

## 論文の内容の要旨

# Hyperspectral Data Fusion Based on Unmixing (ミクセル分解に基づくハイパースペクトルデータ融合)

東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻

横矢 直人

### 1. 背景

ハイパースペクトルカメラは約 100~200 の波長帯で画像を取得することができる。豊富なスペクトル情報を活用することで、撮像物体の物性を詳細に把握することができる。リモートセンシング分野における利用が期待されており、現在、次世代地球観測衛星として各国が衛星搭載型ハイパースペクトルの開発を進めている。従来型の 4~10 の波長帯を観測するマルチスペクトルセンサでは不可能であった、植物や鉱物の高度な品種分類が可能となる。ただし、ハイパースペクトルカメラは空間分解能が低いという問題がある。衛星搭載型ハイパースペクトルカメラは地表面をライン状に走査し、分光画像を連続的に取得するプッシュブルーム型の撮像方式を採用している。各波長帯画像のシグナルノイズ比を保つためにはマルチスペクトルカメラやパングロマトミックカメラと比べて相対的に空間分解能が低くなる。日本の次世代地球観測衛星 **Advanced Land Observation Satellite 3 (ALOS-3 : 通称だいち3号)** にはハイパースペクトルカメラとマルチスペクトルカメラで構成される **Hyperspectral Imager SUite (HISUI)** と、ステレオ視機能を有するパングロマトミックカメラが搭載される。3つのセンサの概要は表 1 の通りである。パングロマトミック画像を用いてマルチスペクトル画像の空間分解能を向上させるパンシャープンについては多くの研究がなされてきた。しかし、スペクトル情報を保ちつつ空間分解能を上げることは容易ではなく、ハイパースペクトル画像の高空間分解能化に関する研究は進んでいない。本研究の目的は、ハイパースペクトル画像をマルチスペクトル画像やパングロマトミック画像と融合することで高空間分解能なハイパースペクトル画像を生成することである。豊富なスペクトル情報を用いて撮像範囲に存在する物質（端成分）とその含有率を推定する「ミクセル分解」を応用することで、スペクトル歪みの少ない高精度なデータ融合を達成する。また、データ融合に必要な複数センサ間の相対的装置関数を観測画像から推定するクロスキャリブレーション方法を示す。最後に、本データ融合が植生の品種分類に与える影響についても述べるとともに、データ融合に基づく新しいセンサ設計を検討する。

表 1. ALOS-3 に搭載される光学カメラの概要

	スペクトル性能	地上分解能	撮像幅
ハイパースペクトルカメラ	0.4-2.5 $\mu\text{m}$ : 185 波長帯	30 m	30 km
マルチスペクトルカメラ	0.4-0.9 $\mu\text{m}$ : 4 波長帯	5 m	90 km
パングロマトミックカメラ	0.4-0.9 $\mu\text{m}$ : 1 波長帯	1 m	50 km

### 2. ミクセル分解

ミクセル分解を行う際には、現実世界の複雑な光の反射現象を近似するスペクトル混合モデルが重要となる。線形スペクトル混合モデルでは地表面の物質は全て平坦とし1次反射光のみを考慮する。この場合、ハイパースペクトル画像の各ピクセルで得られるスペクトルは、端成分スペクトルの線形混合で表せる。既に撮像範囲に存在する物質とそのスペクトルがわかっている教師ありのミクセル分解では、端成分の含有率推定は2次計画法によって解くことができる。撮像範囲にある端成分がわからない教師なしの場合は、まず端成分のスペクトルを推定する必要がある。1つのピクセル内が単一の物質のみで埋め尽くされている場合、これをピュアピクセルと呼ぶ。全ての端成分に対して観測画像内に少なくとも1つのピュアピクセルが存在する場合、端成分は多次元空間内に

広がるデータクラウドにおいて、多面体の頂点に位置する。この現象を利用した端成分抽出手法には様々な手法が提案されている。しかし、多くの場合はこのピュアピクセル仮定が成り立たない。ピュアピクセル仮定が成り立たない場合でも、ピュアピクセル仮定に基づいた結果を初期値に設定し、より正確な解を求める手法として非負値行列分解が注目されている。また、近年は単純な線形スペクトル混合モデルでは現実世界を記述できないとし、2次の反射光まで考慮する非線形スペクトル混合モデルとして双線形スペクトル混合モデルが提案されている。著者はこの双線形スペクトル混合モデルを解く新しい最適化手法として準非負値行列分解の応用を提案した。提案手法は既存の最適化手法よりも計算コストが少なく推定精度も良いことを示した。

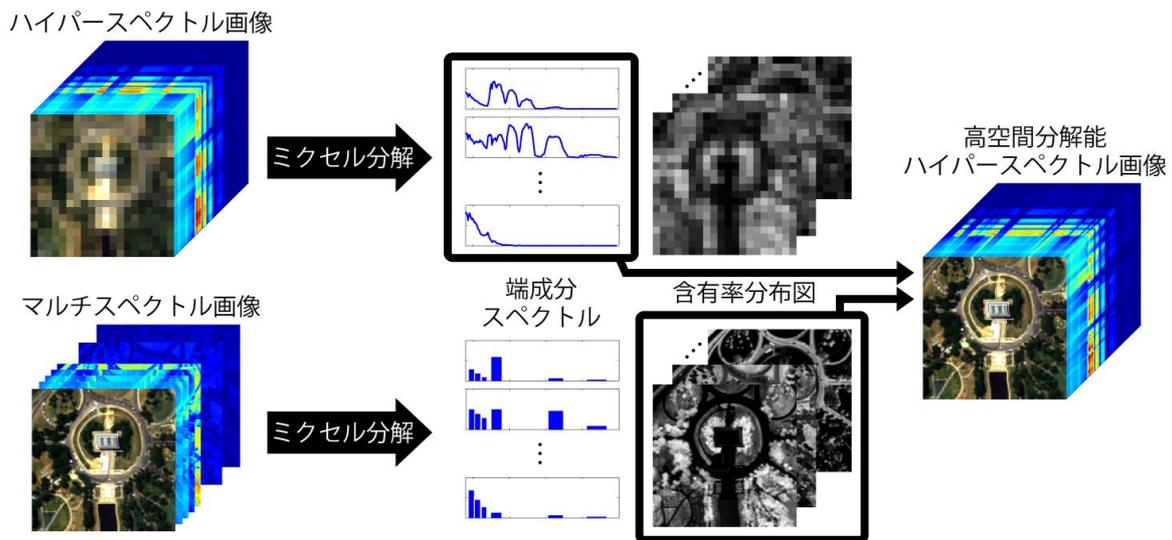


図1 連成非負値行列分解の概要

### 3. 連成非負値行列分解を用いたデータ融合

ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像を融合し高空間分解能なハイパースペクトル画像を生成する新規手法として連成非負値行列分解を提案した。本手法は、ハイパースペクトル画像とマルチスペクトル画像に対して交互にミクセル分解を適用する。ハイパースペクトル画像から得られる高スペクトル分解能な端成分スペクトル情報と、マルチスペクトル画像から得られる高空間分解能な含有率分布情報を組み合わせることで高空間分解能なハイパースペクトル画像を生成することができる。連成非負値行列分解は本博士論文の根幹をなすアルゴリズムであり、その概要を図1に示す。本手法はパンクロマティック画像を用いたハイパースペクトル画像の高空間分解能化にも拡張可能であることを実証した。ただし、スペクトル情報が無いパンクロマティック画像と融合した場合、スペクトルの歪みは避けられない。また、準非負値行列分解を用いた双線形ミクセル分解を連成非負値行列分解に組み込むことで、2次反射光を考慮したスペクトル混合モデルに基づくデータ融合手法を開発した。計算時間が増大するという問題があるものの、線形スペクトル混合モデルに基づくデータ融合よりも優れた性能を示した。これは、実際のスペクトル混合モデルには線形モデルでは記述できない非線形が含まれていることを示唆している。

### 4. クロスキャリブレーション

複数の光学カメラを用いたデータ融合においてはスペクトル応答関数や点分布関数といったセンサ特性の相対的な関係性が重要である。特に、連成非負値行列分解の中で用いられる相対的スペクトル応答関数は最終的な融合画像の性能に大きな影響を与えることが実験的にわかっている。観測画像のみから相対スペクトル応答関数を推定する手法を提案した。ハイパースペクトルカメラのスペクトル応答関数のスペクトル幅は相対的に非常に狭いことから、それらの線形混合によってマルチスペクトルカメラやパンクロマティックカメラのスペクトル応答関数を近似することができる。各波長帯画像はそれぞれのスペクトル応答関数がカバーする波長帯の光のエネルギーを反映している

ので、観測画像についても全く同じ線形近似が成り立つといえる。この近似に基づいて、線形近似の誤差を最小化することで相対的なスペクトル応答関数を求めることができる。打ち上げ前の特性を考慮し、観測画像から軌道上での相対スペクトル応答関数の推定手法として2次計画法を用いる新規手法を提案した。EO-1/Hyperion（ハイパースペクトルカメラ）画像と Terra/ASTER（マルチスペクトルカメラ）画像に本手法およびデータ融合を適用しその有効性を示した。

## 5. データ融合画像の利用

連成非負値行列分解によって生成した高空間分解能ハイパースペクトル画像が、データ利用に与える影響を植生の分類によって調べた。牧草分類のシミュレーションでは、低空間分解能なハイパースペクトル画像やマルチスペクトル画像では正確に分類できなかった品種レベルでの植生分類が融合画像によって可能になることを示した。この結果は、融合画像のスペクトル歪みは非常に少なく、本来ハイパースペクトルカメラに求められているスペクトル精度を保ったまま高空間分解能化することに成功したことを示唆している。また、データ融合による高次画像データ生成を前提とし、ハイパースペクトルカメラとマルチスペクトルカメラを組み合わせたセンサ設計を検討した。ミクセル分解の精度が最終的な融合画像の品質に大きな影響を与えており、空間分解能の組み合わせに最適な組み合わせがあることを示した。

## 6. 結論

本博士論文では、ハイパースペクトルカメラをマルチスペクトルカメラやパナクロマティックカメラと組み合わせて使うことで高空間分解能なハイパースペクトル画像を生成するデータ融合手法を提案した。本手法は撮像範囲に含まれる物質とその含有率を推定するミクセル分解を応用したものであり、大きなスペクトル歪みを引き起こさずにハイパースペクトル画像を高空間分解能化することに成功した。また、データ融合に不可欠な相対的センサ特性を撮像画像のみから推定する手法を開発し、その有効性を実証した。ハイパースペクトルカメラの長所であるスペクトル情報と、従来型カメラの空間情報をソフトウェアによってうまく組み合わせることでハードウェアの限界を越える高スペクトル・高空間分解能画像の生成を実現した点において本研究は独創的である。従来型カメラの空間分解能で詳細かつ正確な物性の推定が可能になるため、ハイパースペクトル画像の応用分野に大きなブレークスルーをもたらすことが期待できる。また、本データ融合手法は、単独のハードウェアにおける限界を、ソフトウェアと複数センサで解決するものであり、新しい衛星センサ設計の可能性を示した点において宇宙工学上貢献するところが大きい。