \lambda) S_{wb}(u_r, v, t(u), \lambda) \quad (11)$$

4. 実験

本研究では分光計測のために一点計測の分光計と高速回転ミラーシステムからなる計測システムを構成した。図 1(a)にシステム構成を示す。分光計は Maya2000 Pro (Ocean Optics, Inc.) であり、波長 200～1200 nm を約 0.5 nm の分解能で 2,068 バンドの計測が可能である。ミラーシステムは RobotEye REHS25 (Ocular Robotics Ltd.) で、水平方向に 360°、鉛直方向に 70° の範囲を最大 0.01° の空間分解能で計測が可能であり、これらの装置は光ファイバを用いて接続されている。

4.1 実験室環境実験

環境光が制御された室内で、補償手法を評価する実験を行った。本実験では出力が可変なハロゲン光源と 2 つの LED を用いた。図 2 に示すようなシーンにおいてハロゲン光の強度を手動で時間的に変化させ、光源変動下での計測環境を再現する。

まず、LED だけが点灯している一定の環境光下で分光画像を計測した。この結果を真値 $S_{gt}(u_r, v, \lambda)$ として評価に用い、補償のためにこの画像の任意の一行を式(2)の $S_r(u_r, v, \lambda)$ として使用した。また、ハロゲン光源の出力を変化させることで環境光変動が起きている分光画像 $S_{wb}(u_r, v, t(u), \lambda)$ の計測も行った。それぞれの手法による補償結果を真値の分光画像と比較することで評価した。

環境光変動補償の精度を定量的に評価するために、

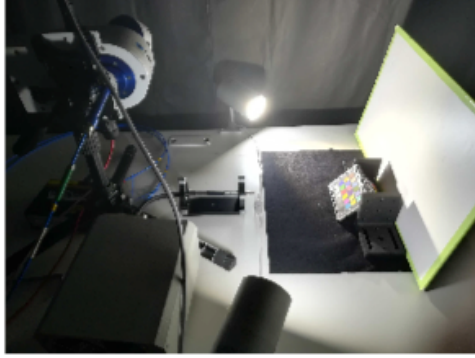


図 2 実験環境

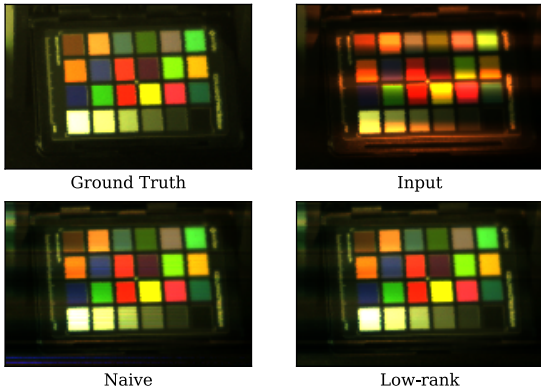


図 3 実験室環境実験での定性的評価

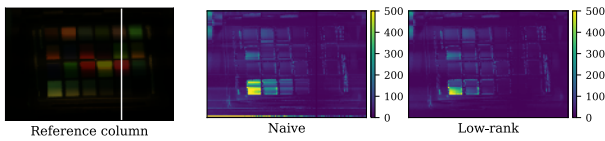


図 4 各手法の誤差評価

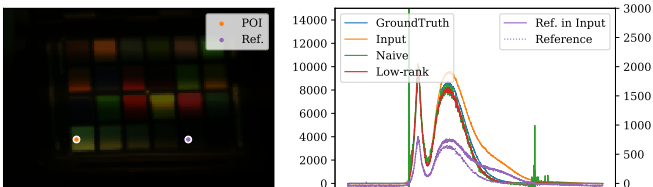


図 5 実験室環境実験での補償後分光分布の比較

以下の式によって計算される波長方向の絶対誤差の平均を計算した．

$$err(u, v) = \frac{1}{|\Lambda|} \sum_{\lambda \in \Lambda} \|S(u, v, \lambda) - S_{gt}(u, v, \lambda)\| \quad (12)$$

式中の $|\Lambda|$ は画素のバンド数である．

図 3 は 3 つの波長 ($\lambda = 435.8, 546.0, 635.8\text{nm}$) を用いて環境光変動が生じている分光画像を RGB 画像として示している．両手法の補償結果は、時間的な環境光変動下で計測された分光画像よりも真値に非常に近いことが定性的にわかる．

図 4 は両手法の結果について式(12)の誤差を用いて比較したものである．図からわかるように提案手法による補償結果が画像全体でより誤差の小さい結果を示

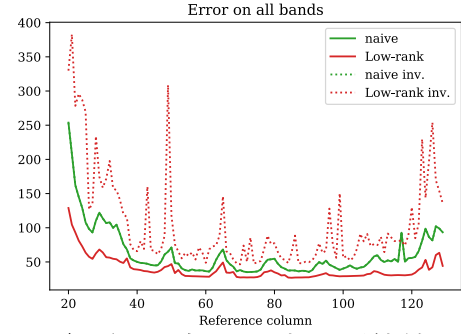


図 6 参照列選択に対する頑健性の比較

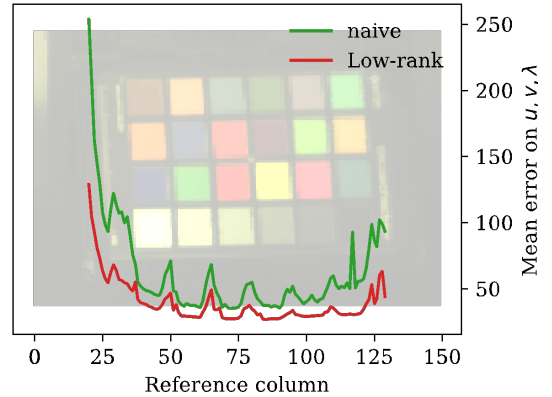


図 7 参照列選択に対する頑健性の詳細

している．図 5 は、ある点 (POI) と対応する補償のために参照した点での分光分布を示している．どちらの補償結果も真値に近いが、単純な手法の結果は $\lambda = 419 \sim 424, 868 \sim 875\text{nm}$ のようないくつかの波長において大きな誤差が生じている．また、これらの波長において、参照点のスペクトルは非常に小さい信号を持つことがわかった．一方で、提案手法は低ランク性とスパース性を用いたことにより他の波長における分光分布と同様に計測を補償することできた．

これまでに示した一連の結果は一例に過ぎず、補償結果は参照列に依存すると考えられる．そこで、補償のために参照した列の選択に対し、両手法がどれだけ頑健であるかを検証した．参照列の選択に関する画像全体の誤差の変化を図 6 に示す．なお、ここでは補償

係数として $\frac{1}{C_n(v, \lambda)}$ と $C_n(v, \lambda)$ を用いた場合でそれぞれ単

純な手法と提案手法の誤差を評価した．単純な手法ではいずれの場合も差がないが、提案手法では明らかに $C_n(v, \lambda)$ を用いたほうが良い性能を示した．また、図 7 は選択した参照列を画像と比較できるように示したものである．単純な手法では参照列が暗い色の部分を含む時に結果が悪化することが見て取れるが、提案手法はそれよりも一貫して優れており、提案手法の頑健性を示していると言える．

4.2 実環境実験

実環境での実験を兼ねたデジタルアーカイブのた



図 8 実環境実験での定性的評価

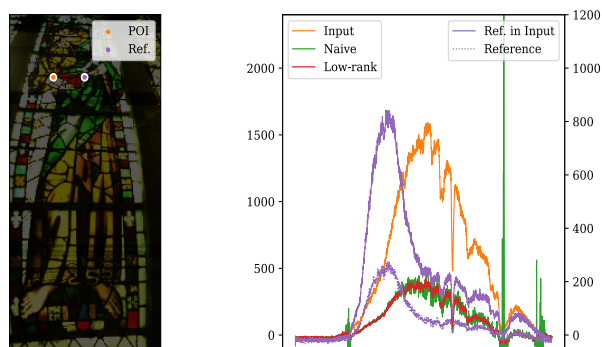


図 9 実環境実験での補償後分光分布の比較

めの研究の一環としてフランス・アミアンにある大聖堂のステンドグラスを透過した太陽光を計測した。RobotEye は最大 25 ポイント/秒の高速スキャンが可能であるが、高い空間解像度で分光画像を計測するにはとても時間がかかる。例えば、 300×300 の解像度で計測するには約 1 時間かかる。この計測は自然の太陽光下で行われるので、雲や地球の自転などの自然によって引き起こされる環境光強度の時間的変動の影響を受ける。ステンドグラスの計測は次のように複数回実施した。

- ・シーン全体を 400×200 解像度、3217.7 秒で計測
- ・補償のための追加の一走査を 15.6 秒で計測

計測したステンドグラスの分光画像に両手法を適用した。図 8 に RGB 画像と両手法による補償結果を示す。図 9 に、ある点 (POI) での分光分布と、それに対応する参照点の分光分布を示す。真値がないため定量評価はできないが、単純な手法による補償では、実験室環境での実験と同様、いくつかの波長において外れ値のような不自然に大きな値があった。提案手法では単純な手法より良い補償ができていと考えられる。

5. まとめ

本稿では、機械走査式ハイパースペクトルイメージングに向けた環境光の時間的変動を補償する手法を提案した。この手法は、環境光の変動が 1 ラインの走査の間では無視できると仮定し、ハイパースペクトル画像の行間の変化を補償する。標準的な 2 次元の走査に

加えて、走査方向に直交する追加の走査を実施することを提案した。参照から直接推定された補償係数は不安定になる場合があるが、環境光の分光特性に低ランク性を利用することでその不安定性を抑制できることを示した。制御可能な照明環境を用いた室内環境での実験を通して補償手法を定量的に評価し、自然光下で行われた実験での結果を示した。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会とフランス MAEDI との二国間交流事業 (共同研究)、および JST CREST JPMJCR1764 の助成を受けた。Amiens 大聖堂での実験をご支援頂いた El Mustapha Mouaddib 教授, Guillaume Caron 教授 (Picardie Jules Verne 大学), Ce'dric Demonceaux 教授 (Burgundy 大学), Nicolas Ragot 博士 (ESIGELEC) に謝意を表します。また Robust PCA の実装をご提供頂いた松下康之教授および竹村 朋華氏 (大阪大学) に感謝申し上げます。

文 献

- [1] Jia, Y., Zheng, Y., Gu, L., Subpa-Asa, A., Lam, A., Sato, Y., Sato, I.: From rgb to spectrum for natural scenes via manifold-based mapping. In: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 4715-4723 (2017). doi:10.1109/ICCV.2017.504
- [2] Choi, I., Jeon, D.S., Nam, G., Gutierrez, D., Kim, M.H.: High-quality hyperspectral reconstruction using a spectral prior. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2017) **36**(6), 218-213 (2017). doi:10.1145/3130800.3130810
- [3] Baek, S.-H., Kim, I., Gutierrez, D., Kim, M.H.: Compact single-shot hyperspectral imaging using a prism. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2017) **36**(6), 217-112 (2017). doi:10.1145/3130800.3130896
- [4] Chi, C., Yoo, H., Ben-Ezra, M.: Multi-spectral imaging by optimized wide band illumination. International Journal of Computer Vision **86**(2), 140 (2008). doi:10.1007/s11263-008-0176-y
- [5] Judd, D.B., MacAdam, D.L., Wyszecki, G., Budde, H.W., Condit, H.R., Henderson, S.T., Simonds, J.L.: Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. J. Opt. Soc. Am. **54**(8), 1031-1040 (1964). doi:10.1364/JOSA.54.001031
- [6] Cande's, E.J., Li, X., Ma, Y., Wright, J.: Robust principal component analysis? J. ACM **58**(3), 11-11137 (2011). doi:10.1145/1970392.1970395