

はじめに

過去十年もの間、ハイパースペクトル画像処理は活発な研究開発の分野でした。また、ハイパースペクトル画像は研 究者だけが利用できるものでした。最近、商業目的の航空機搭載ハイパースペクトル画像処理システムが出現し、人 工衛星に搭載されたセンサーの打ち上げによって、ハイパースペクトル画像処理は遠隔探査の主流になりつつありま す。ハイパースペクトル画像は資源管理、農業、鉱物探査、環境監視などの様々な分野に適用されています。しかし、 ハイパースペクトル画像を効果的に利用するには、データの性質や限界、およびそれらの処理や解釈についての様々 なアプローチの仕方を理解しておくことが必要です。この冊子はハイパースペクトル画像処理という分野の基本概念 の手引きとなることを目的としています。

サンプルデータ この冊子の中の図には、ネバダ州のカプライトのハイパースペクトル・シーンを分析した結果を示 しているものがあります。このシーンは NASA ジェット推進研究所によって運営されている AVIRIS(航空機搭載可 視 / 赤外画像処理スペクトルメータ)を使用して得たものです。同じシーンがもう一方の冊子、『TNT 入門:ハイパー スペクトル画像の解析』の練習問題でも使用されています。マイクロイメージ社のウェブサイトからこのシーンが TNTmips プロジェクトファイルのフォーマットで関連するサンプルデータとともにダウンロードできます。マイクロ イメージ社に問い合わせていただければ、無料で CD-R を入手することもできます。

その他の資料 この冊子は、ハイパースペクトル画像処理の一般的な入門書を目的としています。TNTmips では、 ハイパースペクトル画像は Hyperspectral Analysis (ハイパースペクトル解析) 処理 (TNTmips のメインメニューよ り Image/Hyperspectral Analysis を選択してください。) により処理され、解析されます。この処理についての紹介 は『TNT 入門:ハイパースペクトル画像の解析』をご覧ください。また背景の情報を知りたい場合は『TNT 入門:環 境リモートセンシング入門 (RSE; Introduction to Remote Sensing of Environment)』をご覧ください。

TNTmips Pro,Basic, および Free TNTmips には3つのバージョンがあります。TNTmips Pro (ソフトウェア・ラ イセンスキーが必要です)、廉価版の TNTmips Basic、そして TNTmips Free です。本書ではどのバージョンもみな 「TNTmips」と呼ぶことにします。 TNTmips Basic と TNTmips Free は TNTmips Pro と機能は同じですが、プロジェ クト内で扱える地理空間オブジェクトや属性テーブルのサイズに制約があります。

\sim					>
(目次			
	ハイパースペクトル画像処理へようこそ	3	反射率変換	14	
	画像スペクトルメーター	4	反射率変換॥	15	
	スペクトルの反射率	5	画像解析方法	16	
	鉱物スペクトル	6	ピクセル毎にスペクトルを照合する	17	
	植物スペクトル	7	スペクトルマッチングの手法	18	
	スペクトルのライブラリ	8	線形分離(Linear Unmixing)法	19	
	スペクトル空間におけるスペクトルのプロット・	9	画像エンドメンバー(端成分)の定義	20	
	空間解像度とスペクトルの混合	10	部分分離	21	
	放射輝度と反射率	11	参考文献	22	
	照度要因	12	地理空間解析のための先進的ソフトウエア	24	
	大気効果とセンサ効果	13			
					1

Randall B. Smith 博士 2012 年 1 月 5 日

一部のイラストでは、カラーコピーでないと重要な点がわかりにくい場合があります。マイクロイメージ社のウェブサ イトから本書を入手されれば、カラーで印刷したり表示できます。また、このウェブサイトからは、『TNT 入門』のそ の他のテーマに関する最新の入門書も入手できます。インストールガイド、サンプルデータ、および最新バージョンの TNTmips をダウンロードできます。アクセス先は次の通りです。

http://www.microimages.com

ハイパースペクトル画像処理へようこそ

Landsat Thematic Mapper や SPOT XS などのマルチスペクトル遠隔セン サーは、幾つかの比較的幅広の波長帯域で画像を撮影します。一方、ハィ パースペクトル遠隔センサーは、それと同時に数十から数百もの幅が狭 く隣接するスペクトル帯域で画像を収集します。これらの計測によって、 下図のように各々の画像セルについての連続なスペクトルを得ることを 可能にします。センサー、大気や地形の影響を除去した後、地表にある 特定の植生なのか、あるいは鉱床を示唆する特徴的な鉱物なのかを判断 するためにこれらの画像はフィールドあるいは実験室での反射スペクト ルと比較されます。

ハイパースペクトル画像はさまざまなデータを含んでいますが、それら を解釈するには地表物質のどのような性質を計測しようとしているのか、 そしてそれらが実際にハイパースペクトルセンサーによる計測にどう関 係しているかということを完全に把握することが要求されます。



ハイパースペクトルセンサー の技術的背景は4ページに示 されています。5ページから 10ページでは自然に存在する

物質のスペクトル反射、n次元スペクトル 空間内のペクトルとしてのスペクトル、そ してスペクトルの混合にこれらの概念が 紹介されています。画像内で計測された 放射の値に寄与する要素について11ペー ジから13ページに示されています。その あとに、放射から反射へ変換する方法を1 4ページから15ページに示します。ハイ パースペクトル画像を分析する方法につ いて、16ページから21ページに述べられ ています。そして、22ページから23ペー ジには、参考文献が書かれています。



たくさんの狭く隣接した波長帯域で同時に撮影した画像。

画像スペクトルメータ

ハイパースペクトル画像は、画像スペクトルメータ(分光器)という機器を使ってデータ収集されます。これらの複 雑なセンサーの開発には、互いに関係するが全く異なる2つの技術が集積されています。それは、**分光学**と地球およ び惑星表面の**リモートセンシング技術**です。

分光学とは、物質から放射したり反射される光や波長によるエネルギーの変化を研究する学問です。光学的リモート センシングの分野に適用し、分光学では地球表面の物質によって拡散反射(散乱)される太陽光のスペクトルを扱い ます。スペクトルメータ(あるいはスペクトルラジオメータ)と呼ばれる機器は、テスト試料から反射された光を地 表あるいは、実験室で測定するのに使われます。

スペクトルメータ内部の回折格子やプリズムのような光学分散素子は、このような光を多くの細く隣接する波長領域 に分け、各領域のエネルギーと別々の検出器により測定します。数百あるいは数千の検出器を使う事により、最低で も 0.4 から 2.4 マイクロメートル(可視から中間赤外線の波長領域まで)といった広い波長領域にわたって、スペク トルメータで 0.01 マイクロメートルという細かさの帯域でスペクトルを計測することができます。

遠隔撮像装置は、地球表面上の多くの隣接するエリアで反射される光に焦点をあて、計測するように設計されていま す。多くのデジタル撮像装置では、規則的な幾何パターンにそってセンサープラットフォームが動くとともに、小区 間での連続的な測定をし、1 つの画像として組み立てる処理を行います。最近まで、検出器の設計の制限やデータ記 憶装置および通信、画像処理からの要求により、撮像装置は 1 つあるいは少数の比較的広い波長領域に制限されてい ました。これらの分野における最近の発展により、地表での計測に匹敵するほどのスペクトル範囲と解像度を持つ撮 像装置を設計することが出来るようになりました。



スペクトルの反射率

反射光の分光学で、我々が獲得したい基本的な性質は**スペクトルの反射率**、すなわち、波長の関数としての反射エネ ルギーと入射エネルギーの比です。ある波長におけるエネルギーはそれぞれ異なる割合で散乱、あるいは吸収される ので、ほとんどの物質の反射率は波長によってさまざまです。異なる物質のスペクトル反射率曲線(縦軸:反射率、横軸: 波長)を比較すると、反射率が一様でないことは下図に示すように明らかです。スペクトル曲線が下方へ凹んでいる 場所は、物質が入射エネルギーを選択的に吸収する波長領域を示します。これらの特徴は、一般に**吸収帯域**(それと は別のマルチスペクトルあるいはハイパースペクトル画像の**画像帯域**と混同しないように)と呼ばれています。スペ クトル曲線および吸収帯域の位置と強度といったグラフ全体の形によって、多くの場合、異なる物質と判定し、識別 するのに利用できます。例えば、植物は近赤外部の領域でより高い反射率を示し、赤い光では土壌より低い反射率を 示します。



地球表面にあるいくつかの一般的な物質の可視光線から赤外部までのスペクトル反射率曲線。いくつかのマルチスペクトル衛星 リモート・センサーに使われているスペクトル帯域を比較のため上部に示します。反射率は0から1.0までの単位のない量あるい はこのグラフのように百分率で表します。試料のスペクトル計測をフィールドあるいは実験室で行う場合、入射エネルギーの値 もその物質の反射率を計算するのに必要です。これらの値は、直接的に、またはスペクトル反射率が既知の標準試料から(試料 と同じ照射条件において)反射される光の計測によって得られます。

鉱物スペクトル

鉱物のような無機物では、化学組成や結晶構造がスペクトル曲線の形や明瞭な吸収帯域の存在と位置を決めます。あ る特定の波長が吸収されるのは、特定の化学元素やイオンの存在、イオン化した元素、元素間の化学結合の幾何学的 構造によって引き起こされる可能性があり、これは部分的には結晶構造によって左右されます。

これらの影響の例を示すためにいくつかの一般的な鉱物のスペクトルを下図に示しています。

赤鉄鉱 (酸化鉄の鉱物のひとつ)のスペクトルでは、可視光領域での強い吸収は鉄イオン (Fe⁺³) によって起こりま す。石灰石の主要成分である方解石では、1.8 から 2.4 μ m (マイクロメートル)の間にある吸収帯の連なりは、炭 酸イオン (CO3⁻²)が原因です。カオリナイトとモンモリロナイトは共に土壌に含まれる粘土鉱物として一般的です。 両スペクトルともに 1.4 μ m 付近に強い吸収帯があり、それに続きカオリナイトの方は、水酸化物イオン(OH⁻¹)によっ て 1.9 μ m の弱い帯域、モンモリロナイトの方は、含水粘土の中の間隙水の分子による 1.9 μ m の強い吸収帯があ ります。これらの例とは対照的に、みかげ石内の主鉱物である正長石は、可視部から中間赤外部のスペクトル領域に 顕著な吸収帯は見られません。



いくつかの代表的な鉱物の反射スペクトル(岩石や土壌の主成分である天然化学化合物)。

植物スペクトル

緑色植物のスペクトル反射率曲線も植物の様々な性質によって左右される特徴的な形をしています。スペクトルの可 視部では、曲線の形は葉緑素や他の葉の色素による吸収効果に支配されています。葉緑素は可視光を非常に効率的に 吸収しますが、緑の光よりも青や赤い波長を強く吸収するため、緑の波長領域に特徴のある反射率のピークを作りま す。その結果、植物は緑色をしているようにみえるのです。反射率は、赤色から近赤外部の波長(時に**赤の端**と呼ば れることがあります)の境界にかけてほとんどの植物が 40% から 50% 付近まで急激に上昇します。近赤外部側の高 い反射率は、主に葉の内部の細胞構造との相互作用によるものです。余剰のエネルギーのほとんどは、樹冠の中の下 部の葉に送られ、互いに作用するのです。葉の構造は植物の種によって大きく異なり、また、植物のストレスの結果 として変化することもあります。従って、種の型および植物のストレス、樹冠の状態、すべてが近赤外部の反射率に 影響を及ぼします。波長が 1.3 μ m を越えると、1.4 と 1.9 μ m 付近の 2 つの明白な水分吸収帯域を除いて、波長 が大きくなるにつれて反射率が減少します。

成長期の終わりに、葉は水分と葉緑素を失います。近赤外部の反射率は減少し、赤の反射率は増加します。そして、 おなじみの秋の黄色や茶色や赤の葉の色が作られます。



異なった型の緑色植物の反射率スペクトルと、老衰した(乾燥して黄色い)葉のスペクトル曲線の比較。 緑色植物のスペクトル曲線が大きく変化するのは、図の上部に示すように、波長によって機能する植物の 構成要素が異なるためです。

スペクトルのライブラリ

天然の、あるいは人工の物質の反射率スペクトルのいくつかのライブラリは公開されています。これらのライブラリ はハイパースペクトルおよびマルチスペクトル画像の解釈の手助けとなり得る参照スペクトルのソースを供給してい ます。

1) ASTER スペクトルライブラリ このライブラリは、地球観測衛星に搭載されたセンサー ASTER (the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) による画像処理支援プログラムの一部として NASA が公開したものです。 NASA のジェット推進研究所、ジョン・ホプキンズ大学、そして米国地質調査所 (Reston) による スペクトルの編集も含まれます。現在、ASTER スペクトルライブラリには鉱物、岩石、土壌、人工合成物質、水、雪を含むおよそ 2000 種のスペクトルがあります。スペクトルの多くは、0.4 から 14 µ m の全波長領域に対応しています。そのライブラリは URL:< https://asterweb.jpl.nasa.gov/> よりアクセスできます。カテゴリーでスペクトルを検索することができ、検索したスペクトルのグラフを見ることができ、さらにテキストファイルとして個々のスペクトルのデータをダウンロードすることもできます。これらのスペクトルもイブラリの CD-ROM を無償で注文することもできます。



ASTER スペクトルライブラ リのサンプルスペクトル。 ASTER は、計画中の人工衛 星 EOS AM-1 の装備品の一 つであり、NASA の地球科学 事業計画の一環として、可 視光から熱赤外線の波長領 域の14 チャンネルで画像 データを記録します。

2) USGS スペクトルライブラリ コロラド州デンバーにある米国地質調査所の分光学研究所は、波長領域 0.2 から 3.0 *µ* m にわたって鉱物および一部の植物を含む約 500 種の反射率スペクトルのライブラリを編集しました。このライ ブラリにはオンラインでアクセスできます。

URL: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib04/spectral-lib04.html>

オンラインで個々のスペクトルについて見たり、ライブラリを丸ごとダウンロードできます。USGS スペクトルライ ブラリは、標準的な参照ライブラリとして TNTmips のハイパースペクトル解析処理にも含まれています。

スペクトル空間におけるスペクトルのプロット

前ページまでのスペクトルのプロットは、異なる物質間のスペクトル特性の違いを、少数のスペクトルで比較すると きに視覚化するのに便利な方法です。スペクトルプロットはハイパースペクトル画像を調べる重要な道具です。しか しコンピュータが多くのスペクトルを比較し識別する方法を理解する場合には、スペクトルを表す他の概念的な方法 を考えるのが便利です。



反射率スペクトルのN次元プロット。 2バンドの場合 (n=2)。 反射率スペクトルは(波長とともに変化する)一連の反射率の値で 構成されます。各スペクトルチャンネル(バンド)に対して一つ の反射率の値が割り当てられます。スペクトルチャンネルの数を n としたとき、これらのチャンネルそれぞれが仮想的な n 次元スペ クトル空間の一つの次元と考えられます。各スペクトルチャンネ ルに対して計測された反射率の値をそれぞれの座標軸上にプロッ トすれば、これらの座標を使ってスペクトル空間内に特定のスペ クトルを数学的に表す点の位置を指定することができます。2 バン ドの場合の簡単な例を図に示します。また、示された点は、始点 が座標系の原点であるベクトルの終点として数学的に捉えること ができます。同じ形ではあるが全体的な反射率(アルベド)が異 なるスペクトルは、向きが同じで、始点から終点までの距離が異 なるベクトルとしてプロットされます。短いベクトルは暗いスペ クトルを表し、長いベクトルは明るいスペクトルを表します。

4 つ以上の波長帯域を持つ画像に対してベクトルのプロットを視覚 化することは難しいかもしれませんが、非常に多くの互いに垂直 に交わる座標軸によって定義される高次元スペクトル空間を数学

的に構成することは可能です。想定される各スペクトルは、この n 次元スペクトル空間内に位置します。スペクトル 間の類似性は、これらの位置の相対的な近さ(スペクトル距離)か、スペクトルベクトル間の角度の小ささで判断で きます。

前出の様々な物質のスペクトル反射率曲線は全て平均値や典型的な例を示しています。天然に存在する物質は全て組 成や構造に関してある程度の変動があり、反射率スペクトルが変動します。1つの物質でも多くのサンプルからスペ クトルを得れば、スペクトルの点は n 次元スペクトル空間のある一箇所にプロットされるというより、小さな群れの 塊として定義されるでしょう。

空間解像度とスペクトルの混合

画像スペクトルメータは、地球表面のスペクトルを多くの小さなパッチの集まりとして計測します。それらのパッチ はハイパースペクトル画像内で1つのピクセル(ラスタセル)として表されます。1つのスペクトル計測によって表 される地表エリアの大きさは、画像の空間解像度を定義し、それはセンサの性能と地表面からの高度に依存します。 例えば、NASAのAVIRIS(航空機搭載可視 / 赤外撮像スペクトルメータ)は通常の高度 20km を飛行の際、20mの 空間解像度がありますが、

高度 4km の場合は解像度は 4m になります。

地表解像度を表すセルサイ ズが大きいときは、複数の 物質がスペクトルの計測値 に影響すると考えられます。 結果としてスペクトルの合 成あるいは混合が生じ、元 の純粋な各成分のスペクト ルをエンドメンバー(端成 分)スペクトルと呼びます。

スペクトルの混合には、成 分となる粒子が分かれて巨 視的に混合している場合と、



二つのスペクトルの線形混合からなる混合スペクトルの例:A(乾燥した土)とB(緑の草原)

微視的により一体となって混合している場合があります。巨視的な混合の場合、反射するそれぞれの光子は1つの表 面物質のみと相互作用します。物質から反射するエネルギーはピクセル内の面積に正比例するように加算されます。 そのような線形な混合の一例が上のグラフに示されており、植生(B)と土(A)から成るスペクトルの混合を表して います。スペクトル空間では個々のエンドメンバースペクトルは混合線の両端であったり(2つのエンドメンバーの 場合)、もしくは空間の隅(3つ以上のエンドメンバーの場合)を占有します。後で各ピクセルに対してエンドメンバー の割合がどのように計算されるかを説明します。微視的な混合の場合、例えば土壌中の鉱物粒子が微視的に混合する 場合、1つの光子は複数の物質と相互作用します。このような微視的な混合では非線形の特性を示し、割合を解き明 かすのはより難しくなります。



放射輝度と反射率

前ページの説明から、スペクトル反射率が航空機または衛星搭載ハイパースペクトルセンサを用いて厳密かつ正確に 計測したい地物の特性であることは明らかなはずです。しかし、下の図に示される輝度のスペクトルに注目してくだ さい。これはネバダ州カプライトのシーンにおいて、明るい枯渇した湖底の表面を AVIRIS によって計測した 25 画 像スペクトルの平均を表しています。入力スペクトルはセンサ効果に対してオンボード較正データを用いて調整され ていますが、他の変換は行われていません。



このスペクトルには以前に示された反射率スペクトルの図とあまり類似性が見られません。これはセンサが単に各波 長バンドに関してセンサに到達した光量を計測しただけだからです(スペクトル放射)。この場合、高度 20km から 計測しています。地表面物質のスペクトル反射率はこれらの計測値に影響する要素の1つに過ぎません。サンプルエ リアのスペクトル反射率曲線は実際には比較的平らで特徴がありません。

表面反射率に加え、リモートセンサによって計測されるスペクトル放射輝度は、入射する太陽エネルギーのスペクト ルや大気中をこのエネルギーが上向きまたは下向きに通過する際の相互作用、地上での個々のエリアの照射条件、セ ンサシステムの特性などの要素によって左右されます。これらの付加的な要素は地表面のスペクトル反射率を正確に 取得するのに影響を与えるだけではなく、個々の画像セル間の比較を妨げる二次的なシーン内部の変動を生みます。 これらの要因に関しては次の2ページにわたってより詳しく説明しています。

照度要因

照度源 下の図は地球の大気圏上層部における典型的な太陽光放射照度曲線です。入射太陽エネルギーは波長によっ て大きく変化し、可視波長域で最大になります。画像の放射輝度値を反射率に変換するために、画像が得られた時に 入射した太陽エネルギースペクトルを知る必要があり、仮定したり、他の値から間接的に導いたりして把握しなけれ ばなりません。



照射角度地上エリアによって反射されるエネルギー量は、太陽エネルギーがどれだけそのエリアを照らしているか によって決まります。それは**入射角**によって定まります。入射角は地表面に直交する線とエネルギー入射方向とがな す角です。明確には、それぞれの波長において受け止められるエネルギー(Eg)は入射角の Cosine によって変化します。 Eo を入射エネルギー量とすると、Eg=Eo × cos θ。すなわち、地表面によって受け止められるエネルギーは季節や1 日の時間経過に伴う太陽の高さによって変化します。もし地形が平らでなければ、受けるエネルギーは地面の勾配や 方角の違いによっても画像間で変わります。



A,Bのように入射角(*θ*)の差によって照度の差が生じます。 **C**の場合、影のエリアは照度がゼロになります。

影 1つのエリアで受け止められる照射量は影によっても減少します。地形的な特徴や雲によって生じた影は隣接する画像セルを含むエリアに影響を及ぼします。木々、作物の列、露出した岩盤やその他の小さな物体も画像セルに影を生じさせます。これらの影は影響するピクセルに対して全波長にわたって輝度を小さくする効果があります。

大気効果とセンサ効果

大気効果 比較的クリアーな大気でさえ、入反射太陽エネルギーと影響し合います。特定の波長に対してこのような 影響は地面に到達する入射エネルギー量を低減させ、更に航空機や人工衛星に搭載したセンサに到達する反射エネル ギーの量も低減させます。大気の透過率は特定の気体による吸収や気体分子や微粒子による散乱によって低減されま す。これらの効果が組み合わされて、下図に示される透過率曲線が作られます。1.4 と 1.9 μ m 付近の著しい吸収特 性は水蒸気と二酸化炭素によるもので、入反射エネルギーのほとんど全てを低減させてしまいます。その結果、この 波長域付近の画像バンドからは役立つ情報はほとんど得られません。大気によって上方に散乱される光の効果はこの 曲線には示されていません。この散乱された光は可視光と近赤外線波長域のセンサで測定される放射輝度に付加され ています。これを光路輝度(Path Radiance)と呼びます。大気条件が空間的に変化している場合や、著しい高度差があっ て地表面に至るまでに大気を通る放射の光路長が変化する場合は、一つのシーン内のエリア間においても大気効果が 異なることがあります。



典型的な大気条件における大気透過率と波長の関係。透過率は地表面に到達する入射太陽エネルギーの割合 です。表示されている気体による吸収は著しい曲線の降下を起こしています。一方、散乱のため近赤外から 可視光の波長域において波長が短くなるにつれて透過率がなだらかに降下しています。

センサ効果 センサはそれぞれの波長域で計測された放射輝度を"コード化された"放射輝度値を示す電子信号に転換します。この電子信号は不連続の整数値にスケール化され、量子化されています。整列した検知器間での変動や検知器の経時的変動のため、計測値はスケーリングやオフセットにより比較できる値に正規化されます。

反射率への変換Ⅰ

ハイパースペクトルの画像スペクトルを基準となる反射スペクトルと直接比較するためには、画像内のコード化され た放射輝度値を反射率に変換する必要があります。包括的な変換を行うには太陽源スペクトル、太陽の高度と地形に よる照射効果、大気伝達とセンサ・ゲインを考慮する必要があります。数学的には地表面反射スペクトルとこれらの 効果を(波長毎に)掛けることにより観測放射輝度スペクトルが作り出されます。他に2つの効果が加算されるかた ちで放射輝度スペクトルに影響します:センサ・オフセット(内部計器ノイズ)と大気の散乱による光路輝度です。 一般的に用いられるいくつかの反射率変換法については以下と後のページで説明しています。画像から得られる情報 のみを用いる方法もありますし、表面反射特性と画像が撮影された時間の大気条件という変化しうる情報を必要とす る方法もあります。

フラット・フィールド変換 この画像情報をベースとする方法は、画像が比較的平らなスペクトル反射曲線を持つ均 一的なエリアを含んでいることが必要です。このようなエリアの平均スペクトルは太陽放射照度、大気の散乱と吸収 の合成効果によって決定されていると考えられます。シーンは個々の画像スペクトルを均一エリアの平均スペクトル で割ることによって"相対"反射率に変換されます。選択された均一エリアは変換における画像ノイズ効果を低減さ せるために明るくなければなりません。自然地形における大半の物質は完全に平らな反射スペクトルを持たないため、 多くの場合これに適した均一エリアを見つけるのは困難です。砂漠のように水がなくなり塩で覆われた湖床などは比 較的平らなスペクトルを持ち、都会では人工的に造成されたコンクリートなどがあります。均一エリアのスペクトル 内の著しいスペクトル吸収特性はすべて、算出された相対反射スペクトル内に偽の特性を生み出します。シーン内に 著しい高度変化がある場合は、変換されたスペクトルには地形の影と大気光路差の残差効果が混入しています。

平均相対反射率変換 この方法は画像スペクトルを平均スペクトルで割ることによって正規化しますが、平均スペクトルは画像全体から算出します。平均スペクトルを算出する前に個々の画像スペクトルの放射輝度値はそれらの和が 画像全体において一定になるようスケール化されます。この調整は地形による影や他の輝度変化の大部分を除去しま す。この方法はスペクトル反射特性の空間的変化が打ち消し合うほど充分にシーンが不均一であると仮定しています。 そのため、上述したフラット・フィールド・スペクトルと似た平均スペクトルが得られます。この仮定は全てのシー ンで正しいわけではなく、正しくない場合は偽のスペクトル特性を含む相対反射スペクトルを作り出してしまいます。

反射率への変換 ||

前のページで説明した画像を基にした変換法は、画像スペクトルに乗法的な影響を与えます。この方法を用いた大半 の研究は、大気光路輝度の加算効果が最小となる短波赤外スペクトル(2.0 ~ 2.5 µ m)を利用した鉱物地図作成に 重点を置いています。しかし、解析されるスペクトルが可視光と近赤外付近を含んでいる場合は、光路輝度効果を無 視することはできません。シーンに暗い物質や深い地形の影が含まれている場合は、各バンド内の最小輝度値(また は影領域の平均値)を求め、その値をバンド内の各ピクセルから引くことによっておおよその補正を行うことが出来 ます。

一次式を用いた経験的な方法 ハイパースペクトル画像を利用しているフィールド研究者は普通、画像エリア内の現場で観測した反射率の値を用いて画像データを反射率に転換しています。フィールド反射率スペクトルは二つ以上の均一な地上ターゲットエリアから得なければなりません。ターゲットエリアは大きく異なる輝度を持ち、画像内で認識できるだけの広さがなければなりません。ターゲットエリアの画像放射輝度と地上反射率の値を用いて、個々の画像バンドに対して放射輝度と反射率を関連付ける一次方程式を得ることが出来ます。放射輝度と反射率のプロットで、計算された直線の傾きは放射輝度に対する掛算的な合成効果(ゲイン)を表し、放射輝度軸との交点は加算要素(オフセット)を表します。そして、これらの値は各画像バンドを簡易的に反射率に変換するのに用いられます。変換は起こりうるシーン内の地形効果(影や大気光路長の差)を考慮していないため、最終的な値は"見かけ上"の反射率と考えた方がよいでしょう。

モデルによる方法 放射伝達コンピュータモデルは太陽放射照度ス ペクトルのシミュレートから始め、太陽高度(シーンの日時から導 かれる)や大気の散乱と吸収によるシーン放射輝度効果を算出しま す。実際の大気条件の観測値が得られない場合、ユーザーは散乱を 引き起こす物質の量や分布等のいくつかの入力パラメータを仮定し なければなりません。よく混ざった気体(CO₂ とO₂)による吸収 はシーン内において均一であると仮定されますが、水蒸気による吸 収は通常、変化するものとしてと仮定されます。水蒸気による吸収 効果は水吸収バンドを含むスペクトル部分を活用し、それぞれの画 像ピクセルにおいて個別に推測され補正されます。しかし、最終的 な見かけ上の反射率の値には地形による影の効果も組み入れられま す。



反射率

既知のターゲット反射率を用いた単独画像 バンドの反射率変換パラメータ

ハイパースペクトル画像の解析手法

下の表は現在研究や商業用に使われているいくつかのイメージングスペクトロメータを並べたものです。これらのセ ンサーによって作り出されたハイパースペクトル画像は解析者に課題を与えます。それらは地表物質のスペクトル特 性を特徴付けるのに必要な高いスペクトル解像度を与えますが、1シーンのデータ量は莫大であることがあります。 隣接した二つの波長バンド間のスペクトル情報の違いは普通は非常に小さく、よってそれらのグレースケール画像は ほぼ同じに見えます。そのため、シーン内のデータの大部分が冗長に思えますが、地表物質を見分けるのに不可欠な 情報が埋め込まれています。ハイパースペクトルシーン中の本質的な情報を可視化して解析するための適切な道具と アプローチを見つけることが、活発な研究を行っていく上で大事です。

ハイパースペクトル画像解析を行うためのアプローチの大半が個々の画像セルのスペクトル情報に集中しており、 個々のバンド又はバンドグループ内の空間的な変動ではありません。マルチスペクトル画像によく使われる統計的分 類法(クラスター分析)もハイパースペクトル画像に活用できますが、データの持つ高い次元性(Landgrebe:参考 文献参照)に対応できるように適応させなければなりません。より複雑な方法は、スペクトル解析と空間解析を組み 合わせています。後のページではよく知られたハイパースペクトル画像のスペクトル成分解析法のいくつかを詳しく 説明します。

センサー名	開発元	国名	バンド数	波長範囲 (µm)
AVIRIS	NASA	米国	224	0.4-2.5
AISA	Spectral Imaging Ltd.	フィンランド	286	0.45-0.9
CASI	Itres Research	カナダ	288	0.43-0.87
DAIS2115	GER Corp.	米国	211	0.4-12.0
НҮМАР	Intregrated Spectronics Pty Ltd.	オーストラリア	128	0.4-2.45
PROBE-1	Earth Search Sciences Inc.	米国	128	0.4-2.45

研究用と商業用イメージングスペクトルメータの例

ピクセル毎にスペクトルを照合する

ハイパースペクトル画像を解析する一つのアプローチとして、各ピクセルの画像スペクトルとスペクトルライブラリ 内の参照反射スペクトルとをそれぞれマッチングさせる方法があります。このアプローチには画像スペクトルから反 射率への正確な変換が必要です。シーンが広範囲にわたって、一つの純粋な物質からなるエリアを含んでいて、その 物質に対応する反射スペクトルが参照ライブラリに存在する場合には最も良いアプローチのし方です。観測されるス ペクトルは普通、程度の違いはあっても多くの類似した参照スペクトルとマッチングします。マッチングした参照ス ペクトルはどれだけ上手く適合しているかといった規準を用いてランク付けされなければなりません。そして、最も 良く適合したものが"winner (勝者)"になります。

ハイパースペクトルシーンのほとん どは、異なる物質が空間的に混合 した画像ピクセル(10ページ参照) を数多く含んでいるため、スペクト ルマッチングの方法は複雑になりま す。混合した画像スペクトルは多種 の"純粋成分"の参照スペクトルと 適合します。そして、それは実際に は存在しない物質のスペクトルを含 んでいる可能性もあります。もし最 も良くマッチングした参照スペクト ルが画像スペクトルに充分適合して いれば、この物質がおそらく混合物 を支配していると考えられ、ピクセ ルもこの物質に定められます。もし 参照スペクトルが充分なマッチング



サンプル画像スペクトルとマッチングした USGS スペクトルライブラリ内 の鉱物アルナイト(フィット度=0.91)

を得られなければ、優勢物質がないと考えられ、ピクセルは指定されないままにしておかなければなりません。結果は、 下の図に示されるような大半の画像セルに対する優勢物質を表わす"物質地図"となります。図の精度を向上させるた めには、サンプルの混合スペクトルをライブラリ内に含めることですが、参照ライブラリ内に全ての可能な混合物(可 能な全ての配分で)を含むことはできません。



カプライト AVIRIS シーン(一部)の鉱物地図。 画像スペクトルを USGS スペクトルライブラリの 鉱物スペクトルにマッチングすることによって作 られた。白い地域は選択された参照スペクトルと のマッチングが十分でなく、鉱物が割り当てられ ませんでした。

スペクトルマッチングの手法

反射スペクトルの形状は通常二つの成分に分離することが可能です。幅広く、スペクトルの全体的な形状を定義付け るなだらかな変化領域、及び狭くて谷の様な吸収特性領域、です。このような区別は、画像スペクトルを参照スペク トルにマッチングさせる上で二つの異なるアプローチのし方に導きます。

鉱物のような多くの純粋物質は、吸収特性の位置、強度(谷の深さ)、形状によって認識可能です。1つの一般的な マッチング法では、個々の参照スペクトルの候補の中で吸収特性のみを用いてマッチングを行い、他のスペクトル部 分は無視します。したがって、波長域のユニークな特徴が参照候補に対して個別に検査され、その吸収特性の位置を もとに決定されます。スペクトルの局所的な位置と勾配は吸収特性の強さや形状に影響します。そのため、これらの パラメータは通常包絡線、つまりスペクトル全体の形状の上限に接する曲線、に対して相対的に決定されます。包絡

線は波長データの一部を使って計算 され、各スペクトルチャンネルの反 射率を対応する包絡線の値で割るこ とによって除去されます。得られた 値(深さと半分の深さに対する幅 (半値幅)など)を用いることによっ て吸収特性のマッチングが行われま す。または元の形状を使ってマッチ ングを行う場合もあります。このよ うなタイプの手続きは米国地質調査 所の Spectroscopy Lab (Clarkand others,1990)の研究者によってエ キスパートシステムとして体系化さ れています。

岩石や土のような他の多くの物質は 吸収特性の特徴に欠けています。こ れらのスペクトルは全体の形状に よって特徴づけます。マッチングで



いくつもの吸収特性を含む鉱物 gypsum(石膏)の反射スペクトル(A)。 曲線 B はスペクトルの上限値に接する包絡線をあらわし、C は包絡線を削除 した後のスペクトルです(包絡線の除去を行っている)。

はスペクトル全体(大気吸収によって著しく影響をうけたノイズの多い画像バンドは除く)、または全ての候補物質 に対する均一な波長部分が利用されます。マッチングの1つのアプローチでは、(二乗誤差の和のルートで量子化さ れた)画像スペクトルと反射率の差(バンド毎バンド)が最小となるスペクトルを探す方法です。もう一つのアプロー チは、各スペクトルをスペクトル空間内のベクトルとして扱い、観測された画像スペクトルと成す角が最小になる参 照スペクトルを見つける方法です。

線形分離法(Linear Unmixing)

線形分離法はスペクトルマッチングを簡単に行うための別のアプローチ です。基礎となる前提条件は、シーンがほぼ一定のスペクトル特性をも つ比較的少数の一般的な物質を含んでいることです。さらに、シーン内 のスペクトル変動の大部分はこれら一般的なエンドメンバー要素が様々 な割合で空間的に混合しているかどうかです。もしエンドメンバーのス ペクトルを同定することが出来れば、各ピクセルのスペクトルを数学的 に"分離"し、各エンドメンバー物質の相対的な量を知ることが出来ます。

分離手順は画像スペクトルをエンドメンバースペクトルの存在比の和と して、その合計が1.0となる様にモデル化します。最も良く適合する割合 の組み合わせは前ページで説明した方法と同じスペクトルマッチングを 用いて見つけることができます。各エンドメンバーの割合を示す画像は 存在比に関する情報を簡単に解釈したり操作できる形に凝縮します。各 ピクセルの残差誤差を示す画像は、選択されたエンドメンバーセットか ら十分にモデル化できないシーンの場所を調べるのに役立ちます。

線形分離の課題は地表面にある実際の物理的要素に対応するスペクトル エンドメンバーを同定することです。エンドメンバーは、フィールド情 報を使って画像から直接定義することが可能であり、あるいは次ページ で説明する実験的な選択方法を用いることもできます。あるいは、参照 ライブラリからエンドメンバー反射スペクトルを選択することもできま すが、このアプローチでは画像が正確に反射率に変換されている必要が あります。実際の物質スペクトルと混合することのできる"陰影"のエン ドメンバーを定義することによって、明暗の変化を直接混合モデルに組 み込むことが可能になります。陰影のスペクトルは画像内の深く陰影の 影響を受けた部分から直接得ることができます。右の例で示されるよう に深い影が無い場合、暗いアスファルト面や深い水域のスペクトルが影 スペクトルの代わりをすることがあります。



森、作物のない畑とある畑、川を含む AVIRIS シーンの一部。カラー赤外線バ ンドの混合(植生は赤です)で表され ています。線形分離からの部分画像を 以下に示す。



植生割合



水/影の割合



土壌割合

エンドメンバー(端成分)の定義

ハイパースペクトル画像からスペクトルエンドメンバーが定義される際、個々の画像のエンドメンバーはそれが代表 する物理的物質の最大量を持たなければなりません。(理想的には、各エンドメンバーは単一の純粋な物質であると 良いのですが、画像内には各エンドメンバーの"ピュア"ピクセルが存在しない可能性があります)。もしも画像スペ クトルが n 次元の散布図の点として表されていたとしたら、エンドメンバーはスペクトル点の集団の周縁部の先端に 対応するはずです。

画像のエンドメンバーの候補を絞り込むための常套的な手順にはいくつかのステップを要します。隣接するピクセル のスペクトルバンド間には強い相関が存在するため、Minimum Noise Fraction (MNF)変換を用いて少数のノイズ のない成分を保つことにより、最初にデータセットの次元を減らします。MNF 変換(Green, et al. 1988)とは出力 成分が画像内容量の順に並ぶように各画像バンドのノイズ量を推測し、平等化するノイズ調整主成分変換です。次 に、自動化された手順が MNF 成分に適用され、n 次元データ集団の周縁部にある端部スペクトルを見つけます。こ のような手順の一つに Pixel Purity Index (PPI)があります。それは座標空間の原点から外に向かって広がる一連の

ランダムな方向を調査します。各テスト方向に対 して、スペクトル点はテストベクトル上に投影さ れ、端部スペクトル(下限と上限)が記録されます。 方向がテストされていくと共に、各画像セルが端 の点として検出される回数を集計します。結果の PPI ラスタで高い値を示したピクセルは基本的に は MNF データ集団の端部に対応します。第三の ステップでは、回転可能なn次元散布図内で見る ために PPI ラスタを用いて MNF データセットか らピクセルを選択します(TNTmips のハイパース ペクトル解析処理内のn次元ビジュアライザを使 います)。さまざまな方向から PPI スペクトル集 団を見ることによって、解析者は重要な方向を見 定め、それらの方向で端部となるスペクトル点を マークし、マークされたセル画像を保存すること ができます。最後に、マークされたセル画像をオ リジナルのハイパースペクトル画像上に重ね、画 像スペクトルを選択、調査するためのガイドとし て使用します。最良のエンドメンバースペクトル の候補はスペクトルライブラリ内に保存され、ハ イパースペクトル画像を分離するために利用され ます。



MNF 成分 1

Pixel Purity Index 手順によってテストされるランダムなベクトル方向(矢印)を表わす2成分プロットの例。全てのスペクトル点は各テストベクトル上に投影され、端点が記録されます。

部分分離

いくつかのハイパースペクトル画像のアプリケーションには、シーン内における全てのエンドメンバー成分の存在比 を求めることを必要としないアプリケーションがあります。その代わり、目的は1つのターゲット物質の存在とその 量を求めることです。この場合完全なスペクトル分離は不要です。各ピクセルは注目しているスペクトルの痕跡とシー ン内における他の全ての物質を表す合成物質の痕跡の混合物として扱うことができます。ターゲット成分の存在量を 見つけることが部分分離の問題の本質です。

未知のスペクトルの背景に対してターゲットスペクトルを見つけ出す方法は、無線信号処理の用語を借りてマッチト フィルタと呼ばれています。正射サブスペース投影法や制限エネルギー最小法(Farrand and Harsanyi,1994)など の様々なマッチトフィルタアルゴリズムが開発されています。これらのアプローチ全ては、背景を最小化しながらター ゲットスペクトルからの寄与を強調するように画像スペクトルの数学的な変換を行います。幾何学的な意味では、マッ チトフィルタ法はターゲットスペクトルの全域における存在量を示す反面、背景の可変性を"隠してしまう"といっ た n 次元スペクトル空間への1つの投影法を見つけることです。ほとんどの場合、背景に貢献するスペクトルは不明 ですので、ほとんどのマッチトフィルタでは、画像そのものから合成背景の痕跡を推定するために統計的手法を用い ます。ターゲット物質がまばらで、背景の組成には大して影響しない場合のみ成功する方法もあります。修正された マッチトフィルタ法ではスペクトルそのものではなく、スペクトルの微分を用いることによって全体の輝度が異なる スペクトルのマッチングを改善します。



カプライト AVIRIS シーンの一部分で、マッチトフィルタ(左)と微分マッチトフィルタ(右)によって作り出された存在 比を表す画像。ターゲット画像スペクトルは鉱物アルナイトです。明るい部分はアルナイトの多い部分のピクセルです。 微分マッチトフィルタによって作られた画像は画像ノイズが少なく、明瞭な境界線、アルナイトの存在比が異なるエリア 間のコントラストが明瞭です。

参考文献

概要

Kruse, F.A. (1999). Visible-Infrared Sensors and Case Studies. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for theEarth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 567-611.

Landgrebe, David (in press). Information Extraction Principles and Methods for Multispectral and Hyperspectral Image Data. In Chen, C.H. (ed.), *Information Processing for Remote Sensing*. River Edge, NJ: World Scientific Publishing Company. Manuscript available for download at http://dynamo.ecn.purdue.edu/~landgreb/publications.html.

Vane, Gregg, Duval, J.E., and Wellman, J.B. (1993). Imaging Spectroscopy of the Earth and Other Solar System Bodies. In Pieters, Carle M. and Englert, Peter A.J. (eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elementatl and Mineralogic Composition.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 121-143.

Vane, Gregg, and Goetz, A.F.H. (1988). Terrestrial Imaging Spectroscopy. Remote Sensing of Environment, 24, pp.1-29.

スペクトル反射

Ben-Dor, E., Irons, J.R., and Epema, G.F. (1999). Soil Reflectance. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 111-188.

Clark, Roger N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In Renz, Andrew N.(ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences*: Manual of Remote Sensing (3rd ed.), Vol 3. New York: JohnWiley & Sons, pp. 3-58.

Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M., and Govaerts, Y. (1999). Geobotany: Vegetation Mapping for Earth Sciences. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 189-248.

反射率変換

Farrand, William H., Singer, R.B., and Merenyi, E., 1994, Retrieval of Apparent Surface Reflectance from AVIRISD ata: A Comparison of Empirical Line, Radiative Transfer, and Spectral Mixture Methods. *Remote Sensing of Environment*, 47, 311-321.

Goetz, Alexander F.H., and Boardman, J.W. (1997). Atmospheric Corrections: On Deriving Surface Reflectance from Hyperspectral Imagers. In Descour, Michael R. and Shen, S.S. (eds.), Imaging Spectrometry III: Proceedingsof SPIE, 3118, 14-22.

van der Meer, Freek (1994). Calibration of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer Data (AVIRIS) to Reflectanceand Mineral Mapping in Hydrothermal Alteration Zones: An Example from the "Cuprite Mining District" *Geocarto International*, 3, 23-37.

ハイパースペクトル画像分析

Adams, John B., Smith, M.O., and Gillespie, A.R. (1993). Imaging Spectroscopy: Interpretation Based on Spectral Mixture Analysis. In Pieters, Carle M. and Englert, Peter A.J. (eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elementatl and Mineralogic Composition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 145-166.

Clark, R.N., Gallagher, A.J., and Swayze, G.A. (1990). Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. *Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication 90-54, pp. 176-186.

Cloutis, E.A., (1996). Hyperspectral Geological Remote Sensing: Evaluation of Analytical Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2215-2242.

Farrand, William H., and Harsanyi, J.C. (1994). Mapping Distributed Geological and Botanical Targets through Constrained Energy Minimization. Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing, San Antonio, Texas, 9-12 May 1994, pp. I-419 - I-429.

Green, Andrew A., Berman, M., Switzer, P., and Craig, M.D. (1988). A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26, 65-74.

Mustard, John F., and Sunshine, J.M. (1999). Spectral Analysis for Earth Science: Investigations Using RemoteSensing Data. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 251-306.

地理空間解析のための先進的ソフトウェア

S. Malo

マイクロイメージ社は、高度な地理空間データの視覚化、解析、出版を行う専門家向けソフトウェアを提供しています。 製品に関する詳細は、マイクロイメージ社にお問い合せになるか、ウェブサイトにアクセスしてください。

TNTmips Pro	TNTmips Pro は、GIS、画像解析、CAD、TIN、PC を用いた地図印刷、地理空間データベース管理機能
how	を統合した専門家のためのシステムです。
TNTmips Basic	TNTmips Basic は、TNTmips の廉価版で小規模プロジェクト向けのシステムです。
TNTmips Free	TNTmips Free は、学生や小規模プロジェクトを行う専門家向けの無料バージョンです。
TNTedit	TNTedit はベクタ、画像、CAD、TIN、リレーショナルデータベースなど様々な形式の地理データ
	を作成、座標付け、編集するための専門家のための対話的ツールです。
TNTview	TNTview は TNTmips と同じ強力な表示機能があります。TNTmips の持つ解析機能やデータ編集機
	能はありません。
TNTatiac	TNITatlagを使用すると、自分のプロジェクトデータをCD POMにプレフレブ、低コフトで出版や

TNTatlas を使用すると、自分のブロジェクトテ TNTatlas タを CD-ROM にフレスして、低コストで出版や 配布ができます。TNTatlasのCDはWindowsやMacで使用できます。

	一 糸
吸収	
帯域	5-7
大気	13,18
大気	
吸収	13, 18
散乱	13
包絡線	
照射	11, 12
画像(撮像、イメージング)	
スペクトルメータ	4, 10, 16
太陽放射	12
線形分離	19-21
マッチトフィルタ	21
スペクトルマッチング	17, 18
Minimum Noise Fraction 変換	
Pixel Purity Index	
空間解像度	10
散乱	4, 5, 13
センサ効果	13
影	12
スペクトルライブラリ	8

qui ont fervi a de

a Merul

Open

GIS

[翻訳]

Brest

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
スペクトル	レ放射	
スペクトル	レ反射率	
曲線	への変換	スペクトル参照 14-15
スペ	クトルのフ	定義について5
スペクトル	レ空間	
スペクトル	レメータ	
分光学		
スペクトル	arbox	
エン	ドメンバ-	—
画像		
ライ	ブラリ	
鉱物		6
混合		
植物		
プロ	ット	9
反射	率	
土壌		
太陽		
		5

Inc.

Alencor

Pointers

Derdoun

mie R

GUYE

ハイパースペクトル画像とは(改訂版) 2019年8月7日 第1版



Lincoln, Nebraska 68508-2010 USA 電話:(402) 477-9554 email : info@microimages.com FAX: (402) 477-9559 URL: www.microimages.com

株式会社 オープン GIS

Pill 〒130-0001 東京都墨田区吾妻橋 1-19-14 紀伊国屋ビル 1F Kinokuniya Bld. 1F, 1-19-14 Azumabashi, Sumida-ku, Tokyo 130-0001, JAPAN TEL (03) 3623-2851 FAX (03) 3623-3025