2章 マルチスペクトル技術の進展

2-2 実計測と信号処理の融合によるマルチスペクトルイメージング技術

村上百合[†]

キーワード：マルチスペクトルイメージング、画像復元、スペクトル復元、複合解像度、イメージングシステム

1. まえがき

マルチスペクトル画像データは空間方向2次元、波長方向1次元から成る3次元のデータであるため、2次元のイメージセンサを用いて撮影を行う場合には、空間方向もしくは波長方向の走査が必要となる。そのため、動く被写体の撮影やマルチスペクトル動画の撮影が困難である。撮影装置が大型化・複雑化するなどの課題がある。近年、ワンショット撮影の試みもあるが¹⁾²⁾、空間・波長解像度と光量とのトレードオフが課題となる。

一方、得られたマルチスペクトル画像は一般に空間方向・波長方向共に大きな冗長性がある。そのため、実計測において冗長性を排除した少ない数のデータのみを取得し、後段の信号処理によりマルチスペクトル画像情報を復元できれば、効率的なマルチスペクトル画像取得が可能となる。実計測データの次元数を減らすことで、リアルタイム撮影の実現や、光量と解像度とのトレードオフの低減も期待される。そこで、圧縮センシングによるマルチスペクトルイメージングの技術も検討が進められているが、現時点では、比較的解像度の低い画像が対象である³⁾。

一方、われわれは高解像度なマルチスペクトル画像取得を実現する手法として、複合解像度型イメージング手法を提案している^{4)~7)}。この手法では、①空間解像度は高いが波長解像度が低いデータと、逆に②空間解像度は低いが波長解像度が高いデータを組合せて取得し、これらに基づいて空間・波長解像度が共に高い画像データを復元する。同様の手法は、リモートセンシング分野を始めとして他にも提案があるが^{8)~9)}、多くは得られたデータをどのように融合するかのみに着目しているのに対し、われわれはマルチスペクトル画像情報を復元するために必要となる観測データの設計を含めて検討を行ってきた。

複合解像度型のイメージング手法では、実際には計測していないマルチスペクトル画像情報を信号処理により復元

する。そのため、どのような条件で誤差なく復元可能であるのか、どのような原理で復元するのかを整理することは重要である。本稿では、この点に焦点を絞り解説を行うとともに、システムとして実装する方法と課題についても述べる。

2. マルチスペクトル画像情報復元の原理

本章では、複合解像度型イメージングにおいて、低次元で観測されたデータから高次元のマルチスペクトル画像情報を復元する原理について説明する。説明の簡略化のために、波長方向に一定間隔でサンプリングされたような分光画像を復元対象として説明するが、これに当てはまらない特定波長のみから構成されたマルチスペクトル画像等の復元においても以下の議論はほぼ同様に成り立つ。また、分光画像の各画素は分光放射輝度や分光透過率などの波長ごとの情報を有するが、以下ではこれらを総じてスペクトルと表現する。

2.1 画素ごとのスペクトル復元

カラー画像、もしくは、3次元の色情報からスペクトルを復元する試みは古くから行われている。多くは、スペクトルに含まれる波長方向の冗長性を利用して、低次元の計測データから高次元のスペクトルを復元する。具体的には、対象を限定してスペクトルを3本程度の少ない数の基底関数の線形和で表現することで、未知数を減らしてスペクトル復元を実現する方法が良く用いられる¹⁰⁾。この方法の問題点は、対象を限定しなければならないこと、対象を表現する基底関数を知ることが一般に困難であることにある。

そこで、分光画像を小さな領域に分割することを考える(図1)。小領域を適切に設定することで、個々の小領域に含まれるスペクトルは、比較的少ない数R本の基底関数の線形和で表現可能になると考えられる。ここで、この小領域内でR本以上の分光情報を直接計測することができれば、この小領域に対応したR本の基底関数を得ることができる。さらに、R本の基底関数が既知なときに、この領域に対してR種類の独立な観測(Rチャンネル画像)を取得すれば、すべての画素でスペクトルを復元可能となる。以上を整理すると、分光画像の①波長方向にのみ低解像度化した

[†] 東京工業大学 学術国際情報センター"Multispectral Imaging based on Integration of Sensing and Processing"
by Yuri Murakami (Global Scientific Information and Computing Center,
Tokyo Institute of Technology, Yokohama)

図1 分光画像からの小領域の選択
(口絵カラー参照)

図2 分光画像の小領域の復元に必要な計測データ
(口絵カラー参照)

Nチャンネルの画像データ ($N \geq R$) と②空間方向にのみ低解像度化したM本のスペクトルデータ ($M \geq R$) を計測することで、この領域の分光画像情報を完全に復元できることになる。ただし、ここでの計測は線形システムを介して行われることを想定している。

図2に、 $R=3$ 、 $N=3$ 、 $M=9$ 、①の画像データをRGB画像として得る場合の計測データの概念図に示す。また、この条件における復元方法の詳細を図3に示す。分光画像のある1画素のスペクトルは、低空間解像度スペクトルデータから算出された3本の基底関数の線形和で表現される。この関係は、スペクトルを波長方向に低解像度化して得られるRGBの3次元情報においても同様に成り立つ。ここで、対象の画素のスペクトルのRGB値(図2の左辺)は、RGB画像の1画素として得られており、基底関数に対応するRGB値(図2の右辺)は、基底関数とRGBカメラの分光感度特性に基づいて算出できることから、未知の重み係数は、重回帰分析等で求めることが可能となる。そして、得られた重み係数を用いて、この画素のスペクトルを復元することが可能となる。

以上の議論では、計測データにのるノイズを無視していること、R本の基底関数で表現可能なスペクトルを含む小領域を設定できることを仮定しており、これらが成り立たない場合には、復元画像に誤差が生じることとなる。また、

図3 画素ごとのスペクトル復元の原理
(口絵カラー参照)

図4 波長ごとの画像復元の原理
(口絵カラー参照)

波長方向に低解像度化した計測スペクトルデータ(N次元列ベクトル)をM本並べた $N \times M$ 行列のランクがRより大きいことも復元可能な条件である。

2.2 波長ごとの画像情報復元

分光画像を単に多次元のデータと捉えた場合、空間・波長の区別は意味をなさないので、空間と波長を入れ替えて考えることが可能である。そこで、図3の復元原理において、両者を入れ替えて表現したのが図4である(ただし、画像データは3チャンネルなので基底の導出部分は省略している)。この場合、ある特定の単波長画像は、高解像度の各チャンネル画像の線形和で表現できることとなる。また、この関係は画像を空間方向に低解像度化した場合でも成り立つ。低解像度化した場合、対象とする単波長画像は低解像度スペクトルデータとして計測されているため、重回帰分析等を用いることで、未知の重み係数を決定でき、この重み係数を用いて単波長画像を復元できる。図2で示したような観測系では、図3の復元と図4の復元は数学的には同じことを示しているが、図2とは異なる観測系の場合や、後で述べるスペクトルのクラスを考える場合などには、図4の考え方を導入する必要がある。

復元可能な条件は、低解像度化したRGB画像の各チャネ

図5 スpekトルのクラスごとの復元の原理
(口絵カラー参照)

ル画像をM次元列ベクトルとしてN本並べた $M \times N$ 行列のランクがR以上であることとなる。

2.3 小領域の選択

分光画像の復元においては、少ない数R(正確には、計測データ①の画像データのチャンネル数Nよりも少ない数)の基底関数で表現可能な小領域をいかに選択するかが重要となる。実装の容易さも考慮し、これまでに複数の方法を提案している。

Piecewise Wiener推定⁴⁾では、画像を単純に矩形に分割する方法を用いる。大きな面積を占める領域において高い精度が得られる傾向があるため、分光情報に基づく正確な色再現の目的等では有効である。また、計算負荷も小さいためリアルタイム処理にも適している⁷⁾。この方法では、低解像度スペクトルの計測本数Mと同程度の数の小領域に分割するのが効率的であることが示されている。

画像内で色が似ている近傍の領域は、類似したスペクトル特性を持つことが多い。この特性に基づいて、高解像度で得られている画像信号値の類似度に基づいて画像を領域分割する方法は有効である⁵⁾。この手法では、小領域が規則正しく設定されないために、各小領域に対応したスペクトル計測が困難となるため、以下で述べる複数のスペクトルのクラスを想定した復元手法が必要となる。

2.4 複数のスペクトルクラスを想定した復元

画像信号値の類似度によって小領域への分割を行った場合、領域分割が規則的でない、小領域が一続きとならない場合などがある。このとき、低解像度で計測されるスペクトルデータが、対象とする領域の内と外にまたがって計測され、対象とする基底関数を直接求められない場合もある。

例えば、それぞれ $R1=3$ 、 $R2=3$ 本の基底関数で表現される $K=2$ つのクラスに属するスペクトルからなる小領域を考える(図5)。両クラスのスペクトルが混合して低解像度スペクトルデータが計測される場合、低解像度スペクトル

データから直接算出される基底関数は最大 $R1 + R2 = 6$ 本となる。図3のような考え方では、復元のために6チャンネルの高解像度画像が必要となる。

これに対し図4の考え方を応用すれば、 $R1$ と $R2$ の大きい方の数=3チャンネル画像から復元することが可能となることを図5を用いて説明しよう。ある波長の単波長画像は、クラス#1の画素とクラス#2の画素から構成されており、それぞれは、対応する画素のRGB画像の線形和で表現される。この関係は、画像を低解像度化した場合でも成り立つ。一方、この短波長画像を低解像度化した情報は、低解像度スペクトルデータとして計測されているので、重回帰分析等で重み係数を求めることができる。ただし、求める重み係数は、クラス#1の復元に必要な重み係数3つと、クラス#2の復元に必要な重み係数3つの合計6つとなるため、この領域内で計測される低解像度スペクトルデータは $R1 + R2 = 6$ 本以上必要である。

復元可能な条件は、低解像度化したRGB画像の各チャンネル画像をM次元列ベクトルとして $N \times K$ 本並べた $M \times (N \times K)$ 行列のランクが $R1+R2$ 以上であることとなる。

3. 実装方法と課題

高解像度画像データと低解像度スペクトルデータを、それぞれ独立した計測機器で取得する場合には、それぞれ既存の機器(カラーカメラや、分光イメージング装置など)を利用可能であるが、両者で得られたデータの位置合わせや視差の問題を解消することが課題となる。これに対し、一眼レフカメラでファインダーとフィルムへ入射する光を分けるように、一つのイメージングレンズに入射する光を両計測データに分配する場合には、上記の視差や位置合わせの問題は生じない。

現在、低解像度であればマルチスペクトル情報をリアルタイムで取得する方法が複数提案されている¹⁾²⁾。そこで、

これらの機器と高解像度のカラーカメラを組合せて複合解像度型イメージングシステムを実装することで、高解像度のマルチスペクトル動画撮影装置の実装も可能となる。これまでに、68画素のスペクトルデータをリアルタイムで取得できる装置とカラーカメラを組合せて、リアルタイム分光画像撮影システムを実装した⁷⁾。

本稿では、低解像度のスペクトルデータとして、図2に示すようなスポットのスペクトル計測を多点で行って得られるデータを想定して説明を行ったが、カラーフィルタアレイのように、チャンネル(波長)ごとに異なる点をサンプリングする場合でも、本稿で紹介した復元手法の考え方を適用することが可能である⁶⁾。一般に、マルチスペクトル画像をカラーフィルタアレイ方式で撮影しようとした場合、1色あたりのサンプリング密度が粗になるために、解像度の低下や補間誤差が問題となる。これに対し、複合解像度型の考え方を適用した場合、例えば、3枚のイメージセンサでRGBのカラー画像を解像度の劣化なく取得するとともに、N色のカラーフィルタをアレイ状に配置したイメージセンサ(MSセンサ)を用いて合計4チャンネルの画像撮影を行った後、フィルタアレイの出力を低解像度の分光情報として利用して、カラー画像と同じ解像度のNチャンネルの画像を復元することが可能となる。MSフィルタを配したイメージセンサの作成には技術的課題もあるが、RGBベイヤー配列のイメージセンサとMSセンサを組合せて2板式で実装するなどの発展も考えられるとともに、将来的には市販のデジタルカメラと同等のサイズやコストを見込める方式である。

4. むすび

本稿では、空間・波長解像度の異なる2種類の計測データを組合せて取得し、信号処理により高解像度のマルチスペクトルデータを取得する手法について、主にその復元原理に焦点を当てて解説した。この手法では、マルチスペクトル画像に含まれる空間・波長方向の冗長性を利用することにより効率的な取得が可能となるが、計測されていないデータを信号処理により復元する過程が含まれる。そのた

め、このように復元原理や限界を理解した上で利用することが重要であると考え。また今後、この原理に基づくことでリアルタイム撮影や、カラーフィルタアレイのイメージセンサの利用などの新しいマルチスペクトルイメージング技術が進展することが期待される。(2014年1月10日受付)

〔文 献〕

- 1) L. Gao, R.T. Kester, N. Nagen et al.: "Snapshot Image Mapping Spectrometer (IMS) with High Sampling Density for Hyperspectral Microscopy", Opt. Express, 18, pp.14330-14344 (2010)
- 2) W.R. Johnson, D.W. Wilson, W. Fink et al.: "Snapshot Hyperspectral Imaging in Ophthalmology", J. Biomed. Opt., 12, pp.014036-1-014036-7 (2007)
- 3) A.A. Wagadarikar, R. Jhon, R. Willett and D. Brady: "Single Disperser Design for Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging", Appl. Opt., 47, pp.B44-B51 (2008)
- 4) Y. Murakami, M. Yamaguchi and N. Ohyama: "Piecewise Wiener Estimation for Reconstruction of Spectral Reflectance Image by Multipoint Spectral Measurements", Appl. Opt., 48, pp.2188-2202 (2009)
- 5) Y. Murakami, M. Yamaguchi and N. Ohyama: "Class-Based Spectral Reconstruction Based on Unmixing of Low-Resolution Spectral Information", JOSA A 28, pp.1470-1481 (2011)
- 6) Y. Murakami, M. Yamaguchi and N. Ohyama: "Hybrid-Resolution Multispectral Imaging Using Color Filter Array", Opt. Express, 20, pp.7173-7183 (2012)
- 7) Y. Murakami, A. Tanji and M. Yamaguchi: "Development of Low-Resolution Spectral Imager and Its Application to Hybrid-Resolution Spectral Imaging", Proc. 12th Int. AIC Conf., pp.363-366 (2013)
- 8) P.S. Chavez, S.C. Sides and J.A. Anderson: "Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and Spot Panchromatic", Photo. Eng. Rem. Sens., 57, pp.295-303 (1991)
- 9) R. Kawakami, J. Wright, Y. Tai, Y. Matsushita, M. Ben-Ezra and K. Ikeuchi: "High-Resolution Hyperspectral Imaging via Matrix Factorization", Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.2329-2336 (2011)
- 10) M.J. Vrhel and H.J. Trussell: "Color Correction Using Principal Components", Color Res. And Appl., 17, pp.328-338 (1992)

村上 百合 1998年、東京工業大学総合理工学研究科修士課程修了。2000年より、同大学フロンティア創造共同研究センター助手。2008年より、日本学術振興会・特別研究員を経て、2012年より、同大学術国際情報センター特任助教。マルチスペクトル画像の撮影、処理、解析、圧縮などの研究に従事。博士(工学)。