リモートセンシング概論

東京大学生産技術研究所 村 井 俊 治

リモートセンシング (Remote Sensing) の技術は、すでに 1960 年代初期から研究が始められてきたが、最近のエレクトロニクス、人工衛星、コンピューター、分光工学などの発達により、従来の航空写真の分野も包括されたリモートセンシングの分野が開拓された。ここでは述べなければならない多くのものから、特にリモートセンシング情報処理システムについて概説する。

1. リモートセンシングの概念

まずはじめに、リモートセンシングとはなにかを簡単に述べてみよう。リモートセンシングは、日本語で遠隔探査と訳されることがあるが、内容は以下のとおりである。

リモートセンシングとは、直接手に触れないで、対象物や現象に関する電磁放射の情報を収集し、われわれの環境を調査する技術である。

収集される情報は、対象物から反射または放射される電磁スペクトルに関する情報である。

電磁スペクトルに関する情報を収集する装置をセンサーといい、カメラやマルチスペクトルスキャナーなどがある。センサーが搭載される場所はプラットフォームとよばれ、航空機や人工衛星などがこれにあたる。

リモートセンシングの定義を言いなおすと、“リモートセンシングとは、航空機や人工衛星などのプラットフォームに搭載されたセンサーを用いて、地表の対象物から反射または放射される電磁スペクトルを測定し、それらのデータを用いて、対象物や現象に関する情報を得る技術である”となる。

リモートセンシングにおいて、電磁スペクトルの情報を収集することにより、対象物や現象を判読することができるのは、つぎに述べるような物体のスペクトル特性による。すなわち、“すべての物体は、種類および環境条件が異なれば、ことごとく異なる電磁波の反射または放射のスペクトル特性を有する”。

2. リモートセンシングされるデータ

航空機や人工衛星などのプラットフォームから地上の物体のスペクトル特性を測定する場合、リモートセン

されるデータは、つぎの要因に依存する。

- (1) 物体の反射または放射のスペクトル特性
- (2) 光源 (太陽) のスペクトル特性
- (3) 光源の入射角と物体およびセンサーの位置関係
- (4) 大気の影響、放射、透過、吸収、散乱の特性
- (5) センサーの特性

図 1 は、対象物、光源 (太陽)、大気、センサーの間の電磁波の経路を示している。この図からもわかるようにリモートセンシングされたデータには、対象物からの電磁スペクトルのほかに、大気からのノイズが含まれる。またセンサーの性能に起因する各種の誤差やひずみがある。

したがって、センサーによって収集されるデータは、地表の物体のスペクトル特性そのものでなく、ラジオメトリックおよび幾何学的な誤差を有する画像データである。

3. リモートセンシング情報処理システム

リモートセンシング情報処理システムは、つぎの機能をもつことが必要である。

(1) データ収集

人工衛星、航空機および地上において電磁スペクトルの測定を行う。地図や資料などからの補助

図 1 リモートセンシングの概念

“General Description on Remote Sensing” by Shunji Murai (Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo)

図 2 リモートセンシング情報処理システム

データの収集も含まれる。

(2) データハンドリング

収集された原データを後続作業に便利のように変換、注記、数値化、ディスプレイなどを行う。

(3) ラジオメトリック補正

画像のエンハンスや、太陽入射角、視野角、雲などによる影響を補正する。

(4) 幾何学的補正

レジストレーションやマッピングの幾何学的補正を行う。

(5) データ圧縮

データの格納と再生に便利のように、再配列、内挿、サンプリング等を行う。

(6) 判読および応用

パターン認識、多変量解析、統計処理などにより対象物を識別し、現象を解析する。

(7) データ格納および再生

リモートセンシング画像データバンクを作成する。

以上に述べた機能の流れを図示すると、図2のようになる。以下に上記の機能について概観することにする。

4. データ収集

リモートセンシング画像のデータを取り扱ううえでのむずかしさは、つぎに述べる原因による。

- (1) データがきわめて多量であり、多次元である。
- (2) 数多くのセンサーの種類があり、それぞれデータフォーマット、解像力、座標系、精度等が異なる。
- (3) 環境条件、地域、時間による変動が大きいのにもかかわらず、対象物や現象の変化の検知をしなければならない。
- (4) ノイズが含まれている。
- (5) 数多くの前処理や補正が必要である。
- (6) 異なるチャンネル間の画像の重ね合わせのほか

に、地上の地理的位置との対応が必要である。

- (7) 画像データと、地上調査や補助データとの対応をつけなければならない。

現在、開発されているセンサーにはつぎのものがある。

- (a) 航測カメラ (MC)
- (b) マルチバンドカメラ (MBC)
- (c) マルチスペクトルスキャナー (MSS)
- (d) サイドルッキングレーダー (SLR)
- (e) スペクトロメーター (SPM)
- (f) マイクロウェーブラジオメーター (MWR)
- (g) レーザーレーダー (Lidar)
- (h) スキャロメーター (SCM)

表1は上記のセンサーと波長バンド、チャンネル数またはバンド数、視野角、データ様式を示したものである。

表 1 センサーとデータ様式

センサー	波長バンド (μ)	チャンネル数	視野角 (度)	解像力	データ様式
MC	0.4 ~ 0.88	1	90~120	0.1 mrad.	フィルム
MBC	0.4 ~ 0.88	4	30	0.15 mrad.	フィルム
MSS	0.38~14.0	11	90	2 mrad.	FM テープ HDDT
SLR	3×10^4 (10 GHz)	1	50	15 m	フィルム
SPM	0.1 ~ 1.0 1.0 ~ 100	1	20	1 mrad.	FM テープ
MWR	2×10^4 (14 GHz)	1	48	26 mrad.	FM テープ
Lidar	0.63	1	1 mrad.	1 m	FM テープ
SCM	13.3 GHz	1	120	25 m	FM テープ

5. データハンドリング

データハンドリングでは、主に原データを、写真処理、変換、数値化などにより、陽画や CCT などに変換

表 2 データハンドリング

原 データ	変換方法	変換データ
フィルム	{現像処理 {ディジタイズ	トランスパレンシー、 プリント CCT
アナログ磁気テープ	{AA 変換 {AD 変換	{写真、図 {CCT
ハイデンシティーディジタルテープ (HDDT)	DD 変換	CCT, ディスプレイ

図3 データハンドリングシステム

する。表2はデータハンドリングによる変換を示しており、図3はデータハンドリングのシステムを示している。

ディジタル処理する場合には、フィルムの場合ディジタイザー、アナログテープの場合AD変換器、ハイデンシティーディジタルテープの場合DD変換器（ディジタルのデータを他のディジタルデータに変換する装置）によりCCT（コンピュータ用磁気テープ）に変換しなければならない。

6. ラジオメトリック補正

画像データの前処理としてラジオメトリック補正が必要である。ラジオメトリック補正にはつぎのものがある。

(1) エンハンスメント

濃度分割、等濃度図作成、コントラスト強調、加減算、スムージング、フィルタリング、微分などを行う。

(2) 画像データの補正

画面の位置に関係なく、画面全体にわたって補正の必要なものと、点の位置によって、一点一点画像データを補正しなければならないものがある。後者のものには、シェーディング、太陽光入射角、視野角など、定性的かつ定量的に補正の可能なものと、輝度変調、雲のかげ、地形起伏など、補正の困難なものがある。エンハンスメントについては、従来から画像工学の分野で画像処理の技法として取り扱われているので、ここでは省略する。

(3) キャリブレーション

異なるセンサー、日時、画面のデータを参照体や基準に合わせて補正する必要がある。

7. 幾何学的補正

画像データの幾何学的補正のつぎに示す場合に必要となる。

- (1) 地理的な位置を正確に求めたいとき。
- (2) 異なるスペクトルバンドの画像を重ね合わせたいとき。
- (3) 異なる日時またはセンサーでとられた同じ場所の画像を重ね合わせたいとき。

幾何学的な誤差やひずみはつぎの原因によるものに分類できる。

- (a) センサーの幾何学的特性に起因した誤差
- (b) プラットフォームの姿勢に起因した誤差
- (c) 地表の起伏に起因した誤差

現在、リモートセンシングにたずさわっている人達が主に直面する幾何学的補正の問題は、大きくわけるとつぎの3つの場合である。

(1) レンズカメラによる写真画像

得られる画像は中心投影像である。写真の幾何学は写真測量の分野で扱われている。一般に1枚の写真から撮影された対象物の3次元的位置を求めることができないので、実体ステレオ写真を用いて地理的位置を求める。マルチバンドカメラによる写真の重ね合わせはアナログ光学的には、人間の視覚にたよって行われる。ディジタルの場合には、いわゆる指標（fiducial mark）がないので、ディジタイズするときに座標系の軸を合わすか、あとでソフトで重ね合わせをするかしなければならない。厳密な正確さは期待できない。航測用カメラを4台使用したマルチバンド写真をとることが可能であれば、指標を用いたディジタル化が可能となる。日時の異なる写真どうしの重ね合わせは、中心投影点、すなわちカメラの位置が異なれ

ば中心投影像の特徴からして不可能である。ただし、実体視は可能である場合がある。

(2) 航空機搭載マルチスペクトルスキャナーの画像

将来この画像が多くとられると思われるが、幾何学的問題の面からは一番困難である。すなわち、異なるチャンネル間の画素の重ね合わせは、写真に比較して完全であるが、1つ1つの画素が地上のどここの位置に対応しているかをデジタルに処理することに多くの問題点があるからである。まず、航空機は3軸の傾きをもち、高度およびコースも変動する。このため、スキャンラインは平行かつ等長であるとは限らない。航空機の姿勢に関する情報はジャイロからのものしか期待できないが、ジャイロの情報はきわめて精度が低い。仮りに航空機が安定して航行しても、地形の起伏のために画像のディストレーションが局地的に生ずる。写真の場合にくらべてむずかしいのは、写真では1枚の画面内で同じ幾何学がなりたつのに対し、スキャナー画像では1本1本のスキャンラインごとに異なる幾何学的条件を考慮しなければならないことによる。要約するなら、地形が平坦なところであれば、高次の多項式を用いてスキャン画像の地理的補正は可能であるが、一般には地図化のための高い精度は望めない。

(3) 人工衛星搭載マルチスペクトルスキャナーの画像

この場合、航空機搭載のものにくらべて異なるのは、地表が平坦あるいは回転楕円体と見てさしつかえないことである。また人工衛星の飛行状態が航空機にくらべはるかに安定しており、ゆるやかに連続した姿勢変化しかない。しかし、人工衛星は3軸の傾きを持ち、高度変化もする。また1本のスキャンの間に衛星は動くし、地球も動く。またスキャンミラーの速度も一定ではないので、スキャンラインの対地速度は正弦曲線に似た変化をする。このような幾何学的ひずみをすべて合成すると、3次の高次多項式でほぼ補正することが可能となる。画像の中に良好な基準点があれば、著者の経験からすれば、地球資源衛星(ERTS)の画像で100 m以内の地理的補正が可能である。

デジタル処理のなかで幾何学的補正はきわめて重要な部門を占めているので、もう少し詳しく述べてみよう。

いま画像座標を (u, v) とし、それに対応する地上の点の座標を地上の測地座標を (X, Y, Z) とすると、つぎの関数関係がなりたつ。

$$\begin{cases} u=f(X, Y, Z) \\ v=g(X, Y, Z) \end{cases}$$

写真の場合、焦点距離 f と、基準点の座標を与えて、カメラ位置 (X_0, Y_0, Z_0) および3軸の傾き $(\kappa, \varphi, \omega)$ を解くことにより、上記の関数関係が求まる。

ERTSのマルチスペクトルスキャナー画像の場合、地形の起伏を考慮しなくてよいから Z は考えなくてよい。この場合、3次の高次多項式をあてはめ、画面内に約20点ないし30点の基準点を設定して、多項式の係数を求めればよい。

8. データ圧縮

データ圧縮は、つぎの目的で行われる。

- (1) 無用のデータを除去する。
- (2) 特徴やパラメーターの形でデータを保存する。
- (3) 精度をおとしても、計算処理時間を短縮する。
- (4) 記憶容量を節約する。

データ圧縮は、データをなるべく少なくして、得る情報を多くしようとする技術ともいえる。データ圧縮の方法は、つぎのようなものがある。

- (a) 等間隔にデータを除去する。
- (b) 等時間ごとにデータを除去する。
- (c) ランダムにデータ除去する。
- (d) ある関数のもとにデータ除去または保存を行う。
- (e) 特徴のあるデータのみ保存する。

画像データの圧縮の場合、除去したデータを保存されたデータから内挿して画像化すると、だいたい1:6ぐらいのデータ圧縮をしても人間の視覚ではほとんど差がわからないといわれている。

9. 判 読

リモートセンシングのなかでも最も重要な部門である。

いま、一般化するために、マルチスペクトルの画像の信号が $x_1, x_2, \dots, x_n$ とし、これが地上で、ある分類 y であるとする、リモートセンシングの判読は、つぎの関数関係を求めることになる。

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

この関数には、大気の影響や画質などによる影響因子が含まれている。また、信号のばらつきがあって、ある種の分布を構成する。

ここで、 y は連続量でなく分類量であり、記号でも数字でもよい値であり、 x_i は一般には連続量と考えられるが、濃度分割や区分の仕方によっては分類値と考えられる場合もある。したがって一般には、多変量解析の手

図 4 グランドトルスデータを用いた自動判読の原理

法が有効に利用できる。

自動判読の方法は大きく分けると、つぎの 5 つになる。

(1) グランドトルスを用いる方法 (supervised techniques)

グラントトルス (地上で測定されたスペクトル特性のデータ) により、あらかじめ有限箇所および有限個の既知の物体の y^* と $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ の測定をしておき、画像座標 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の中で識別領域を確立しておき、未知の $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対する y を判読する。

この方法の長所は、地上調査の結果を用いるので、調査法さえ完全なら精度が良いことである。欠点は、サンプリングの選択を適正に行うことが大変なと、労力のかかることである (図 4 参照)。

(2) 相対的な分類を行う方法 (unsupervised techniques)

グラントトルスデータを用いないで、 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の画像空間の中で同一グループを形成していると思われる有限個のグループに分け、それらのグループが何を意味しているかを地上調査により求める。この方法の長所は、グラントトルスの収集が不要であることと、画像に現われた新しいグループを見出せることである。欠点は、グループのもつ意味が、従来用いられてきた分類や階級の尺度と合わないことである。

(3) グラントトルスを累積利用する方法 (adaptive techniques)

最初には与えられたグラントトルス y^* , $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ の組から (1) の方法により判読を始めるが、新しく判読された $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ をつぎつぎとグラントトルスのデータの中に加えてゆく方法である。この方法の長所は、グラントトルスの調査の欠点を補充できることである。欠点は、1 点 1 点ごとに識別領域を更新しなければならないことである。

(3) 構成比を求める方法 (classification of unresolved objects)

ERTS 画像の画素などのように、1 つの画像データ $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ が 1 つの物体ではなく、いくつかの物体の合成と考えられる場合、画像データから常に 1 つの物体を判別しようとすると精度が悪くなる。このため、いくつかの物体 $y_1, y_2, \dots, y_m$ を説明変量として扱い、ある画像データ $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ がどのような物体の構成比で構成されているかを求める。この方法は、境界線付近や解像力の悪いデータあるいはデータ圧縮などによるデータなど平均化されたデータの取り扱いに有効である。欠点は、計算に時間がかかることである。

(5) 分割地区ごとに判読する方法 (perfield classification)

上記の 4 方法は、いずれも 1 点 1 点の画素ごとの判読であったが、この方法は、まず最初に境界をなんらかの方法で求めて多数の小分割地区に分け、分割地区ごとに判読する方法である。この方法の長所は、地区が分割されてからは、判読が迅

* 印は既知の物体を指す

速で精度が高いことである。欠点は小地区に分割することが大変であることである。

上記の方法に特有あるいは共通の手法を数学的な見地から拾い出すと、つぎの手法が必要となる。

(1) 統計解析

画像データの平均、分散および相関などをしらべる。

(2) 主成分分析

チャンネルが 12 ぐらい多い場合、12 次元全部を用いなくても、主成分のチャンネルを 4 つか 5 つに減少させたいときに用いる。

(3) 重回帰分析および正準相関分析

グラントルスデータの組 $\{(y_1, y_2, \dots, y_m); (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, i=1, n)\}$ に対して合成変数の相関を最大にするようなモデルを求める。ただしこの場合 x, y ともに連続量とする。

(4) 判別分析

2 つ以上の y_i を判別する手法で、一般には、誤判別の確率を最小にするような判別を行う。グラントルスデータが完備している場合に有効である。

(5) クラスタ分析

画像データのみを用いて、同一集群と思われる有限個の領域に分割する。クラスタ分析は、グループ間の距離を最大にするようにグループ構成が考えられるが、種々の距離に関する概念があり、煩雑である。

(6) 分散分析または数量化理論

y を説明変量にして、 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ の画像データを合成する $y_1, y_2, \dots, y_m$ の構成比を求めるとような場合に用いられる。

10. データ格納および再生

データ格納および再生は、多量のリモートセンシングデータを有効に利用するために、きわめて重要な役割を

果たす。データバンクを作成する場合には、つぎの 3 つのファイルが必要となる。

(1) 経歴ファイル

画像の原データおよび補助データなどを保存しておく。グラントルスデータや他の資料のデータも保存する。

(2) 作業ファイル

最終成果を得るために関係したすべてのデータを保存しておく。

(3) 利用ファイル

システムおよび応用ソフトウェアに関する情報、物体のスペクトル特性、ファイルカタログなどのデータを提供する。

以上のことから、リモートセンシング画像のデジタル処理システムの機器構成を考えると図 5 のようになる。ただし、この中にはデータハンドリングの関係は含まれていない。

11. リモートセンシングの応用

いままで、リモートセンシングとは何か、またどのような方法であるかを概観してきたが、つぎに、リモートセンシングの技術がどのような応用分野と可能性をもつかを述べてみよう。

(1) 応用分野

- 農業：作物調査、収穫量予測、病虫害調査など
- 森林：森林調査、病虫害調査、山火事発見など
- 土地利用：土地利用図の作成
- 都市：都市環境調査、スプロール調査など
- 水資源：河川調査、洪水被害調査、積雪調査など
- 海洋資源：水温調査、海流調査、海岸調査など
- 公害：大気汚染、水汚染、植物活力調査など
- 気象：雲の調査、天気予報、台風調査など
- 地質：鉱脈、油脈、断層、構造線の発見など

(2) リモートセンシングに要求される条件

図 5 デジタル処理システム

応用分野によってつぎの要求条件が異なる。

a. 周期：リモートセンシング画像は、ある年月日

図 6 地上解像力と周期

図 7 波長帯域とチャンネル数

時における情報を提供してくれるが、分野によっては、時系的な情報が必要となる。

b. 地上解像力：地上のどのくらい詳細な情報が必要であるかは応用分野によって異なる。

c. 波長およびチャンネル数：応用分野によって必要な波長帯域およびチャンネル数が異なる。

図 6 は、分野によって要求される地上解像力と周期の関係を表わしており、図 7 は、分野に必要な波長帯域とチャンネル数を示している。

(3) 応用例

数多くの応用例があるが、紙数の関係で公害調査関係のものを 3 つあげよう。

写真 1 は、サーマルスキャナー（熱映像装置）によってとられた画像である。白いところほど温度が高く、黒いところほど低い。河川沿いにある発電所から出された温排水が湖に拡散する状況がよくわかる。このような調査は、数時間ごとに撮影して、水量、風向、潮流などの関係を解析する必要がある。このような熱映像から現在では最大 0.1°C ぐらいの熱映像力を期待することができる。

写真 2 は、マルチスペクトルスキャナーを用いて河川

写真 1 サーマルスキャナーによる温排水の熱映像

写真 2 マルチスペクトルスキャナーによるデトロイト河の工業排水の調査

写真 3 東京湾上に流れ出た京浜工場地帯のスモッグ集団
(ERTS 衛星 1973.1.19)

長によって工業排水のスペクトル特性が異なることがよくわかる。

写真 3 では、ERTS-1 によってとらえられた東京湾岸の工場群の出す煙やスモッグの動きがよくわかる。京浜工業地帯からの煙と、京葉工業地帯からの煙が富津岬付近で合流している。よく見ると京浜工業地帯の煙突からの煙の玉とその影が見える。(昭和 50 年 1 月 28 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) European Research Organization: Data Preprocessing Systems for Earth Resources Surveys, Sep. (1973)
- 2) 日本リモートセンシング研究会 (JARS): リモートセンシングの原理と応用 (昭 49.10)
- 3) Proceedings of ASP Symposium: Management and Utilization of Remote Sensing, Oct. (1973)
- 4) Estes & Senger: Remote Sensing, Hamilton Publishing Co. (1974)
- 5) 村井俊治: 環境のリモートセンシング, 資源, No. 186, 資源協会発行 (昭 48.11)
- 6) 村井俊治: リモートセンシングデータの解析, 電学誌, 94, 11 (1974)

沿いにある工場地帯をリモートセンスした例である。波

テレビジョン 4 月特集号「画像伝送」予定目次

【随想】 画像技術への期待	電電公社	緒方 研二
1. 画像伝送の現状と将来	東大	宮川 洋
2. テレビジョン放送における画像伝送		
2-1 テレビジョン放送網の現状	電監	三浦 信
2-2 運行設備	NHK	石村 金三
2-3 送信設備	東京放送	米沢 隆
2-4 テレビジョン中継回線	電電公社	西野 孝平・橋本 了
2-5 衛星中継	国際電電	佐藤 秀夫
2-6 受像機	松下電器	佐々木玲一
3. 受信環境上の諸問題		
3-1 建造物による受信障害		
a. 受信障害の推定	NHK	伊藤 士郎
b. 受信障害対策	NHK	遠藤 幸男
3-2 人工雑音の規制	電監	伊藤 友武
4. 将来のテレビ放送における画像伝送		
4-1 多重放送	NHK	沼口 安隆
4-2 SHF 放送	NHK	王丸 謙治
4-3 衛星放送	NHK	泉 武博
5. CATV	日電	三森 理一
6. テレビ電話		
6-1 テレビ電話網	武蔵野通研	大森 喬
6-2 デジタル伝送	武蔵野通研	大川原忠義
6-3 帯域圧縮	日電	石黒 辰雄
6-4 画像品質	武蔵野通研	小林 幸雄
7. ファクシミリ	東大生研	安田 靖彦
8. 医療用画像伝送	日立電子	宮本 庸一
9. 教育用画像機器	東芝商事	三浦 勝夫