

# リモートセンシング：画像情報処理から時空間情報処理へ

北本 朝展<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 国立情報学研究所 〒 101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

E-mail: <sup>†</sup>kitamoto@nii.ac.jp

あらまし 本稿は、パターン認識・メディア理解 (PRMU) の観点からのリモートセンシングに関するサーベイである。まずリモートセンシングの概要についてまとめ、次にリモートセンシング画像情報処理の手法や、リモートセンシングに特徴的な画像情報処理の問題について関連研究を紹介する。そして、リモートセンシングの今後の方向性として、(1) マルチスペクトルからハイパースペクトルへの移行、(2) 地理情報学との融合、が注目すべき点であることを指摘し、これらに共通するのが「画像情報処理から時空間情報処理へ」という方向性であることを主張する。最後に PRMU 分野からの貢献に関する私見を綴る。

キーワード リモートセンシング、衛星観測、地理情報学、画像情報処理、時空間情報処理

## Remote Sensing: From Image Processing to Spatio-temporal Processing

Asanobu KITAMOTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Informatics, Hitotsubashi 2-1-2, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8430 Japan

E-mail: <sup>†</sup>kitamoto@nii.ac.jp

**Abstract** This paper gives a brief survey of remote sensing techniques from a viewpoint of pattern recognition and media understanding (PRMU). First we give a brief summary of remote sensing, and then introduce related work on both remote sensing image processing and some unique issues in remote sensing image processing. We moreover point out that the future direction of remote sensing is expected to be (1) from multispectral to hyperspectral, and (2) integrated with geoinformatics, and we further demonstrate that the commonality between these directions is a movement from image processing to spatio-temporal processing. Lastly we deliver our subjective opinions on possible contribution from the PRMU community to the remote sensing community.

**Key words** remote sensing, satellite observation, geoinformatics, image processing, spatio-temporal processing.

# 1. はじめに

リモートセンシング<sup>(注1)</sup>は人類に新たな視点を与える技術である。人類が暮らすこの地球を大局的・俯瞰的に眺める視点は、人類全体の生存に関わるような問題、すなわち、地球温暖化、オゾン層破壊、熱帯雨林破壊、砂漠化と水資源問題などの問題に客観的な判断材料を提供するために不可欠なものである。

その一方で、地球の状態を常時監視するセンサ技術としてのリモートセンシングは、社会生活や経済活動などの生活により密着した分野においても、その価値を増してきた。地球大気の状態を毎時監視する静止気象衛星はすでに我々の生活に馴染んだ存在であるし、また空間分解能(解像度)1mの超高分解能衛星の登場によって、災害情報収集、都市計画、農業利用などへの応用が非常にきめ細かなスケールで実現可能となった。

このような超高分解能衛星の威力を最も象徴的に示すのは、秘密軍事施設の発見と監視という用途かもしれない。当然ながら、そのような技術の詳細は公開されないが、こうした軍事技術としての利用価値が、リモートセンシングの飛躍的な発展を推し進めてきたという側面も否定できない<sup>(注2)</sup>[1]。

このようにリモートセンシングという分野を幅広くサーベイすれば、それだけで数冊の部厚い本となる[2]~[4]。ゆえに本稿では特にパターン認識とメディア理解(PRMU)に関係する話題を中心に、かなり主観的にトピックと視点を設定した。

## 2. リモートセンシングの概要

### 2.1 利用目的に応じた設計

リモートセンシング技術は原則として利用目的に応じて設計されるべきである[5]。リモートセンシングの利用者が地球に関するあらゆる研究分野にまたがることを考えれば、利用目的に応じた最適な設計に基づくリモートセンシング技術は、必然的に多様性に富んだ進化を遂げることになる。

しかし、このような設計の自由度や、個々の専門分野における独自手法の発展を表面的に捉えれば、リモートセンシングは雑多の個別技術の寄せ集めのように見えるかもしれない。また、個々の専門分野がより深く分化するにつれて、手法の汎用性よりは分野の個別性が重視されつつある傾向も否めない。し

(注1): 「リモートセンシング」とは、字義通りに解釈すれば「対象物とセンサとが遠く離れた観測方法」を指すが、一般的には「航空機・ヘリコプタ・あるいは衛星などの飛翔体に搭載したセンサから対象物を遠隔計測する方法」という狭い意味で使われる。本稿ではさらに、地球観測を目的とする場合のみに話題を限定する。

(注2): 現在は空間分解能 10cm 程度の軍事衛星が実在すると言われるが、商用衛星でも数年内に空間分解能 50cm の衛星を打ち上げる計画がある。

かし、リモートセンシングの背後に存在する原理は比較的単純である。すなわち

(本稿で扱う)リモートセンシングは、対象物と電磁波との相互作用、すなわち対象物による電磁波の反射・散乱・放射の強度を観測する方法である。

このような観測方法がある目的に利用したいと考えたとき、どの波長で、どのくらいの細かさで、どのくらいの頻度で観測するか、といった設計項目を決めていく必要がある。その際に、対象物と電磁波との相互作用に関する知識、地球大気と電磁波との相互作用に関する知識、あるいはリモートセンシング画像情報処理に関する知識、などを考慮しながら、利用目的に応じた最適なバランスを決定することが、リモートセンシング研究者の役割である。設計項目としては以下の3点が代表的である。

- (1) 分光特性 波長分解能、観測波長、波長範囲
- (2) 空間特性 空間分解能、観測場所、観測幅
- (3) 時間特性 時間分解能、観測(地方)時

### 2.2 分光特性

最初期の気象衛星がすでに可視域と赤外域の2波長帯のセンサを搭載していた[6]ことを考えると、リモートセンシングのマルチスペクトル(多波長)観測は歴史が古い。近年では紫外光からマイクロ波におよぶ幅広い波長帯の活用、あるいは非常に多数の観測帯域(バンド)を用いたハイパースペクトル観測への関心が高まっている。

#### 2.2.1 電磁波の反射・散乱を利用する場合

##### a) 受動型センサ

太陽光源から対象物に達した電磁波の反射を受動的に観測するセンサが大部分を占める。可視域(400nm~700nm)は、太陽光源の放射エネルギーがピークに達する波長帯であると同時に大気の窓(第2.2.3節)ともなっているため、リモートセンシングには最も適した波長帯の一つである。一般的には、可視域全体を単一の観測帯域とするパンクロマティック(panchromatic)センサの空間分解能が最も高いが、可視域を光の3原色にしたがって分割するナチュラルカラーセンサ、あるいはさらに多数のバンドを観測するマルチスペクトルセンサなどの方が応用範囲は広い。有名な地球観測衛星である米国LANDSATやNOAA、仏国SPOTなどは、ほとんどがこの種類のセンサを搭載している。

また、太陽という光源を最大限に活用するために、太陽同期軌道を用いる衛星が多い。この軌道には、衛星が通過する地方時を同一とし、太陽の照明条件やその他の観測条件をほぼ一定に保てるという利点がある。ただし同一の地方時であっても異なる年月日に

取得したデータを比較するためには、季節による太陽光強度の変化を考慮した補正値を計算したり、照明条件に不変な反射率を計算したりする必要がある。

またこのような反射率の計算には対象物の反射特性が関係する。リモートセンシングの対象物では、水面や都市などを除けば鏡面反射成分は少ないが、完全な散乱面であるランベルト面で近似できる場合と、ある程度の方向依存性が生じる場合とがある。そのような方向依存性のモデルである双方向反射分布関数 (bidirectional reflectance distribution function) の研究については物理モデル側からのアプローチに関心が集まっており、モンテカルロ法やレイ・トレーシング法を用いて物理モデルの研究が進んでいる [7]。

ここで受動型センサのやや特殊な例として、夜間の地球を光源とする DMSP-OLS<sup>(注3)</sup> センサを挙げておきたい。このセンサは、人間が用いる照明、火事、ガスの炎、漁船の灯火、そしてオーロラなど、夜間の微弱な光を観測できる。この観測結果は、人口推定や産業活動推定<sup>(注4)</sup>、さらには天文学における光害の評価、などの問題に活用できる。

一方で大気を中心に観測する衛星には大気の散乱を観測するものが多い。例えば、地球環境問題で有名になったオゾンの観測では、オゾン全量分光計 TOMS<sup>(注5)</sup> を用いて、大気中に分布するオゾン分子による太陽光の紫外線散乱光からオゾン量を推定する。

#### b) 能動型センサ

送信機から対象物に向けてマイクロ波域 (1mm ~ 1m) の電磁波を能動的に発し、その後方散乱の強度を観測するセンサである。アンテナから発したパルスが、対象物によって後方散乱されて戻ってくるまでの時間から、対象物までの距離を観測する、というのがその基本的な原理である。受動型センサに比較するとマイクロ波センサでは波長を比較的自由に選択できるため、検出対象の大きさと電磁波の波長を共振させることにより、特定の対象のみを抽出することもできる。

このような能動型センサを用いる理由の一つに雲の存在がある。というのも、波長数 cm の電磁波は雲粒 (粒径 ~ 10 $\mu$ m) にはほとんど影響を受けずに地上に到達し、地上で散乱した反射光も雲を通過して衛星まで到達するため、雲の有無に左右されない全天候型観測が実現するからである。例えば海上風を観測するためのマイクロ波散乱計 [6] は、最新の衛星では台風中心部のような厚い雲に覆われた海面からでも波の高さを計算し、台風周辺の風速推定を可

能とした。また、能動型センサには太陽光による照明が不要であることから、マイクロ波センサは日照時間の短い冬の高緯度地方の観測 (海氷など) にも利点がある。

それに対し、雨粒 (粒径 ~ 2mm) ほどの大きな粒子ではマイクロ波による散乱が生じるため、この性質を利用すると降雨強度も推定できる。例えば熱帯降雨衛星 TRMM<sup>(注6)</sup> は世界初の降雨レーダを搭載し、水平 1km、鉛直 250m の空間分解能で降雨の 3 次元観測を可能とした [8]。このように、マイクロ波はかつて不可能だった観測を次々に実現している。

ただしマイクロ波センサには、空間分解能が低いという弱点があった。この問題を解決するために考案されたのが合成開口レーダ SAR (synthetic aperture radar) [3], [9] である。これはコンピュータの利用によって空間分解能が高いセンサを仮想的に実現する方法であり、マイクロ波センサでありながら光学センサに匹敵する空間分解能を実現する。このような高い空間分解能を備えたマイクロ波センサにはデジタル標高地図の作成など種々の応用が開けている。

#### 2.2.2 電磁波の放射を利用する場合

物質はその温度と放射率によって決定されるエネルギーとスペクトル分布をもつ電磁波を放射している [8]。このような放射を観測し、対象物の温度 (輝度温度) を推定するのがこの方法である。地球表面の平均気温はおよそ 300K なので、そこからの黒体放射は波長約 9.7 $\mu$ m の熱赤外域が中心となる [5]。<sup>(注7)</sup>

放射から対象物の輝度温度を計算することにより、例えば雲の観測では、雲頂温度が低い雲ほど上空に雲頂が存在するという仮定から雲の高度を推定できるし、火山体の熱分布を噴火予知に活用することもできる。また放射は昼夜を問わずに放出されているため、夜間でも観測できるという利点がある。

#### 2.2.3 大気の窓

上記の説明では観測波長を任意に選択していたが、実際には大気の影響を抜きにして観測波長を論じることができず、大気による散乱・吸収が少ない波長域しか、観測波長を選択する余地はない。このように分光透過率が高く観測に適した波長域を大気の窓 (atmospheric window) とよぶ。太陽光が透過する可視域は、その代表的な例である。

ただし、気象観測のように大気の状態を把握することが利用目的である場合には、あえて分光透過率が低い波長域を選ぶ場合もある。ゆえに最適な設計は利用目的に応じて異なる。

(注3): Defense Meteorological Satellite Program / Operational Linescan System

(注4): 照明の明るさが人口の関数であると考え、また人口が多いわりに暗い地域はエネルギー供給が少ないと推定できる。

(注5): Total Ozone Mapping Spectrometer

(注6): Tropical Rainfall Measuring Mission

(注7): この意味では太陽光も約 6000K の黒体放射であるが、地球観測ではこの放射光の反射・散乱光を観測対象とする。

## 2.3 空間特性および時間特性

空間特性および時間特性は軌道の設計に深く関係した特性である。まず同一のセンサならば軌道が地表に近いほど空間分解能は高くなるため、軌道高度は空間分解能の一つの目安となる。例えば赤道上空約 36,000km の静止気象衛星「ひまわり」の空間分解能が約 1km なのに比べ、軌道高度約 700km の超高分解能衛星の空間分解能は 1m 以下である。

ただし、観測機器の大きさと地上へのデータ伝送性能には上限があることから、空間分解能と広域性とはトレードオフの関係になる。例えば、静止衛星の観測幅が地球の直径を超えるのに対し、超高分解能衛星の観測幅は 10km 程度にとどまり、観測の広域性や網羅性を望むのは難しい。ゆえに、空間分解能は高いほど優れているわけではなく、空間特性と時間特性の最適なバランスは利用目的に依存する。

同様のトレードオフは時間特性にも存在する。同一地点を最も頻繁に観測できるのは静止衛星であり、例えば静止気象衛星「ひまわり」の観測周期は最短 30 分であるが、静止位置から観測可能な範囲は東経 140 度を中心に地球表面の約 1/3 にとどまり、地球の反対側や極地方の観測は不可能である。一方、地球を周回する極軌道衛星は地球の任意の場所を観測できるが、観測周期は 1 日以上と長くなる。ただし観測方向を変更可能なポイントング機能を有する衛星を用いれば、指定地点にセンサを向けることで観測頻度を向上させることも可能である。

## 2.4 受動型センサの種類

受動型センサの設計は多様であるが [10]、以下の 3 つの方式に大別できる [11]。

(1) スキャンミラー式センサ 1 つの波長において受光素子を 1 つだけ用意し、進行方向の走査にはプラットフォーム自身の移動を、またそれと直角方向の走査には反射鏡や振動鏡による。広域観測に適するが高分解能センサには不向きである。

(2) プッシュブルーム式センサ リニアアレイ型のセンサを用いて帯状領域を観測し、進行方向の走査にはプラットフォーム自身の移動による。多くの高分解能衛星はこのセンサを用いている。

(3) イメージング式センサ 2 次元 CCD を用いて瞬時に 2 次元画像を取得する。プラットフォーム自身の移動を利用して、同一地点を多方向から複数回観測することができる。

# 3. リモートセンシング画像情報処理

## 3.1 前処理

リモートセンシングデータを画像解析に適した形に整えるためには、種々の前処理が必要である。こ

の補正処理の結果が、今後の処理結果すべてに響いてくるという意味で、信頼性の高い精密な前処理に関する研究は、地味ではあるが基礎的な研究として重要である [8]。

例えば、地表上での放射量を精密に推定するためには、太陽位置や大気状態により異なる減衰量のモデル化やセンサ感度の較正などの放射量補正が必要である。またリモートセンシング画像を地図に重ね合わせるためには、衛星固定座標系から地球固定座標系へ、さらには地図座標系への座標変換という幾何補正が必要である [9]。そしてサブピクセル (1 画素以内) の精度が必要な場合には、あらかじめ地図座標がわかっている地上基準点 GCP (ground control point) の画像座標と、リモートセンシング画像の特徴点とを位置合わせ [9], [12] ~ [14] することで、写像をより正確に求める必要がある。さらに、航空写真や超高分解能衛星でよく用いられる正射投影またはオルソ投影 (orthographic projection) では、地表面起伏も考慮した精密な幾何補正が適用される。

## 3.2 ビジュアライゼーション

リモートセンシングの利用形態として、画像の目視解読や目視判読、すなわち、画像を人間 (特に専門家) が目で「読み」判断を下すという方法が、実際には広く使われている。専門家は画素の濃淡パターンに現れる情報だけではなく、関連する背景知識も利用して総合的に判断を下せるという点で、コンピュータはまだクリティカルな問題には使われていない<sup>(注8)</sup>。例えば台風の強度推定という問題においても、気象衛星画像を専門家が目視判読するという方法が現在も用いられている [15], [16]。

このように最終的なゴールを「人間が画像を読む」ことに設定するならば、画像情報処理の果たすべき役割は、人間が読みやすい画像を生成する、という作業支援、あるいはリモートセンシングデータのビジュアライゼーションになる。このような手法としては、ヒストグラム平滑化やコントラスト強調、エッジ強調、知覚色空間を用いた擬似カラー表示などの基本的な手法 [4], [9], [17], [18] がすでに広く使われているし、同一センサの複数回観測や複数衛星の協調観測により得られるステレオペアから 3 次元構造を復元して表示する方法 [13], [19] も、航空写真の時代から使われている。ただし人間にとっての読みやすさという観点には、人間の視覚や心理学に関する考察が不可欠であり [20]、そのような知識を踏まえた情報の強調・変換・要約・提示に関しては研究の余地があると考えられる。

(注8): ただし非常に高いレベルの専門家になるには 10 年単位の経験が必要であるため、このような人材育成に国家的に取り組んでいる国もある。

### 3.3 形状解析

形状解析は道路検出などの人工物検出や、宇宙から遺跡を探す宇宙考古学(space archaeology) [3], [21]、あるいは流体(雲および海流)の渦形状の検出、などが主な利用用途である。また用いられる手法には、モルフォロジー [22] や動的輪郭モデルなどがある。道路や建築物などの人工物が自動的に検出できれば、それをベクトルデータに変換することで地理情報システムへの入力データとして使うことができる。また宇宙考古学とは、地中や水中に埋もれた古代の道路や城壁をマイクロ波センサを用いて検出するものであり、世界各地の遺跡探査で利用され始めるなど、人文科学への応用の広がりが期待されている。

### 3.4 特徴抽出

特徴抽出はそれ自体が目的ではなく、分類・統計・データベースなどの処理に用いるために抽出する場が多い。特徴抽出処理は一般の画像処理とほとんど同じであるが、比較的良好に用いられる手法として、マルチスペクトル画像の次元を削減する主成分分析、多重解像度構造を衛星画像から抽出するウェーブレット変換 [13]、地表や雲領域の表面形状を計測するテクスチャ解析 [9] などがある。

### 3.5 データベース・データマイニング

リモートセンシング画像のデータベースでは、観測日時や観測場所などのメタデータによる検索方法という、画像検索システムとして見れば初歩的なものが多く、画像内容に基づく検索方法としては、画像(ブロック)の雲量(注9)に基づく検索が実用化されている程度である。

より深い画像内容を用いた検索方法として、雲のパターンを対象とした画像検索への試みがいくつかあるが [23] ~ [26]、利用者側の多様な要求に応えきれないのが現状である。また過去に遡ってデータベース化するためには、大規模データセンターでのペタバイトクラスのアーカイブを扱うための方法が難しい課題となる。ただし、大量のデータの中から必要なデータを検索したり、有用なデータや法則を発見したり(データマイニング [27] ~ [29]) するという機能は、将来的にリモートセンシングデータを有効に活用するためには不可欠の技術である。ゆえに、今後のさらなる研究が望まれる課題である。

## 4. リモートセンシングに特徴的な画像情報処理問題

### 4.1 スケール

「スケール」はリモートセンシングにおいて非常に重要な概念である [30]。例えば空間分解能 1km の低

分解能衛星画像と空間分解能 1m の高分解能衛星画像とを比較すると、前者の 1 画素は後者の 1000 × 1000 画素ブロックに相当する。ゆえに、たとえ後者の画像に道走る車が見えたとしても、それらは前者の画像においては無視できる存在でしかない。このようにスケールの異なる対象物が混在するのがリモートセンシング画像の一つの特徴である。またその特別な場合として、どのスケールで眺めても同じ性質を示すフラクタル [31] があり、雲などは比較的フラクタルに近い性質を示すことが知られている [9]。

このように観測結果がスケールに依存するという性質はリモートセンシングにおいて大きな問題である。複数のスケールで観測した衛星画像を組み合わせる処理はデータ融合(data fusion) の一つの典型例であるが、その性質については多くの研究がある。

### 4.2 ミクセル問題

このスケールの問題と密接に関連するのが、混合画素(mixed pixel / mixel)の問題である。画素(pixel)とは一般に画像における分割不能の最小単位として定義されるが、もし画素に対応するグラントゥールズが不均質な領域の集合である場合には、単一画素内に複数の性質が混合して観測されることになる。このような混合の有無を検出し、その(面積)比率を計算したい、というのがこの問題に取り組む動機である。このような問題は一般の画像処理ではあまり論じられないが、単一画素が 1m<sup>2</sup> ~ 1km<sup>2</sup> となるリモートセンシング画像ではこの問題は避けて通れないため、多くの研究者がこの問題に取り組んでいる。

混合画素のモデルとして最も基本的なものは以下の線形モデルである [32]。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \mathbf{s}_m(t) + \mathbf{n}(t) = S(t) \mathbf{a}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

ここで観測値  $\mathbf{x}(t)$  は既知であるが、構成要素  $S(t)$  の値については既知あるいは未知、また各構成要素の比率  $\mathbf{a}(t)$  は未知であり、凸結合条件 ( $a_m(t) > 0$  for  $\forall m, \forall t$  および  $\sum_{m=1}^M a_m(t) = 1$  for  $\forall t$ ) を満たす。式 (1) の解法は多数提案されているが [33]、主なものは以下のように大別できる。

(1) (制約つき) 最小 2 乗法 [34] ~ [36]  
構成要素の値を既知とすれば、一般化逆行列法、あるいは凸結合条件を制約とする最小 2 乗法を式 (1) に適用して解くことができる。

(2) ファジーメンバーシップ関数による方法 [37]  
多くの研究者が用いている方法は実質的には、混合分布モデルで推定された多次元正規分布の事後確率分布をファジーメンバーシップ関数と呼び、それを各構成要素の比率として用いる方法に等しい。

(3) 幾何モデルに基づく方法

(注9): 商業衛星データ販売会社にとっては、雲量の大小がデータの品質に決定的な影響を及ぼすため。

田畑など均質領域の境界が幾何モデルで表せる場合には、境界を画像空間上で幾何学的に求めることで各構成要素の比率を推定できる。

#### (4) 確率モデルに基づく方法

構成要素  $S(t)$  に関する確率モデルを考え、教師なし学習によって確率モデルの推定と各構成要素の比率を推定する。制約つき独立成分解析を用いる方法 [38] やミクセル分布を用いる方法 [39], [40] などがある。

## 5. 画像情報処理から時空間情報処理へ

### 5.1 マルチスペクトルからハイパースペクトルへ

リモートセンシングでは比較的初期の時代から、マルチスペクトルによる観測、すなわち 4~12 個のバンドを用いた観測が始まっていた。また代表的な衛星である LANDSAT や NOAA などは、一連の衛星として同一の特性をもつセンサを継続的に搭載したこともあって、マルチスペクトル画像に関する研究も大きく進展した。

しかしここ数年は、次世代の観測方法である画像分光 (imaging spectrometry)、すなわち波長幅が比較的狭いバンドを多数 (数十から百以上) 用意し、可視域から赤外域にかけてのスペクトルを網羅的に観測するハイパースペクトル画像が注目を集めている [41]。例えば AVIRIS<sup>(注10)</sup> は 400nm から 2500nm の波長帯に 224 もの隣接したバンドをもつセンサであり、航空機リモートセンシングにおいて既に実績をあげている。またこのようなセンサの衛星への搭載も、今後は本格的になると予想される。また、今後の標準的な地球観測センサになると期待される MODIS<sup>(注11)</sup> センサは、36 のバンドを 250m から 1000m の空間分解能で実現している。このバンド数は今後もさらに増えていくと考えられる。

このように、マルチスペクトル画像に比べてハイパースペクトル画像の特徴空間次元は大幅に大きくなるため、統計的パターン認識 [42], [43] の分野でおなじみの次元の呪い (curse of dimensionality) の影響が顕著になる可能性がある<sup>(注12)</sup>。また、網羅的なスペクトルデータが大量に得られる環境では、スペクトルデータをうまく「捨てる」ことが重要になるかもしれない。こうしたデータ取得環境の変化につれて、従来のややアドホックな手法から、系統的なパターン認識理論への要求が高まってくると予想する。

しかし同時にこの動きは、リモートセンシング画像情報処理自体にも変革を迫るものだろう。ハイパー

スペクトル画像は 2 次元データ配列というよりは、波長方向の軸を加えた 3 次元データ配列であり、さらにこれに時系列を加えると 4 次元データ配列となる。またこのような多次元データに、マイクロ波観測のように全く統計的性質の異なるデータを融合しようとする場合に、古典的な多次元画像処理の枠組で十分なのかはまだ不明である。ゆえに、画像情報処理という枠組にとどまらず、グリッド格子上の時空間情報処理 [45], [46] などのより一般的な枠組への拡張も検討する必要があると考える。

### 5.2 地理情報学との融合

リモートセンシングデータは、すべての画素が地理的座標に対応しているという意味で地理的データでもある。そして、リモートセンシングデータを単なる画像データとしてではなく地理的データとして扱うことの利点は、そのような地理的座標に関する事前情報を活用できるという点にある。例えば、山地と平地では明らかに画像の性質が異なることが事前にわかるならば、そのような事前情報を活用する分類手法の方が優れた性能を示す。ゆえにリモートセンシングデータは単なる画像データとして扱うべきではなく [5], [18]、地理的な空間データ、あるいは時間座標も加えた時空間データとして扱うべきである。

一方で地理情報学 (geoinformatics) の立場からも、リモートセンシングデータは魅力的なデータである。地理情報学の基盤となるのは地理情報システム GIS (geographic information system) [21], [47], [48] であるが、ダイナミックに変動する事象に対しても迅速に対応可能な GIS を構築するためには、リモートセンシングによる広域的・網羅的かつ迅速なデータ収集が不可欠だからである。

例えば、超高分解能衛星を用いて、空間分解能 1m の画像を定期的に蓄積していけば、都市域において個々の建築物レベルの変化を検出できるようになる。また災害情報のリアルタイム収集として、航空機との併用による迅速な災害情報 GIS の構築なども可能になる。さらに、地球環境情報を網羅的に収集し統一的な基盤のもとにアーカイブする技術は、地球規模の地理情報基盤「デジタルアース」[49] などを実現するには不可欠な技術と言える。

このように、リモートセンシングと地理情報学との融合には双方に利点があるため、今後もこの方向性はますます進展していくと考えられる。

### 5.3 PRMU 分野からの貢献

このように、リモートセンシングは地理情報学との結び付きを強めているが、その結び付きをより強固にするためには画像処理・パターン認識技術による処理の自動化が必須である。特に期待が大きいのは、おそらく「画像分類」であろう。軍事施設監視

(注10): Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer

(注11): Moderate Resolution Imaging Spectrometer

(注12): ただし主成分分析の結果などから、特徴空間の本質的な次元は低いとの結果もある [44]。

のようなクリティカルな目的を別とすれば、日々発生する大量の衛星データを人手で処理しては、データの爆発に追い付けない。そこでリモートセンシング画像を自動的に分類し変化を検出できるような手法、特に高次元特徴空間における高精度かつ高速な画像分類法には、大きなニーズがあると考えられる。

しかし改めて考えれば、この種の要求は以前からあったものである。ではなぜ、今日に至るも、このような要求が満たされていないのだろうか。その原因の一つは、パターン認識研究者とリモートセンシング研究者の関心の違いにある、と個人的には感じているが、以下にその違いを主観的に綴ってみたい。

リモートセンシング研究者の関心の特徴として、本稿では「画素へのこだわり」を指摘しておきたい。リモートセンシングデータは地球に関する生の観測データであるため、画素に対応するフィールドを実際に踏査することで、観測されるべき真の値、すなわちランド/シー・トゥルース (ground/sea truth) が得られる場合も多い。そうして得られた真の値は、もちろんセンサのキャリブレーションに活用できる。しかしリモートセンシング研究者としてはそこから先が本当の勝負である。すなわち、画素値の濃淡がどのような物理的意味をもつか、それが結果的にどのような画像パターンとして反映されるかという、画像生成の物理モデルにまで問題を掘り下げ、真の値と衛星観測データとの間に誤差が生じる原因を物理モデルの立場から徹底的に説明しつくすことが、リモートセンシング研究者の一つの目標なのである。しかし PRMU 分野ではそれが「雑音」の一言で片付けられてしまう。そこにリモートセンシング研究者は不満を覚えるのではないか。また第 4.2 節に述べた「ミクセル問題」も、リモートセンシング研究者の「画素へのこだわり」の一つの現れである。

このような「画素へのこだわり」をも満足させるような画像分類法とは、おそらく問題領域独立の万能アルゴリズムではなく、本質的に問題領域依存のパラメータ・構造を設定可能な統計的学習モデルという形になるだろう。例えばリモートセンシング画像の分類において場 (context) の情報を考慮すべきであることは以前から指摘されているが [8]、未だに決定的なアルゴリズムがないのは、場の問題領域依存性をモデル化できないことが原因の一つであろう。

PRMU 分野からは 1970 年代から 1980 年代初頭にかけて多くの貢献があった。例えば航空写真の構造解析に関する研究 [50] や、テクスチャに関する研究 [9] など、リモートセンシングの初期に提案されたアイデアは数多い。リモートセンシングが変革を遂げようとする現在は、PRMU 分野からの貢献を再現する一つのチャンスではないだろうか。

## 6. おわりに

リモートセンシングは数年前までは限られた利用者のための特殊なデータだったかもしれない。また現在でも生のデータから扱うのは厄介である [51]。しかし、基本的な補正済みのデータを購入し自分で解析してみるといった使い方であれば、コンピュータの劇的な性能向上のおかげで、少なくともハードウェア的な問題はほとんどなくなった [17], [52]。また GPS (Ground Positioning System) や GIS の発達によって、フィールドワークと連動させるための研究基盤も格段に向上した。リモートセンシングデータの利用件数は日本ではまだ少ないが、高分解能衛星の登場やハイパースペクトルセンサの普及によって、地球温暖化のような大きな問題から都市管理のような身近な問題にまで、リモートセンシングデータの利用がさらに一般的になることを期待したい。そのためには、使いやすいデータを探しやすい形で提供する、ための研究開発が重要であろう。

### リモートセンシングに関する情報

リモートセンシングに関する研究成果は、電子情報通信学会誌、情報処理学会論文誌、IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence、Pattern Recognition (Letters) 等の PRMU に馴染みの深い雑誌に掲載されることもあるが、リモートセンシングそのものを中心に据える学術雑誌として著名なのは、IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (GRS)、International Journal of Remote Sensing、Photogrammetric Engineering and Remote Sensing、Remote Sensing of Environment、Remote Sensing Reviews 等である。強いて言えば PRMU の研究分野に最も近いのは IEEE GRS であろう。またリモートセンシング分野における日本の中心的な学会組織は、日本写真測量学会、および日本リモートセンシング学会であり、それぞれが学術雑誌を刊行している。さらに個別の専門分野にリモートセンシングを利用したという実証的な研究成果は、専門分野の学術雑誌に散在しているため、それらを網羅することは事実上不可能であろう。

また、この分野の中心的な国際会議に、IEEE Geoscience and Remote Sensing Society が毎年開催する International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) がある。これは発表件数が 1000 件以上に達する大きな国際会議であるが、その他にも SPIE (The International Society for Optical Engineering) や IAPR (International Association for Pattern Recognition) TC7 が国際会議を主催している。

#### 文献

- [1] J.C. Baker, K.M. O'Connell, and R.A. Williamson, editors. *Commercial Observation Satellites*. Rand Corporation, 2001.
- [2] S.A. Morain and A.M. Budge, editors. *Earth Observing Platforms and Sensors*, Vol. 1 of *Manual of Remote Sensing*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, third edition, 1997. (Available only as a CD-ROM).
- [3] F.M. Henderson and A.J. Lewis, editors. *Principles & Applications of Imaging Radar*, Vol. 2 of *Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Inc., third edition, 1998.
- [4] A.N. Rencz, editor. *Remote Sensing for the Earth Sciences*, Vol. 3 of *Manual of Remote Sensing*. John Wiley

- & Sons, Inc., third edition, 1999.
- [5] T.M. Lillesand and R.W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc., fourth edition, 2000.
- [6] S.Q. Kidder and T.H.V. Haar. *Satellite Meteorology – An Introduction*. Academic Press, 1995.
- [7] M.I. Disney, P. Lewis, and P.R.J. North. Monte carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 18, pp. 163–196, 2000.
- [8] 清水邦夫 (編). 地球環境データ – 衛星リモートセンシング. データサイエンスシリーズ. 共立出版, 2002.
- [9] 高木幹雄, 下田陽久 (編). 画像処理ハンドブック. 東京大学出版会, 1991.
- [10] G. Joseph. Imaging sensors for remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, pp. 257–342, 1996.
- [11] 竹内延夫 (編). 地球大気分光リモートセンシング. 学会出版センター, 2001.
- [12] L.G. Brown. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Survey*, Vol. 24, No. 4, pp. 325–376, 1992.
- [13] J.L. Starck, F. Murtagh, and A. Bijaoui. *Image Processing and Data Analysis: the Multiscale Approach*. Cambridge University Press, 1998.
- [14] D.I. Barnea and H.F. Silverman. A class of algorithms for fast digital image registration. *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-21, No. 2, pp. 179–186, 1972.
- [15] V.F. Dvorak. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. *NOAA Technical Report NESDIS*, Vol. 11, pp. 1–47, 1984.
- [16] 鈴木和史, 元木敏博 (編). 台風 – 解析と予報 –, 気象研究ノート, 第 197 巻. 日本気象学会, 2000.
- [17] 長谷川均. リモートセンシングデータ解析の基礎. 古今書院, 1998.
- [18] J.R. Jensen. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice-Hall, 1996.
- [19] L. Zhou, C. Kambhamettu, and D.B. Goldgof. Extracting nonrigid motion and 3D structure of hurricanes from satellite image sequences without correspondences. In *Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 1999.
- [20] R.R. Hoffman and A.B. Markman, editors. *Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors*. Lewis Publishers, 2001.
- [21] 電気学会・空間情報統合化技術調査専門委員会 (編). GIS の基礎と応用. オーム社, 2001.
- [22] P. Soille and M. Pesaresi. Advances in mathematical morphology applied to geoscience and remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 9, pp. 2042–2055, 2002.
- [23] 北本朝展, 高木幹雄. 類似画像検索システム構築のフレームワークとしての階層モデル. 電子情報通信学会技術報告, Vol. PRMU97-58, pp. 25–32, 1997.
- [24] 北本朝展, 高木幹雄. 待ち行列型遺伝的アルゴリズムを用いた対話的な画像散策法. 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 728–738, 1998.
- [25] F. Dell’Acqua and P. Gamba. Query-by-shape in meteorological image archives using the point diffusion technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 9, 2001.
- [26] A. Kitamoto. <http://www.digital-typhoon.org/>.
- [27] J. Han and M. Kamber. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Academic Press, 2001.
- [28] A. Kitamoto. Spatio-temporal data mining for typhoon image collection. *Journal of Intelligent Information Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 25–41, 2002.
- [29] A. Kitamoto. IMET: Image mining environment for typhoon analysis and prediction. In C. Djeraba, editor, *Multimedia Mining*, pp. 7–24. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] D.A. Quattrochi and M.F. Goodchild, editors. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Lewis Publishers, 1997.
- [31] B.B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, 1982.
- [32] A. Kitamoto. Fractional component analysis (FCA) for mixed signals. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR’02)*, Vol. 3, pp. 383–386. IEEE, 2002.
- [33] C. Ichoku and A. Karnieli. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, pp. 161–186, 1996.
- [34] J.J. Settle and N.A. Drake. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 6, pp. 1159–1177, 1993.
- [35] 稲村実. カテゴリー分解に基づくリモートセンシング画像データの解析. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J70-C, No. 2, pp. 241–250, 1987.
- [36] D.C. Heinz and C-I. Chang. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 3, pp. 529–545, 2001.
- [37] F. Wang. Fuzzy supervised classification of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 2, pp. 194–201, 1990.
- [38] L. Parra, C. Spence, P. Sajda, A. Ziehe, and K-R. Müller. Unmixing hyperspectral data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 12, pp. 942–948, 2000.
- [39] 北本朝展, 高木幹雄. ミクセル密度を含む混合密度推定を用いたミクセルの面積占有率推定. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1160–1172, 1998.
- [40] 北本朝展, 高木幹雄. ミクセルの内部構造を反映する面積占有率密度を用いた画像分類法. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 11, pp. 2582–2597, 1998.
- [41] Special issue on analysis of hyperspectral image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 7, , 2001.
- [42] A.K. Jain, R.P.W. Duin, and J. Mao. Statistical pattern recognition: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 1, pp. 4–37, 2000.
- [43] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋. パターン認識. オーム社, 1998.
- [44] P.S. Thenkabail. Optimal hyperspectral narrowbands for discriminating agricultural crops. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 20, pp. 257–291, 2002.
- [45] N.A.C. Cressie. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [46] 間瀬茂, 武田純. 空間データモデリング – 空間統計学の応用. データサイエンスシリーズ. 共立出版, 2001.
- [47] P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind. *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [48] 野上道男, 岡部篤行, 貞広幸雄, 隈元崇, 西川治. 地理情報学入門. 東京大学出版会, 2001.
- [49] Al Gore. The digital earth: Understanding our planet in the 21st century. <http://www.digitalearth.gov/VP19980131.html>, 1998.
- [50] 松山隆司, 長尾真. 航空写真の構造解析. 情報処理, Vol. 21, No. 5, pp. 468–480, 1980.
- [51] T.E. Bell. Remote sensing. *IEEE Spectrum*, No. 3, pp. 24–31, 1995.
- [52] 福田重雄. パソコンで楽しむアースウォッチ. 日本放送出版協会, 1999.