マルチ・スペクトル写真解析

——デジタル処理による森林判定——

寺島光一郎*

Digital Analysis of a Forest Stand by Multispectral Air Photos

by Koichiro Terashima

Abstract: Digital analysis method of multispectral air photos or sensor information will be recognized as the basic data handling way on quantitative processing work.

In this report, the author described the result of a test on automatic forest interpretation by multispectral air photos. The classified items were 11. The total estimation was down about 71% correctness. 94% of the hard wood forest was identified correctly. But the identification correctness of "Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*)" forest was only 51% due to their mixture with "Sugi (*Cryptomaria japonica*)". The size determination of the observation slit was the fundamental factor to be discussed in further studies.

概要 マルチ・スペクトル写真解析は、アナログおよびデジタル処理に大別される。アナログ処理は、現在、一般に行なわれている人間観測能力、判断力を判定の確認、補正に参加させる方法である。

一方デジタル処理は、バンド別レスポンスをデジタル・データに変換し、機械的に判定する方法で、判定の客観性と処理能力の増大を図ることができ、大量のデータ処理のための基本的な解析方法である。

本報告は、マルチ・スペクトル写真の濃度測定により、4次元データ (B, G, R, JR) とし、デジタル処理により樹種、樹高階等の森林判定を行なった実験について述べたものである。

森林判定を対象としたマルチ・スペクトル写真のデジタル処理は、試みの例が少なく、技術面での試行錯誤のため、判定結果は精度的に必ずしも十分でなかった。

判定区分は11項目としたが、全体の正効率は71%, 61%であり、森林項目別では広葉樹林の93.4%よりヒノキ人工林の51%の間にあった。ヒノキの判定精度の低下の原因はスギとの交雑に帰因することが多かった。なおスギ(約80%)の径級区分では若干の混同が生じる。

この手法についての検討事項の一つに対象被写体による観測スリットの決定があると予想された。

はじめに

マルチ・スペクトル写真は、バンド(波長帯)別解析を目的に開発されたものであり、現在一般に行なわれている解析方法は、映像解析装置等を仲介とし合成映像を人間の観測能力、判断力により確認・補正し、また目的とする映像として表示するアナログ処理である。

一方、デジタル処理は、バンド別レスポンスをデジタル・データに変換し(スキャン方式は、直接デジタル・データとして記録)、統計的手法によりコンピュータで機械的に判定する方法で、判定の客観性と処理能力の増大を図ることができ、今後予想される大量のマルチ・スペクトル・データ処理にとって、終局の目的とする解析方法である。そこで航空機より撮影されたマルチ・スペクトル写真のバンド別レスポ

ンスを濃度測定により求め、樹種、樹高階等の森林判定を試みた。

1. 統計的決定理論

物質に固有の反射スペクトル・パターンに基づき、対象物の種類や性質を判定するための統計的決定理論(パターン認識)は、次のとおりである。

m 次元(ここでは、青、緑、赤、赤外バンド・データによる4次元)のベクトル X を N 個のカテゴリにクラス区分する。

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}, \text{ カテゴリ空間 } R = \begin{pmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \vdots \\ \pi_N \end{pmatrix}$$

P_i : クラス π_i の生起する事前確率

$f_i(X)$: X が π_i からのサンプルである確率密度関数

L_{ij} : 損失ファクター($X \in \pi_i$ を π_j に区分すること

* 林野庁計画課

「写真測量」 Vol. 13 No. 2, 1974

による損失の大きさ)

とすると、すべての $K \neq j$ に対して

$$\frac{f_j(X)}{f_K(X)} \geq \frac{P_K(L_{Kj} - L_{KK})}{P_j(L_{jK} - L_{jj})} \dots\dots\dots \text{決定理論式(1)}$$

であれば X を π_j にクラス区分する。(1)式導入までの計算過程は省略)

なお、損失ファクター: $L_{jj}, L_{jK}, L_{Kj}, L_{KK}$ は、データと関係なくカテゴリーの重要度に応じ任意に決められる因子であり、また事前確率も概数が明らかでないことが多い。

そこで、(1)式を単純化するため

$$\left. \begin{aligned} L_{ii} &= 0, L_{ij} = 1 \quad (i \neq j) \\ P_i &= P_j \end{aligned} \right\}$$

とすると(1)式は、すべての $K \neq j$ に対して

$$f_j(X) \geq f_K(X) \dots\dots\dots (2)$$

であれば X を π_j にクラス区分する。

次に $f_i(X)$ を正規近似すると

$$f_i(X) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |V_i|^{1/2}} \exp \left(-\frac{1}{2} (X - M_i)^T V_i^{-1} (X - M_i) \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\{M_i$: 平均ベクトル $\}$ は、トレーニング・サンプルから求められる。

(2), (3)式の自然対数を取り、(2)式に(3)式を代入すると、

すべての $K \neq j$ に対して

$$\begin{aligned} \log |V_j| + (X - M_j)^T V_j^{-1} (X - M_j) \\ \leq \log |V_K| + (X - M_K)^T V_K^{-1} (X - M_K) \dots (4) \end{aligned}$$

が成立するとき、 X を π_j にクラス区分する。

限界値 (Threshold Value) について

クラス区分を行なう場合、目的とする対象物を区分するのであり、その地域が包含するすべての物質をクラス区分するのではない。そこで、限界値を定め、いずれのクラスにも属さないものをゼロクラスとして区分するとともに、理論的にクラス区分のあいまいなものを除去する必要がある。

ここで、(4)式の $\log |V_i|$ 以外の部分

$$Z = (X - M_i)^T V_i^{-1} (X - M_i)$$

は、 X m 次元のとき、自由度 m の χ^2 -分布をするので、限界値は χ^2 -分布により決められる。

例えば、 π_i からの 4 次元のサンプル・ベクトルの限界値により棄却される確率を 5%、すなわち棄却されない確率を 95% にするためには、

$$T_i = \log |V_i| + \{ \chi^2 \text{—分布} = 0.95 \} \\ (d \cdot f = 4)$$

$$= \log |V_i| + 9.49$$

となる。

2. 実験材料

(1) 使用写真 (写真 1)

写真 1 マルチ・スペクトル写真(赤外バンド)東京高尾

撮影地区名 高尾山

// 年月日 昭和48年 9 月 28 日

// 高度 1,400m

// 縮尺 約 1/12,000

// カメラ I²S 社、マルチバンドカメラ MK-1

焦点距離 f : 100mm

画像サイズ 9cm×9cm、4 バンド (B, G, R, IR) 1 組

撮影機関 日本フライングサービス K K

(2) 濃度測定

使用装置 写真濃度測定装置 D-250 型-1 H 型

測定範囲 レンズの透過率偏差の影響をさけるため
周辺部を除いた写真中央部 7 m×7 m

データ・ユニット(瞬間視野): $A \times B$

$A = 0.10$ mm (地上長: 約 1.2 m)

$B = 0.08$ mm (// : 約 1.0 m)

走査間隔: C=1.00mm (地上長: 約12m)

データ間隔: D=0.54mm (ミ: 約6.5m)

データ数 70ライン×130個×4バンド=36,400

(3) データ処理

OKITAC-4,500 (16 Bit×16K Core, 林業試験場所属)

プログラム F7.081 (林業試験場, 大貫仁人氏作成)

3. 解析方法 (図1参照)

① 判定したい物質をクラス区分する。

ITEM	SYMBOL	ITEM NAME
1	U	SUGI (SMALL) STAND……スギ (5m以下)
2	T	SUGI (MIDDLE) STAND……スギ (5~10m)
3	S	SUGI (LARGE) STAND……スギ (10m以上)
4	J	HINOKI (SMALL) STAND……ヒノキ (5m以下)
5	I	HINOKI…(1)……ヒノキ1 (10m以上)
6	H	HINOKI…(2)……ヒノキ2 (10m以上)
7	M	MIXED STAND……針広混交林
8	B	BROADLEAVES…(1)……広葉樹1
9	C	BROADLEAVES…(2)……広葉樹2
10	R	RICE FIELD……水田, 畑
11	A	ARTIFICIAL OBJECT……人工構造物

ヒノキ1, 2, 広葉樹1, 2, は, 本来同一のものであるが傾斜等により, 明らかに写真濃度が異なるため, 区分した。

② 濃度測定装置により, バンド別レスポンス (写真濃度) を測定する。

③ バンド別測定データを点重合し, 4次元のマルチ・スペクトル・データ (70ライン×130個=9,100) とする。

④ 各クラスを代表するトレーニング・エリア (Training Area) を設定する。

⑤ トレーニング・エリアの地上資料収集を行なう。

⑥ ④と対応するマルチ・スペクトル・データをトレーニング・サンプル (Training Samples) とする。

⑦ ⑥から統計的決定理論 (前掲) に基づき判定基準を決める。

⑧ ⑦によりコンピューターでもって, ②のデータをパターン認識 (判定) する。

⑨ 判定精度を検討する。

⑩ 判定図作成。

4. 判定結果

判定は, 限界値95%および70%で行なった。表1は, 判定結果であり, 図2 (P13参照) は, その判定図であ

図1 マルチ・スペクトル写真デジタル処理プロセス

る。(写真1と同地域)

(1) 判定結果を限界値95%, 70%と比較すると, ゼロクラス (Threshold) は, 17% から42%と約25%増加したが, これは理論的に予測されたとおりである。

また, トレーニング・サンプルの判定結果を比較すると, 表2, 3 (P12, 13参照) のように他のクラス (ゼロクラスは除く) への誤認判定は, 25%から20%へと減少するが, 反面, ゼロクラスに区分されたものが4%から19%に増加している。

限界値は, このように判定精度に大きく影響をおよぼすものであり, 誤認判定およびゼロクラスに区分されるそれぞれの損失の大きさを考慮し, 繰返し判定を行なう必要がある。

(2) 限界値95%の場合について, 各クラス毎の判定精度を比較すると表のように, J: ヒノキ (5m以下), C: 広葉樹2, R: 水田, 畑, A: 人工構造物が判定精度95%前後と良好である。

その原因をトレーニング・サンプルから求められたクラス別平均濃度, 分散から検討すると, 図3 (P14参照) のように, J の場合, 各バンドとも分散が小さいこと, また C, R, A の場合, 分散はかなり大きい, バンド別平均濃度すなわちパターンが類似のクラスが他にないため良好な判定精度が得られたものと思われる。

しかし全地域の判定では, これらの分散が大きいクラスでは, その判定精度が低下することが予測される。

一方, T: スギ (5~10m), I: ヒノキ1 (10m以

表 1 RESULT OF CLASSIFICATION

ITEM NAME	ITEM SYMBOL	限 界 値 95%		限 界 値 70%	
		個数	%	個数	%
SUGI (SMALL) STAND	U	456	5.011	323	3.549
SUGI (MIDDLE) STAND	T	798	8.769	583	6.407
SUGI (LARGE) STAND	S	727	7.989	421	4.626
HINOKI (SMALL) STAND	J	374	4.110	173	1.901
HINOKI—(1)	I	483	5.308	322	3.538
HINOKI—(2)	H	792	8.703	647	7.110
MIXED STAND	M	1,020	11.209	898	9.686
BROADLEAVES—(1)	B	383	4.209	250	2.747
BROADLEAVES—(2)	C	1,192	13.099	660	7.253
RICE FIELD	R	146	1.604	39	0.429
ARTIFICIAL OBJECT	A	1,207	13.264	952	10.462
THRESHOLD		1,522	16.725	3,832	42.110
TOTAL NUMBER		9,100	100.000	9,100	100.000

表 2 CLASSIFICATION OF TRAINING SAMPLES THE NUMBER OF CLASSES CONSIDERED 11

(限界値95%)

CLASS	PCT.	NO. OF	NO. OF SAMPLES CLASSIFIED INTO											
	RECOG.	SAMPS	U	T	S	J	I	H	M	B	C	R	A	THRS
U	66.7	21	14	0	0	1	0	3	1	2	0	0	0	0
T	41.5	65	13	27	12	1	3	7	1	0	0	0	0	1
S	82.5	40	0	3	33	0	0	0	0	0	0	0	0	4
J	93.5	30	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	2
I	52.5	40	2	12	0	3	21	0	1	0	0	0	0	1
H	70.8	48	4	1	0	0	0	34	7	1	0	0	0	1
M	50.9	108	2	2	1	0	1	38	55	5	0	0	0	4
B	76.8	95	9	0	0	0	1	0	5	73	0	0	0	7
C	94.3	70	0	1	0	0	0	0	0	0	66	0	1	2
R	95.0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	19	0	0
A	94.6	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	53	2
TOTAL	71.3	593	44	46	46	33	26	82	70	81	67	20	54	24 (4.0%)

SUM OF CROSS (I,I)423 (71.3%)

誤差判定 100-(71.3+4.0)=24.7%

U SUGI (SMALL) STAND
S SUGI (LARGE) STAND
I HINOKI—(1)
M MIXED STAND
C BROADLEAVES—(2)
A ARTIFICIAL OBJECT

T SUGI (MIDDLE) STAND
J HINOKI (SMALL) STAND
H HINOKI—(2)
B BROADLEAVES—(1)
R RICE FIELD
THRS 限界値 (ゼロクラス)

上), M: 針広混交林は, 判定精度 40~50% と著しく劣っている。

Tの場合, 同じスギである U: スギ (5m以下), S: スギ (10m以上) および I, H: ヒノキ 2 とパターンが類似し, しかも分散が大きいため, これらに誤認判定されており, 同じスギである U, S を含めると判定精度は, 約80%となる。

Iの場合, 分散はそれほど大きくないがパターンが最も類似しているTに誤認判定されている。またMの場合も, パターンがHと極めて類似しており, しかも分散が大きいため, Hに誤認判定されたものが約35%

もある。

なお, 分散が大きいこと, すなわちデータのバラツキが大きくなったのは, データの地上ユニットが1.0m×1.2mと比較的小さかったため, 樹木間等の陰影部の影響が大きいデータが含まれ, 樹種固有のパターンにとって, それがノイズ (雑音) となったためと思われる。

(3) 方位, 傾斜等による暗部の判定が正しく行なわれておらず, H, M等に誤認判定されたものが比較的多い。

これは, H, Mの平均濃度ベクトルが他に比較し低

[illegible]

(限界值70%)

	PCT.	NO. OF	NO. OF SAMPLES CLASSIFIED INTO											
CLASS	RECOG.	SAMPS	U	T	S	J	I	H	M	B	C	R	A	THRS
U	66.7	21	14	0	0	1	0	2	1	2	0	0	0	1
T	36.9	65	13	24	11	0	2	6	1	0	0	0	0	8
S	77.5	40	0	3	31	0	0	0	0	0	0	0	0	6
J	76.7	30	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	7
I	37.5	40	0	12	0	1	15	0	0	0	0	0	0	12
H	64.6	48	3	1	0	0	0	31	6	1	0	0	0	6
M	48.1	108	2	1	1	0	1	34	52	4	0	0	0	13
B	64.2	95	5	0	1	0	0	0	2	61	0	0	0	27
C	78.6	70	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	1	14
R	70.0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	6
A	71.4	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	40	15
TOTAL	60.7	593	37	41	43	25	18	73	62	68	55	15	41	115

誤差判定 $100 - (60.7 + 19.4) = 19.9\%$

近似式によるパターン認識の手法からして、このクラスに誤認判定あるいは限界値により棄却されたのである。

(4) レンズによる透過率偏差の影響をさけるため、周辺部を除いた写真中央部を使用した。この影響が完全に除去されておらず、さらに太陽角度により生じるサンポイントの影響も重なり、サンポイントと反対側の写真右上部の濃度に偏差が生じ、この部分での誤

図 3 クラス別基準波長構成 (平均濃度, 分散)

認判定の要因となった。

5. 今後の課題

(1) 各種ノイズ (雑音) の除去

写真濃度は、一枚の写真内においても、レンズ透過率偏差、太陽角度、方位、傾斜等によるバラツキが、また写真間においては、入射光量、大気中のヘイズ、レンズ、フィルムおよびフィルター特性、現像処理等の要因によるバラツキが混入する。

これらのノイズを除去し、データを標準化しなければ正確な判定を行なうことが困難であり、各々のノイズ毎にその理論的、技術的解明を図る必要がある。

(2) 重合および対地レジストレーション

マルチ・スペクトル写真は、4 バンド 1 組の写真であり、一度フィルム上に捕えられた濃度をデジタル・データに変換し、それを 4 次元に正確に重合することは難しい。

そこで本実験では、原写真を 3 倍拡大像とし、肉眼観測能力の限界である 0.1 mm (地上長: 40 cm) 前後の精度でもって位置を一致させ、データの重合を行な

った。

しかし、これはあくまで近似法であり、正確なレジストレーションの手法を開発しなければならない。

なお、スキャナー方式は、直接ビデオテープにデジタル数値として記録するため、データを重合する必要がなく、デジタル処理には望ましい方式である。

次に地上資料とトレーニング・サンプルを対応させる対地レジストレーションの問題があり、本実験では、トレーニング・エリアの中央部分のみを用いることにより、サンプルとの対応のズレによる誤差の危険をさけた。

しかし、詳細な判定には、正確なレジストレーションが不可欠であり、その方法の確立を図る必要がある。

(3) データ・ユニットの基準

データ単位となる地上ユニット (Unit) の大きさは、判定精度上、重要な問題である。

地上の物質は、大きさまざまであり、とくに樹木においては、樹冠からの反射スペクトルが判定の要因となるが、その大きさは、樹種、樹令等により著しく異なっている。

ユニットは、小さすぎるとは陰影等のノイズが入り、また大きすぎるとは平均化され、いずれにしても判定精度が低下する原因となる。

本実験では、判定樹種であるスギ、ヒノキ、広葉樹等の樹冠構成を考慮し、地上ユニットを 1.0 m × 1.1 m としたが、判定結果からみて、必ずしも適切でなく、今後、試験研究を積重ね各々の調査目的に応じたユニットの基準を確立する必要がある。

おわりに

マルチ・スペクトル写真は、導入以来日が浅く、とくに森林に対するデジタル処理は新しい試みであり、技術面での試行錯誤のため、判定結果は必ずしも満足できるものではなかったが、今後の解析にあたっての基本的な問題点を明らかにすることができた。

デジタル処理は、理論的には微細な変化の判定も可能であり、しかもその客観性および効率性の観点から、将来森林解析の有力な手段となるものである。

現段階では、技術的に未解明の多くの問題があり、大縮尺写真による個々の詳しい判定よりも、むしろ比較的濃度変化のバラツキが小さい小縮尺写真によるマクロの判定に適しており、とくに海外未開発林における林相、畜積、造林地選定等には、その効果が期待でき、今後この分野への応用開発が図られることを望む

ものである。

なお本実験は、林業試験場航測研究室で長期委託研修中に、中島巖室長、大貫仁人研究員の指導により行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 中島 巖：リモート・センシングの応用開発，bit（共立出版），1972. 12.
- 2) 緑地保存整備計画調査共同企率体：首都 50km 圏緑地保存整備計画調査作業報告書，1973. 3.
- 3) 大貫仁人：写真像の機械的識別率について——写真判読の自動化(5)——，第84回日本林学会大会講演集，1973.
- 4) 中島 巖：遠隔探査による地球資源観測，学術月報 Vol. 26, No.9, 1973. 11.
- 5) 寺島光一郎：林野における空中写真撮影・解析のシステム化について，林野庁，1973. 12.