

# 解説

## リモートセンシング画像の画像処理

下田 陽久

東海大学情報技術センター 〒151 東京都渋谷区富ヶ谷 2-28-4

(1989年1月12日受理)

### Image Processing of Remotely Sensed Images

Haruhisa SHIMODA

Tokai University Research & Information Center,  
2-28-4, Tomigaya, Shibuya-ku, Tokyo 151

#### 1. はじめに

本稿の題名はリモートセンシング画像の画像処理となっているが、編集委員会からの要請では、センサーを含めて光学的におもしろいリモートセンシング技術について述べよということであった。最近、10年程前の文献をいくつか調べる機会があったが、画像処理技術については驚くほど進歩していないことがわかった。そこで本稿では主として光学的におもしろいセンサーを中心に話を進め、画像処理については簡単に触れることにする。興味のある方は他の成書を参考にさせていただきたい<sup>1-4)</sup>。

#### 2. 光学センサーの技術的課題

##### 2.1 OMS と PBS<sup>5,6)</sup>

リモートセンシングで最もよく用いられているセンサーはマルチスペクトルスキャナ(MSS: multi spectral scanner)である。MSSには2種類あるが、従来 Landsat を中心によく使われてきたのは OMS (optical mechanical scanner) であった。OMS の原理図を図1に示す。この図からわかるように OMS は、地表の対象物を見る望遠光学系、それをセンサーの進行方向に直角に走査する走査光学系、分光系、および光電変換部から構成されている。OMS の地上解像力は主として望遠光学系の視野角によって決定される。この視野角のことを瞬間視野角(IFOV: instantaneous field of view)と呼ぶ。

OMS の利点は IFOV が見込む視野から入射する光を分光して測定するため、原理的にバンド(スペクトル帯域)間の位置ずれがないという点にある。もっとも実

際には後に述べる Landsat の場合のように、走査速度を上げるために各バンドに複数のディテクタを用いる場合もある。一方欠点としては、走査光学系に振動鏡ないしは回転鏡を用いるため、衛星に振動が伝わったり、走査速度の不均一が生じる。また、システム構成が複雑になり、故障が生じやすくなる。これらの欠点を改善するために考え出されたのが PBS である。

PBS (push broom scanner) は、その名のとおり1ライン分のディテクタを並べて、1方向(進行方向)のみ走査を行なうセンサーである。ディテクタとしてふつうは CCD ないし類似の固体撮像素子を用いる。PBS は OMS に比べて、機械的可動部分がないため、信頼性に優れている。しかしながら、OMS にはなかった新たな光学的課題を抱えることになった。

##### 2.2 PBS における光学的課題

まず問題になるのは、撮像方式が対象物面走査方式から映像面走査方式に変わったため、センサーの地上解像力が光学系の解像力に大きく依存するようになった点である。現在最もよく用いられている CCD は 2048 素子のものであり、この場合1素子の大きさは  $14\mu\text{m}$  となる。したがってこの素子に必要な光学系の解像力は、143 lp/mm 程度となり、これだけでもかなり高解像力の光学系が必要になることがわかる。将来のリモートセンシングセンサーに用いられる CCD はより多素子のもになるようとしているが、その場合1素子の大きさが小さくなる傾向にある。したがって光学系に求められる性能はますます高くなっていく。

光学系の解像力を高めるためには開口を大きくする必

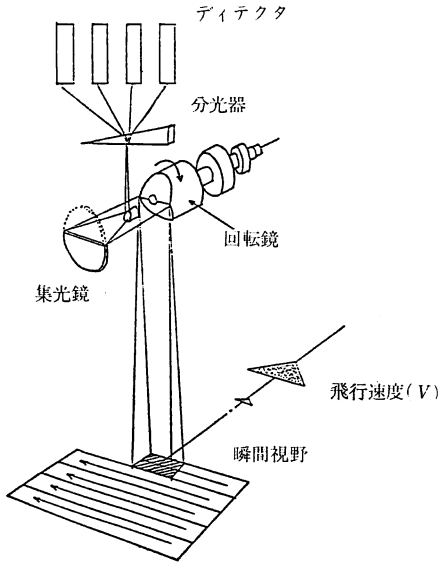


図 1 OMS (optical mechanical scanner) の原理図

要があるが、衛星搭載センサーという面からは、重量が小さいほうがよい。このため現在でもたとえば MOS-1 の MESSR のように非球面光学系が用いられているが、今後は後に述べる色収差の問題とともに、反射屈折光学系の採用が必要になってくると思われる。

PBS にとってもう一つ大きな問題は、色収差である。現在の MSS の波長帯域は  $0.38 \mu\text{m}$  から  $2.3 \mu\text{m}$  に及んでおり、全波長帯域を一つの光学系で構成した場合、大きな色収差が発生する。とくに問題なのは横の色収差であり、像の大きさが異なるため、バンド間の画像が重ならなくなってしまう。この問題を避けるためには、各バンドごとに異なった光学系を採用し、さらに倍率を一定にするため像面距離をそれぞれ変える必要があるが、構造が複雑になるとともに重量が増加してしまう欠点がある。さらに対象波長が長くなるとともに、光学材料にも大きな制約が加わる。

以上述べたように PBS の光学系はその単純な構造にもかかわらず、きわめて挑戦的な光学的課題を提供している。

### 3. SAR の光学的考察<sup>7,8)</sup>

#### 3.1 SAR の原理

合成開口レーダーはサイドルッキングレーダーの一種と考えることができる。ご存じの方も多いと思うがここで簡単にサイドルッキングレーダーの原理から説明しておく。図 2 にサイドルッキングレーダー (SLR) の原理図を示す。図からわかるように SLR ではプラットフォームの進行方向に直角方向に幅の狭いファンビームを照射し、地表からの後方散乱成分を収集する。このときの進行方向をアジマス方向、電波の照射方向をレンジ方向と呼ぶ。

SLR では、アジマス方向の解像力はファンビームの幅で、レンジ方向の解像力は時間分解能で決まる。ファンビームの地上での幅は次式で決定されるが、

$$r = \lambda R / D \quad (1)$$

衛星高度から十分な地上解像力を得るためには長大なアンテナが必要になる。ここで  $r$  は地上解像力、 $\lambda$  は波長、 $R$  はアンテナと地上との距離、 $D$  はアンテナ開口である。この欠点を回避し衛星高度から十分な地上解像力を得るために考え出されたのが SAR (synthetic aperture radar) である。

SAR では SLR とは逆に小さいアンテナを用いて一度に広い範囲を照射する。逆に言えば地上の各地点はかなり長い間照射され続けることになる。地上の一点に注目した場合、SAR センサーはその点からの信号を位相整合することにより、仮想的に長大なアンテナを合成することができる。この場合、理論的な地上解像力は、地上からの距離に無関係に、アンテナ開口の 1/2 になる。通常 SAR ではレンジ方向の解像力もアジマス方向に合

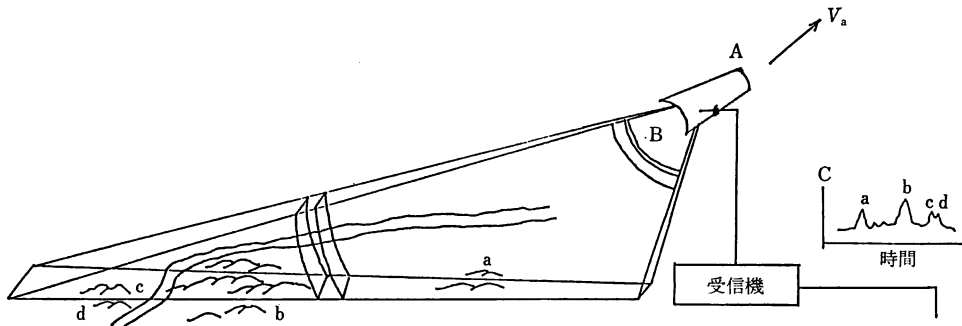


図 2 SLR (side looking radar) の原理図

わせて向上させるため、照射パルスはチャープ変調される。チャープ変調とは周波数を時間に対してリニアに変化させる変調方式である。開口合成とチャープ変調により、SAR では衛星高度から 20 m 前後の地上解像力を得ることができる。

SAR の原理はいろいろな視角から考えることができるが、光学的にはフレネル回折と考えるのが一番簡単である。受信復調後の SAR 信号は下式で表わされる。

$$f(x) = C\rho \exp(-4\pi ia/\lambda) \exp\{-2\pi i(x_0 - x_1)^2/\lambda a_0 + 2\pi i(B/\tau)(t_n - 2a_0/c)^2\} \quad (2)$$

ここで  $\rho$ : 地表の振幅反射係数,  $C$ : SAR システムで決定される定数,  $\lambda$ : 波長,  $a_0$ : アンテナの進行する直線と地表の対象点との距離,  $x_0, x_1$ : アンテナの進行方向を  $x$  軸としたとき, アンテナおよび地表対象点の  $x$  座標,  $\tau$ : 送信パルス幅,  $B$ : 送信パルスの周波数帯域幅,  $t_n$ : 第  $n$  番目のパルスの中心が送出された時刻から測った時間,  $c$ : 光速である。

フレネル回折の点像振幅分布関数

$$Z(\xi, \eta) = \exp\{2\pi i(\xi^2 + \eta^2)/2\lambda z\} \quad (3)$$

ここで  $(\xi, \eta, z)$  は空間座標,  $z$  軸は回折体を含む平面に直角方向に取る。

と比べると、アジマス方向とレンジ方向それぞれで異なった波長によるフレネル回折像となっていることがわかる。

同じように SAR を一方向ホログラムの合成として考えることもできるが、紙数の関係からここでは扱わない。

SAR 画像の特徴としてもう一つ挙げられるのはスペckルである。コヒーレンス光学系による撮像系の特徴として、SAR の場合も再生画像上にスペckルノイズが存在する。SAR の場合同一シーンは通常一回しか撮影されないため、スペckルの効果的な低減法はいくつかの画素の平均値をとるほかない。この処理をマルチルック処理と呼び、解像力の低下をもたらすにもかかわらずよく用いられている。

### 3.2 SAR 画像の再生処理

式(2)からわかるように、SAR 画像の再生処理は、それぞれ次元のコンボリューション処理になる。コンボリューションカーネルとしては、レンジ方向に対しては

$$g(t_n) = \exp\{\pm 2\pi i(B/\tau)(t_n - t_r)^2\} \quad (4)$$

が、アジマス方向に対しては

$$g'(t_a') = \exp(2\pi i f_0 t_a') \quad (5)$$

ただし

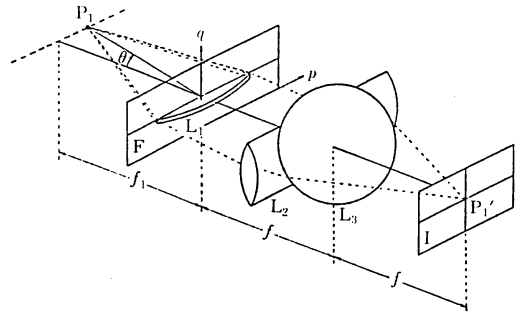


図3 SAR の光学処理系のブロック図 (1方向再生)

$$t_a = (2/c)(a_0 + a_1 t + a_2 t^2) \quad (6)$$

$$t_a' = (2/c)\{a_0 + \Delta a_0 + a_1(t + t_a) + a_2(t + t_a)^2\} \quad (7)$$

$$\Delta a_0 = (c/2)t_r - a_0 \quad (8)$$

が用いられる。一方、前項で述べたフレネル回折の考え方からすれば、コヒーレント光学系を用いた処理も可能である。図3に、アジマス方向に対する SAR の光学処理系のブロック図を示す。図中 F は(2)式に相当する振幅透過率をもつフィルム, L は円錐レンズを  $p$  軸に平行で  $q$  軸に垂直な 2 平面で切断したレンズ,  $L_2$  はシリンドリカルレンズである。

## 4. リモートセンシングで用いられる高性能分光系<sup>9)</sup>

### 4.1 イメージングスペクトルメータ

リモートセンシングセンサーとして最もよく用いられているのは、先にも述べたように MSS であるが、その場合得られるスペクトルバンドの数はきわめて限られている。これに対して、より連続的なスペクトルを観測するセンサーが、イメージングスペクトルメータである。このセンサーは地上の各地点のスペクトルを得ると同時に、画像も得ようとするもので、通常 2 次元 CCD アレイが用いられる。2 次元 CCD アレイのうち、1 方向がスペクトル分解用に、他方向が分光用に用いられる。最も代表的なものでは、波長帯域 0.38~2.3  $\mu\text{m}$ , チャンネル数 64~128 チャンネルといったものがある。

イメージングスペクトルメータの問題点は、データレートの高さと、データ解析の計算量である。現在実際に用いられている MSS のチャンネル数がたかだか 7 チャンネルであるのに対し、10 倍から 20 倍近いデータ量は、伝送、記録、処理のすべてにわたって大きな問題をもたらす。さらに、現在最もよく用いられている最尤法等、2 次形式を用いる解析法では計算量が多くなりすぎる問題がある。これらの問題点は、まだ解決されておらず、今後の研究開発が期待される。

4.2 高分解能分光計

いままでのリモートセンシングの対象が主として地上であったのに対し、最近は大気を対象とするリモートセンシングが盛んになってきた。この流れの大きな原因は炭酸ガスの増加に伴う温室効果の問題や、南極上空のオゾンホールの問題など、地球規模での大気の変動が人類の生存にとって問題になってきたためである。しかし、これら問題となっている大気成分がきわめて微量なため、地上を対象とする放射計に対し、大気を対象とするセンサーの場合にはかに高い感度を要求される。

これらの大気微量成分観測用のセンサーに現在用いられている分光計には4種類ある。回折格子分光計およびグリルを用いたマルチスリット分光計のほかに、2種の干渉型分光計すなわち、Fabry-Perot 干渉計を用いた分

光計と Michelson-Fourier 分光計 (FTIR) である。図4に実際に衛星に搭載された Michelson-Fourier 分光計のブロック図を示す。また、これらの分光計は S/N を向上させるため、測定対象ガスを参照用に用いることがある。今後、O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> を始めとする大気微量成分の衛星観測がますます盛んになると予想され、衛星搭載用高分解能分光計の性能向上が期待される。

また、これら受動的なセンサーのほかに、将来は大気観測にレーザーレーダーを用いようという提案も多い。

5. 画像処理<sup>4)</sup>

5.1 前処理<sup>10)</sup>

図5にリモートセンシング画像処理の代表的なアルゴリズムを示す。これからわかるように、リモートセンシ

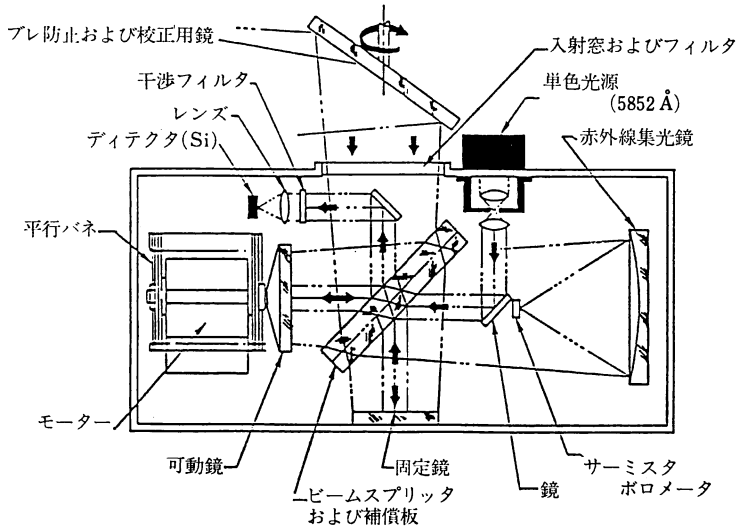


図4 NIMBUS に搭載された Michelson-Fourier の分光計 IRIS のブロック図

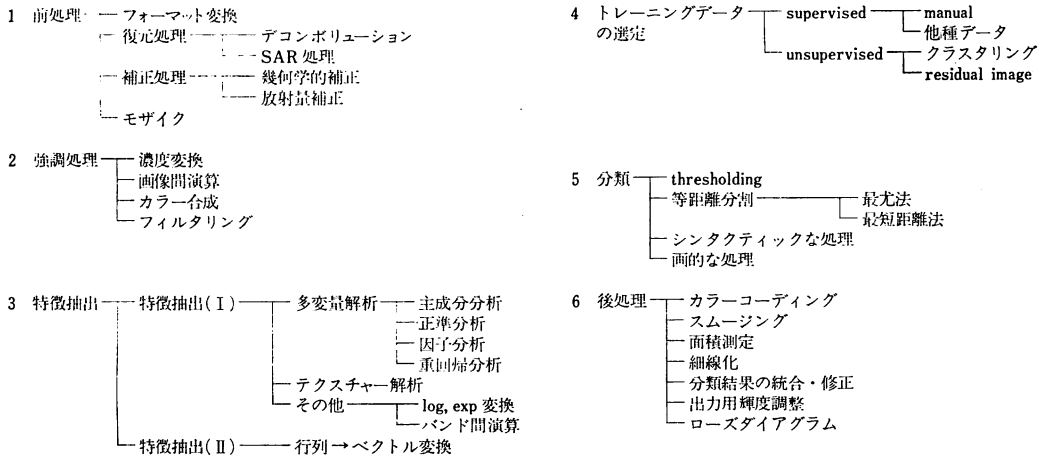


図5 リモートセンシング画像処理のアルゴリズム

ング画像処理といっても、その大半は一般の画像処理と同じ処理となる。そこでここではリモートセンシング画像処理に特有な、あるいはとくに重要な処理に限って述べることにしたい。

センサーによって得られたデータには多くの歪みが存在する。これらの歪みを除去する処理を前処理と呼ぶ。一部では画像処理という言葉で前処理を指し、その他の処理は画像解析と呼ぶこともある。前処理は得られたデータの強度に関する歪みを補正する放射量補正と、幾何学的な歪みを補正する幾何補正とに分かれる。

### 5.1.1 放射量補正

リモートセンシングにおいて、センサーを用いて測定したい物理量は、可視近赤外領域では分光反射率、熱赤外領域では地表温度である。しかしセンサーによって直接得られる値は、センサーに入射する放射輝度に、センサーの感度を掛けたものである。したがって、最初の放射量補正は絶対放射輝度の推定となる。衛星に搭載されるセンサーは、地上で校正したあと打ち上げられる。しかし実際には多くの場合、打ち上げ後感度が変化する。たとえば OMS 型の MSS では、各チャンネルで複数の検知器を用いるため(たとえば Landsat の MSS では 6 個、TM では 16 個)、各検知器の感度の差により特有の横縞ノイズが発生する。このノイズを取り除くには、ふつう、一つの画面全体で各検知器の見ている領域はほぼ同じ特性をもっているという仮定の下に、それぞれの検知器に対応する画像を作成し、その値の平均および分散、あるいはヒストグラムを一致させるという処理を行なう。この処理をデストライピングと呼ぶ。また、リニアレイセンサーの場合は、各素子間の感度むらによって縦縞が生じる。この場合は前記の仮定が成立しないため、画面全体が均一の明るさをもつようなシーン(海面や砂漠等)を選んで、素子間の感度の校正を行なう。

次に重要な補正は大気補正である。大気中を通過する電磁波は、大気による吸収および散乱を受ける。また、図 6 に示すように、地表は太陽の直射光以外に大気による散乱光(スカイライトと呼ぶ)によっても照射されているし、センサーには地表からの光以外に太陽光の大気による散乱光(パスラジアンと呼ぶ)が入射する。これらの影響を取り除く処理を大気補正と呼ぶ。可視、近赤外領域ではエアロゾルによる散乱が、また熱赤外領域では水蒸気による吸収が大きな役割を果たす。いずれの場合も数多くの補正手法が提案されているが、エアロゾルあるいは水蒸気量の推定は画像からだけでは難しい。

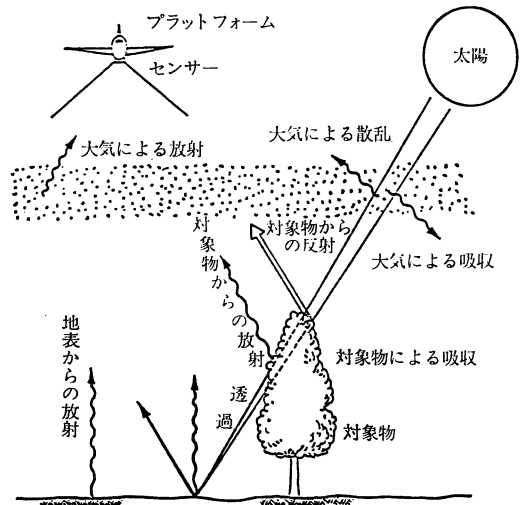


図 6 センサーに入射する光

### 5.1.2 幾何補正

リモートセンシングのセンサーによって得られる画像に含まれる幾何学的歪みとして以下のようなものが考えられる。1) センサー自体に起因する歪み(走査鏡の速度変動、歪曲収差等)、2) プラットフォームの3軸回りの姿勢変動(ロール、ピッチおよびヨー)による歪み、3) プラットフォームの高度変化による歪み、4) 衛星軌道面と地球の回転との相対運動による歪み(スキュー歪み)、5) 地球の曲率による歪み、6) 地球表面の凹凸による歪み。

これらの歪みを補正する手法として、解析的手法と多項式近似の2種類の方法がある。前者は、画像座標と、地表面座標との関係を解析的に求める手法であり、画像上の各画素が撮影されたときのセンサーの位置と姿勢を決定する必要がある。これには通常、軌道データおよび姿勢測定データが用いられるが、一部のパラメータを地上基準点(GCP:画像上と地表上で対応する点のこと)を用いて求める場合もある。ただし、上記中6)の歪みを除去するためには、地表の標高情報が必要である。

一方後者は、画像座標と地表面座標の関係が多項式で近似できると考え、その係数をGCPを用いて最小2乗法で求める手法である。実際の画像の幾何補正の場合、補正後の座標に対応する画像座標を求める必要が生じる。この処理を再配列(リサンプリング)と呼ぶが、解析的手法による幾何補正の場合、これには逆変換が必要である。一般にリモートセンシングで得られる画像に関しては逆変換が解析的にもとめられないため、通常は小領域に区切って、その内部を多項式で近似する手法が用

いられる。多項式近似による補正の場合は、逆変換式を多項式で近似するため、このような問題は生じない。

再配列時、補正後座標に対応する画像座標は実数で与えられるが、デジタル画像では画像座標は整数である。そのため、実数値で示された画像座標に相当する画素の値を周辺の画素の値から内挿により推定する必要が生じる。通常用いられている内挿手法は以下の3種類である。1) 最近隣法、2) 共一次内挿、3) 3次たみ込み内挿。1) は最も近い整数座標にある画素の値をそのまま用いる。2) は周囲4点の距離加重平均値を用いる。3) は周囲16点を用い、sinc関数類似の3次多項式でコンボリューションを行なう。

補正後の地表座標系は本来、地球が球であるため、3次元座標系となるが、これではその後の処理に不便なため、適当地図座標系へ射影する。リモートセンシングで現在よく用いられている座標系としては、UTM (Universal Transverse Mercator) 図法、正射極心図法、メルカトル図法、正方図法等がある。

### 5.2 特徴抽出

リモートセンシング画像処理の中心になるのは、画像中の各画素が地表の何に対応するか、言い換えれば画像を分類して各分類カテゴリに何に対応するかを決定する処理である。分類処理はその目的に応じて、適当なベクトル空間で行なわれるが、元の画像データから分類に最適なベクトルを抽出する処理を特徴抽出と呼ぶ。また、このとき抽出されたベクトルを特徴ベクトルと呼ぶ。

特徴抽出にはきわめて多種類の処理が考えられるが、大別して各画素のバンド間の組合せと、空間的な情報を抽出する手法の2種類に分かれる。前者の代表的な例としては主成分分析などのような直交変換や、バンド間の比等が用いられる。バンド間の比では、赤外領域の値と可視領域の値の比、 $(IR - VIS)/(IR + VIS)$  (ここで IR は赤外領域の値、VIS は可視領域の値) が vegetation index と呼ばれてバイオマスに比例するとしてよく用いられている。

一方後者では、画像の局所的な滑らかさを表わす、テクスチャと呼ばれる特徴がよく用いられる。テクスチャの表現にも多くの種類があるが、最近よく用いられているのは、下式に示す2次確率密度関数 (co-occurrence matrix と呼ばれる) である。

$$\begin{aligned}
 & p(z_1, z_2; x_2 - x_1, y_2 - y_1) \\
 &= \lim_{\substack{dz_1 \rightarrow 0 \\ dz_2 \rightarrow 0}} [ [P \{z_1 < f(x_1, y_1) < z_1 \\ &+ dz_1, z_2 < f(x_2, y_2) < z_2 + dz_2\}] / (dz_1 \times dz_2) ] \quad (9)
 \end{aligned}$$

ここで  $p(z_1, z_2; x_2 - x_1, y_2 - y_1) dz_1, dz_2$  は、ある局所領域内で  $(x_1, y_1)$  にある画素が  $z_1$  と  $z_1 + dz_1$  の間の値をとり、同時にその近傍  $(x_2, y_2)$  にある画素が  $z_2$  と  $z_2 + dz_2$  の間の値をとる確率を表わしている。

ただし、この関数は行列となるため、分類に用いる場合はさらに変換する必要がある。よく用いられる変換として、たとえば、

$$\text{エネルギー: } E(p) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} p(k, l)^2 \quad (10)$$

$$\text{エントロピー: } H(p) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} -p(k, l) \log p(k, l) \quad (11)$$

ここで  $N$  はレベル数などがある。

### 5.3 パラメータ推定

統計的判別法を用いる場合、まず必要になるのは母集団の統計量の推定である。推定に必要な標本の抽出法として、2種類の手法が用いられる。一つは教師付き推定 (supervised learning) と呼ばれ、画像から分類するカテゴリを代表すると思われる部分を人間が抽出していく手法である。他の一つは教師なし推定 (unsupervised learning) と呼ばれ、画像中からランダムに選んだ画素をクラスタリングし、各クラスタを標本とする手法である。前者の場合、標本の無作為性および独立性に問題が生じ、後者の場合は、生成されたクラスタと、分類に必要なカテゴリの対応付けが難しくなるという欠点を有する。なお、得られた標本からの統計量の推定には通常最尤推定が用いられる。

### 5.4 分類法

リモートセンシングの画像分類手法は数多くあるが、ここでは最もよく用いられている統計的判別法について述べる。

分類対象データのベクトルを  $\mathbf{x}$ 、カテゴリを  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 、カテゴリ  $C_i$  を  $C_j$  に誤判別したときの損失を  $\lambda_{ij}$  としたとき、最小の損失を与える判別法は、 $\sum \lambda_{ij} P(C_i | \mathbf{x})$  が最小になるカテゴリ  $C_i$  に  $\mathbf{x}$  を分類するというものである。これを Bayes の決定則と言う。画像分類の場合、誤判別による損失は一定と考えられるので、 $P(C_i | \mathbf{x})$  を求めることが目標となる。Bayes の定理により、 $P(C_i | \mathbf{x})$  は

$$P(C_i | \mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x} | C_i) P(C_i)}{\sum_{i=1}^n p(\mathbf{x} | C_i)} \quad (12)$$

で表わされる。ここで確率密度関数  $p(\mathbf{x} | C_i)$  は尤度 (likelihood) と呼ばれ、 $P(C_i)$  はカテゴリ  $C_i$  の事前

確率と呼ばれる。上式の分母は、各カテゴリーに対して一定なので、問題は  $p(\mathbf{x}|C_i)P(C_i)$  を求めることになる。  $P(C_i)$  を求めることは難しいため、通常は  $p(\mathbf{x}|C_i)$  最大のカテゴリーに  $\mathbf{x}$  を分類する。この手法を最尤法と呼ぶ。  $p(\mathbf{x}|C_i)$  が正規分布に従うとき下式で表わされる。

$$p(\mathbf{x}|C_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{V}_i|^{1/2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)' \mathbf{V}_i^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i) \right\} \quad (13)$$

ここで  $\mathbf{V}_i$  はカテゴリー  $C_i$  の分散共分散行列、  $\bar{\mathbf{x}}_i$  は平均ベクトルである。通常は上式の対数を取り、符号を逆転して、

$$\log |\mathbf{V}_i| + (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)' \mathbf{V}_i^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i) \quad (14)$$

が最大になるカテゴリーに  $\mathbf{x}$  を分類する。なおここで第2項はマハラノビスの距離と呼ばれる。

## 6. おわりに

以上光学的におもしろいと思われるリモートセンシングのセンサーと画像処理について述べたが、紙数の関係からごく簡単に述べたとどまった。興味のある方は以下の参考文献を参照していただきたい。また、最初のほう

で述べたようにリモートセンシングのセンサーに関して多くの光学的課題が山積している。より多くの光学研究者がこの分野に参入して下さることを願う次第である。

## 文 献

- 1) 日本リモートセンシング研究会編：画像の処理と解析（共立出版，東京，1981）。
- 2) R. O. Duda and P. E. Hart: *Pattern Classification and Scene Analysis* (John Wiley & Sons, New York, 1973).
- 3) R. A. Schowengerdt: *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing* (Academic Press, New York, 1983).
- 4) 画像処理アルゴリズムハンドブック（東大出版会，東京，1989）。
- 5) H. S. Chen: *Space Remote Sensing Systems* (Academic Press, FL, 1985) pp. 51-107.
- 6) American Society for Photogrammetry, ed.: *Manual of Remote Sensing*, 2nd ed. (American Society for Photogrammetry, VA, 1983). pp. 335-368.
- 7) F. T. Ulaby, R. K. Moore and A. K. Fung: *Micro Wave Remote Sensing* (Addison-Wesley, Mass., 1981).
- 8) J. P. Fitch: *Synthetic Aperture Radar* (Springer-Verlag, New York, 1988).
- 9) H. S. Chen: *Space Remote Sensing Systems* (Academic Press, FL, 1985) pp. 51-188.
- 10) American Society for Photogrammetry, ed.: *Manual of Remote Sensing*, 2nd ed. (American Society for Photogrammetry, VA, 1983) pp. 165-230, 873-922.