

# デジタル航空写真上の樹木自動認識手法の研究

環境リモートセンシング研究室 森 一弘  
指導教官 力丸 厚  
向井幸男

## 1 研究背景と目的

地球規模での森林減少などの環境問題は深刻な状況にあり、早急な森林保護対策が必要である。その為森林モニタリングによる、詳細な森林資源情報に基づく森林資源量の効率的かつ正確な把握が求められており、その為の把握手法にリモートセンシングの利用が期待されている。

リモートセンシング技術は広域観測が可能な点で効率的であり、また危険性の高い箇所や進入が困難な箇所において情報取得が可能な点で有効である。

リモートセンシングの森林分野への応用について、航空写真を代表とする高解像度リモートセンシングデータを用いることで、森林を領域としてだけでなく、森林を形成している樹木について個々に捉えることが可能である。すなわち、樹木個別のモニタリングが可能であり、正確かつ効率的な森林資源量の管理に繋げることができると考えられる。

本研究は、高解像デジタル航空写真を解析に使用し、そして手法にはテンプレートマッチングを用いて、樹木の位置と本数の自動推定を目的として、テンプレートマッチングを用いた解析手法と、画像処理技術を用いたテンプレートの検討を行い、航空写真画像上における個別単位の樹木抽出に最適な解析手法の開発を試みた。

## 2 対象樹木

本研究の対象樹木はスギである。スギは裸子植物のスギ属スギ科に属し、常緑高木である。樹木の高さは30~40mに成長し、大きなものでは60mに達するものもある。密生して壮齢時までは円錐形の樹冠になるが、老齢木では成長が衰えて卵形になる。



図1 現地調査時のスギの様子

対象樹木にスギを選んだ理由は以下の2点である。

### 1) 樹冠の形状が円錐形である

円錐形であることから、空中から真下方向にスギを撮影した場合、太陽光によって出来る影から目視により個別の樹木の識別することが可能である。

### 2) 常緑樹である

スギは常緑樹であるため季節変化による落葉が少なく、また樹冠形状の変化が起りにくく、航空写真が撮影された時期を問わず同様の手法で解析が可能であると考えられる。

## 3 使用データとテストエリア

### 3.1 使用データ

本研究では解析用データとして航空写真を用いた。航空写真の大きな特徴は分解能が高い点である。航空写真の画像解像度は人工衛星によって取得されたリモートセンシングデータよりも高分解能であり、家屋、道路、河川そして森林の状況を詳細に写し出しており、現地の状態を把握する際に有効である。本研究では、小千谷市より提供して頂いたデジタルオルソ画像を使用して解析を行った。(表1)

表1 使用データの諸元

画像データ	デジタルオルソ画像
撮影年月日	2000年7月23日、24日
撮影高度	約1400m
縮尺	1/8000
地上分解能	約0.127m

### 3.2 テストエリア

本研究では航空写真から小千谷市内にある植林された2箇所のスギ林を解析手法のテストエリアとして使用した。(図2及び図3) テストエリアの大きさは、テストエリアAが約28m四方、テストエリアBが約49m四方である。テストエリアAは、個々の樹冠直径がほぼ等しいスギが分布している。一方、テストエリアBは、複数の樹冠直径のスギが混在して分布している。また、テストエリアAにおいて、目視判読が不可能な樹木箇所と樹木以外の箇所は、解析対象外とした。

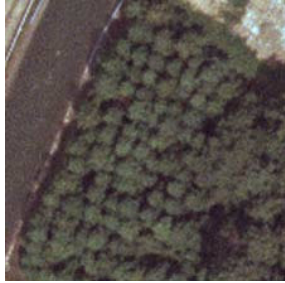


図2 テストエリア A



図3 テストエリア B

#### 4. 解析手法

本研究では航空写真のデジタルオルソ画像と、その画像中に写っている樹木領域を切り出したテンプレート画像を使用し、相関係数によるテンプレートマッチングによる解析を行った。(図4)

この手法は、あらかじめテンプレートと呼ばれる抽出したいパターンの画像を準備し、対象画像上を1ピクセルずつラスタ走査し、重なるそれぞれの箇所では相関を調べて相関の高い箇所を目的のパターンに類似していると判断して抽出する方法である。判断の基準は、テンプレートマッチングの結果に対して、相関係数の閾値を定めて、閾値以上の結果を解析結果として使用した。

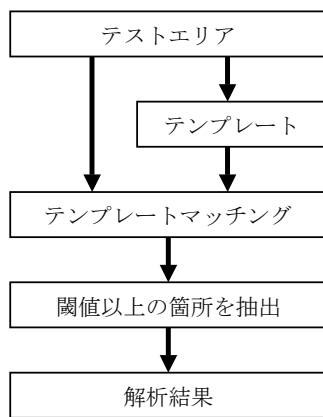


図4 解析手順

本研究ではこの解析手法において、1) 切り出した画像を用いたテンプレートマッチング、2) 平均化テンプレートの作成、3) 平均化テンプレート作成自動化の検討と位置の推定、4) 樹木 CG モデルによるテンプレートの作成、の4つの項目について解析と検討を行った。

#### 5. 解析結果と考察

##### 5.1 切り出した画像を用いた場合

テストエリアから生成したテンプレートを単独で用いた場合の解析を行った。テンプレートはテストエリア内より任意に図5で示した5箇所の樹木領域を切り出し、(図6) 樹冠が円形であると仮定して切り取ったものをそれぞれテンプレートとした。(図7)大きさは約2m四方(15×15ピクセル)で、使用バンドはGreenバンドである。



図5 切り出した各樹木の位置



図6 切り出された画像

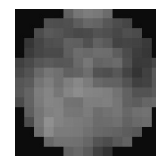
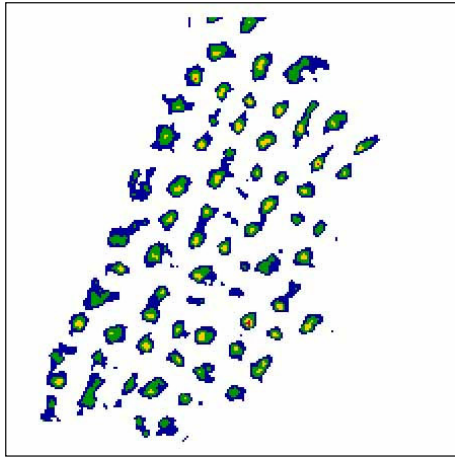


図7 テンプレート

解析結果は、それぞれのテンプレートを用いた場合で、樹木の存在する箇所では相関がみられた。特に強い相関がみられたテンプレートbを用いた結果を図8に示す。しかし、切り出した箇所が任意で選んでおり、また捉えていないスギの箇所があることから、客観的なテンプレートを生成する必要がある。そして、樹木を点ではなく領域として捉えていることから、より詳細な位置の特定が必要である。



凡例：相関係数 0.00~0.20 0.21~0.40  
0.41~0.60 0.61~0.80 0.81~1.00

図8 テンプレート b を用いた解析結果

一方、テストエリア B において、樹冠直径の異なる 2 箇所の樹木領域を切り出して、それぞれをテンプレートとしてテンプレートマッチングを行った。それぞれの結果を図 9、図 10 に示す。

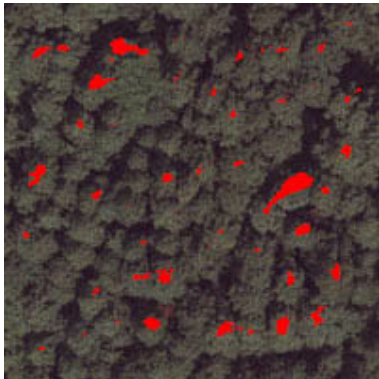


図9 大きいテンプレートを用いた場合  
(相関係数 0.40 以上を赤で表示)

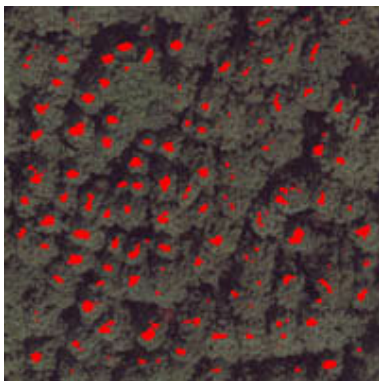


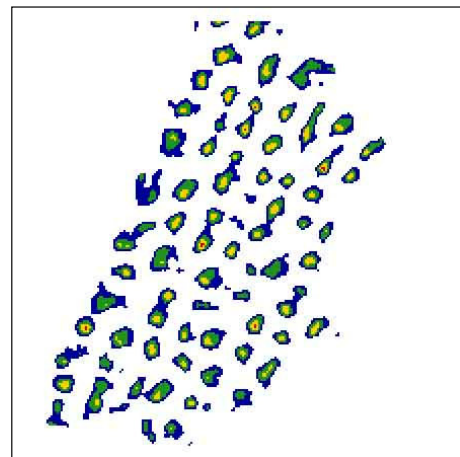
図10 小さいテンプレートを用いた場合  
(相関係数 0.40 以上を赤で表示)

大きいテンプレートを用いた解析結果は、図 9 に示すように、テンプレート自身の大きさと同等、またはそれ以上の樹冠の大きさを持つスギが存在する箇所で相関が比較的高い傾向があるといえる。

そして、テンプレート自身の大きさよりも小さい箇所は、相関が比較的低い傾向があるといえる。このことはテンプレート g でも同様に考えることができる。そのため図 10 では、スギの存在するほとんどの箇所で相関が比較的高い傾向を示した。これらは、テンプレートの大きさよりも樹冠が大きい箇所では、樹冠の中心付近がマッチングエリアの中心にある場合、太陽光によって樹冠にできる濃淡の特徴パターンはマッチングエリア内でも保持され、相関は高い傾向を示すと考えられる。一方、テンプレートの大きさよりも樹冠が小さい箇所では、隣接する樹木がマッチングエリアに入り込み、マッチングエリア内の特徴パターンが崩れるため、相関は低い傾向を示すと考えられる。

## 5.2 平均化テンプレートを用いた場合

客観的なテンプレートとして、平均化テンプレートを用いて解析を行った。平均化テンプレートは、5.1 の 5 箇所のテンプレートから各座標の画素値を平均して作成した。そしてこのテンプレートを用いてテンプレートマッチングを行った結果を図 11 に示す。



凡例：相関係数 0.00~0.20 0.21~0.40  
0.41~0.60 0.61~0.80 0.81~1.00

図11 平均化テンプレートを用いた解析結果

図 8 と図 11 を比較すると、切り出したテンプレートを単独で用いた場合に比べて、平均化テンプレートを用いた場合は全体の相関が強くなる結果を得た。

このことから平均化テンプレートは、テンプレートマッチングにおいて汎用性の高いテンプレートといえる。

そこで、テンプレートの平均化がテンプレートの特徴パターンに与える影響を考察する。図 12 は、平均化テンプレートのヒストグラムである。図 13 は、テンプレート b のヒストグラムである。また、表 2 はそれぞれのテンプレートの標準偏差を示している。

平均化テンプレートは、切り出して作成したテンプレートと比較して分布している画素値のレンジが小さいことが分かる。そして表 2 より標準偏差について、平均化テンプレートはテンプレート c の次に 2 番目に低い。これらのことから、テンプレートの平均化によって個々のスギが持つ画素値の空間的分布の特徴を弱めたと考えることができる。

一方、表 3 は平均化テンプレートとテンプレート a からテンプレート e との相関係数の算出結果である。ここで、相関係数はテンプレート a を除き 0.80 以上の高い相関を示しており、テストエリア A において、平均化テンプレートはスギの特徴パターンを保持していると考えられる。

以上のことから、テンプレート作成において、切り出して作成された複数のテンプレートを用いて平均化を行うことは、スギの特徴パターンを保持しつつ、個々の樹木の特徴を弱める役割を果たし、汎用性の高いテンプレート画像の作成が可能になることがいえる。

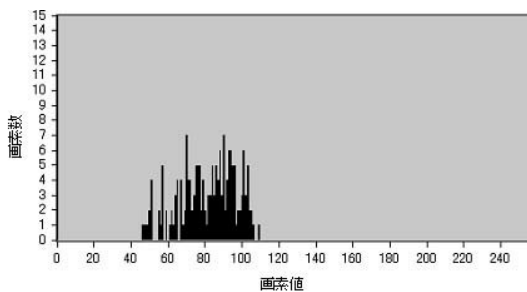


図 12 平均化テンプレートのヒストグラム

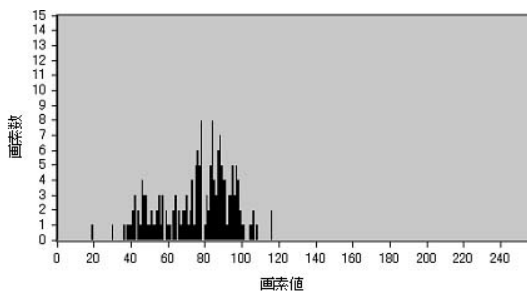


図 13 テンプレート b のヒストグラム

表 6.1 各テンプレートの標準偏差

テンプレート	標準偏差
平均化	15.28
a	19.40
b	19.00
c	13.56
d	22.27
e	20.03

表 3 平均化テンプレートと切り出したテンプレートとの相関係数

テンプレート	a	b	c	d	e
相関係数	0.697	0.891	0.803	0.825	0.828

### 5.3 平均化テンプレート作成自動化と位置の推定

5.2 で示されたテンプレートの平均化手法は平均する画像を任意で選んでいるため、結果は主観に左右される。また、テストエリア内の樹木領域を 1 箇所ずつ用いて解析を試行することは非効率的である。そこで、解析を行う上で、テンプレートの平均化の過程を自動化する手法を検討した。また、マッチング結果について、スギを領域ではなく点で捉えることで、詳細な位置の推定を行った。

#### 1) 解析手法

手法の概要を図 6.13 に示す。テンプレートの平均化の過程を自動化する手法は以下の①から⑥の処理で構成される。

- ① テストエリアからスギの画像を 1 箇所切り出し、初期テンプレートを作成する。
- ② 初期テンプレートを用いてテンプレートマッチングを行う。
- ③ マッチング結果から、相関係数が最も高いテンプレート自身の箇所に次に相関が高い箇所の相関係数を④の閾値とする。
- ④ マッチング結果から閾値以上の箇所を抽出し、抽出された各領域内で最も相関が高い場所のみを残し、各領域を点に変換する。そして、各点を中心としてそれぞれテンプレートの大きさでテストエリアから画像を切り出す。
- ⑤ 切り出された画像を平均化し、この画像を用いて再びテンプレートマッチングを行う。
- ⑥ ④へ戻り、終了条件を満たした場合に解析を終了する。

ここで、④における抽出結果での領域の区別はラベリング処理によって行った。また領域がテンプレートの大きさを超えた場合、領域内で分割を行って点への変換を行った。⑥の終了条件は④の変換された点の数が収束した回数である。

## 2) 閾値の設定

各初期テンプレートを用いたテンプレートマッチングの結果より、領域抽出の基準となる閾値を表 4 のように設定した。

表 4 各テンプレートに設定した閾値

初期テンプレート	閾値
a	0.712
b	0.809
c	0.704
d	0.795
e	0.831

## 3) 解析結果

各地点で切り出されたテンプレートを用いて 5.3 1) で示した手法を試行した結果、繰り返し回数と自動的に抽出された領域の数は図 14 のような特性を示した。繰り返し回数が 10 回前後から抽出された領域の数はほぼ一定値に収束したことから、10 回を終了条件とした。

図 15 に初期テンプレート a を用いた解析結果を示す。結果はテストエリア上に赤で見やすくするため 1 ピクセル拡張して表示した。

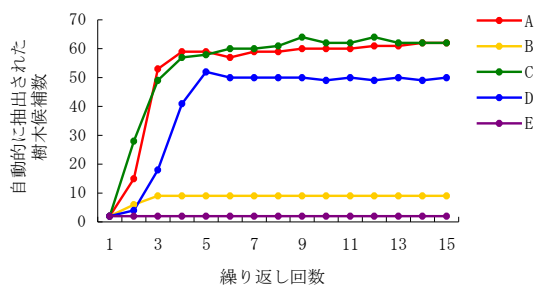


図 14 繰り返し回数と自動的に抽出された樹木候補数



図 14 初期テンプレート a を用いた解析結果

## 4) 結果の検証

各初期テンプレートを用いた解析結果に、テストエリア A の目視判読によって得られた樹冠の位置を重ね (図 15)、推定結果の検証を行った。

検証方法は、各プロットが樹冠内に存在した場合には認識が成功したと判断し、テストエリア中の目視判読から得た全ての樹冠の数に対する、認識が成功したプロットの数割合として式 6.1 の認識率を設定して算出する方法を用いた。また、検証は以下の規定を定めてそれに従って行った。認識率の結果を表 5 に示す。

- ① 樹冠が重なった箇所にプロットが存在した場合は樹冠の中心に近い方の結果とする。
- ② 樹冠内に複数のプロットが存在する場合は、ひとつの結果とみなす。

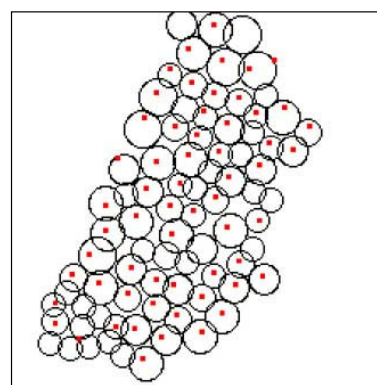


図 15 初期テンプレート a を用いた解析結果と樹冠位置の重ねた様子

$$\text{認識率(\%)} = \frac{\text{認識が成功したプロットの数}}{\text{全ての樹冠の数}} \quad \text{式(1)}$$

表 5 認識率の算出結果

初期テンプレート	認識された本数(本)	認識率(\%)
a	58	<b>69.8</b>
b	9	<b>10.8</b>
c	59	<b>71.1</b>
d	49	<b>59.0</b>
e	2	<b>3.0</b>

※目視判読で確認されたスギの本数：83 本

## 5) 考察

表 5 より、認識率は c 地点が最も高く認識精度が良いという結果と得た一方で、e 地点は最も認識率が低い結果となっており、結果に大きく差が生じている。この原因として各テンプレート固有の特徴パターンの影響と閾値の設定が挙げられる。

5.1の各テンプレートを用いた各結果において、テンプレート a と c を用いた場合は、他の場合に比べて全体の相関は低い。これら 2 つのテンプレートは個別の特徴パターンが比較的強いことがいえる。この場合、5.3 1)の手法における閾値の設定手法では閾値が低く設定され、自動抽出された樹木候補数は増加したと考えられる。一方、テンプレート b、d 及び e を用いた場合は全体の相関が強く、これら 3 つのテンプレートはテストエリア A のスギの代表的特徴パターンに近いと考えられ、樹木候補数は増加しなかったと考えられる。このことから、閾値の設定手法において、初期テンプレートの特徴パターンに応じた適切な閾値を決定する必要がある。

#### 5.4 樹木 CG モデルによるテンプレート作成

樹木個別の特徴にとらわれないテンプレートの作成を目的として、樹木モデルを用いたテンプレートの作成手法を検討した。樹木モデルは、実際の樹木形状や照明光の情報から擬似的に樹木の構造と状態を再現したもので、本研究ではコンピュータグラフィックス(CG)を用いて樹木モデルを生成した。

図 16 は、生成した樹木 CG モデルである。このモデルは、12 枚の円を積み重ねた構造をしており、樹高と樹冠の大きさは、実際の樹木を測量してモデルに反映させた。また側面形状は目視より設定した。

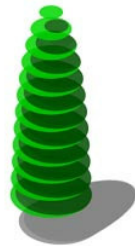


図 16 樹木 CG モデル

図 17 は、この簡易モデルに影を設定して上方向から見た形状でレンダリングを行った結果である。その結果をテストエリアの画像解像度へ変換し、図 18 のテンプレート画像を得た。作成したテンプレート画像の大きさは約 2m 四方である。このテンプレートを用いた解析結果を図 19 に示す。

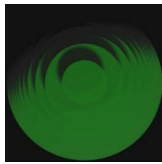


図 17 樹木モデルをレンダリングした様子

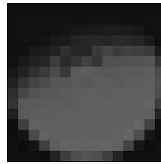
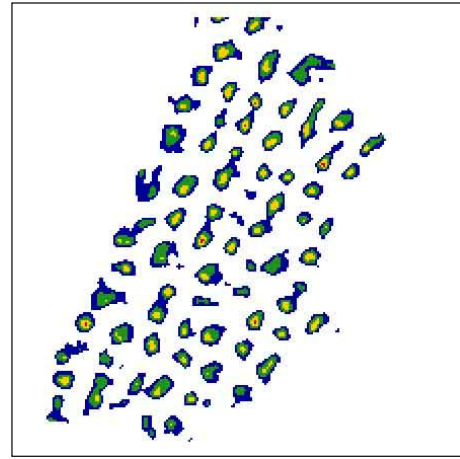


図 18 作成したテンプレート



凡例：相関係数 □ 0.00~0.20 ■ 0.21~0.40  
■ 0.41~0.60 ■ 0.61~0.80 ■ 0.81~1.00

図 19 樹木 CG モデルによるテンプレートを用いた解析結果

解析結果より、樹木の存在する箇所でも個別に相関が高くなっており、樹木の位置を正確に捉えているといえる。これにより、樹木 CG モデルから作成されたテンプレートが解析に使用可能であることが示された。しかし用いた樹木モデルは、簡易的な構造をしており、形状、照明光の位置や強さなどを考慮した詳細なモデルパラメータの設定が必要である。

## 6 まとめ

本研究では、デジタル航空写真上でテンプレートマッチングを用いて樹木の自動認識を試みた。その結果、スギの位置と本数の推定が可能であることが示された。これにより、森林モニタリングを支援する目的での詳細な森林資源情報の取得につながることを期待される。そして今後の展望を以下に示す。

- ・ 樹冠直径が異なる樹木の混在している場合を考慮し、樹冠直径別のテンプレートを使用した総合的な解析手法の考案
- ・ 現行では解析に用いるテンプレートを主観で切り出していることから、テンプレートの作成を自動化する手法の考案が必要

## 参考文献

- 1) 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング，日本測量協会，p156-157，2001
- 2) 末松良一・山田宏尚：画像処理工学，コロナ社，p172-174，2000
- 3) 大隈眞一：森林計測学講義，養賢堂，p13，2001