多重オルソフォト画像からの樹冠円抽出について

Extraction of Circular Tree Crowns from Multiple Orthophoto Images

井上 光平*・瀬戸島政博**・朝廣 和夫***・重松 敏則***

*Kohei INOUE, Masahiro SETOJIMA,
Kazuo ASAHIRO and Toshinori SHIGEMATSU*

Abstract : The spatial arrangement of the brightness values of remotely sensed imagery bears important information for forest canopy structures. This paper presents an algorithm to estimate tree crown size and position from color orthophoto images acquired at several seasons. The seasonal change in color of leaves gives us a piece of useful information about the boundary of neighboring tree crowns. The usefulness of the algorithm for practical applications is demonstrated with an experiment on multiple orthophoto images of the northern part of Kyushu Island.

1. はじめに

現在、持続的な国土環境の保全や自然資源を利用した循環型社会の形成の場、二酸化炭素の吸収源の場として、さらには、バイオマスエネルギーの宝庫として、身近な里山の存在がクローズアップされ、その管理や利活用が注目されている。里山は、人が長い間手を加えることにより保全がなされ、利用性が増し、森林環境が成り立ってきた場でもある。そこでは、さまざまな林相が形成され、地域独自の郷土景観を今日に残している。

多種多様な樹種が混ざり合って構成する里山の分布を把握するには、植生の種類組成や構造などを基準として分類した群集名や群落名で表現した植物社会学的な区分よりも、樹林分布の全体的な外観（樹種・樹高・

樹冠・立木密度等）を捉えた相観植生的な区分が必要とされている（重松ら、1997）。このうち、森林の成長過程や管理による森林構造の変化を把握するうえで、樹冠の大きさが重要なパラメータとなる（朝廣ら、2003）。

これまで、森林の環境保全や森林資源の維持管理のために、樹冠の大きさや分布などを定量的に計測することが求められている（小熊ら、2000；Song & Woodcock, 2003；朝廣ら、2003）。また、森林を構成する樹冠の大きさと分布を定量的に計測する方法として、小村ら（2003）は樹冠の形状を円で近似し、空撮画像から近似円を抽出する方法を提案した。この近似円をここでは「樹冠円」と呼ぶことにする。樹木は季節によって葉色が大きく変化するものがあり（瀬戸島ら、2001, 2002, 2005）、この葉色変化の情報を利用すると樹冠円の抽出精度を向上させることができると考えられる。

そこで、本研究では、複数の時期に撮影したカラー航空オルソフォト画像（ここでは「多重オルソフォト画像」と称する）を用いて樹冠円抽出の可能性を検讨することを目的とした。複数時期のカラー航空オルソ画像を用いることにより、季節による樹木の葉色変化情報を樹冠の判別の要素に利用するとともに、細かな陰影による樹冠の過分割（たとえば、1 時期の画像だけでは、撮影の時間帯によっては樹冠内の枝葉による細かな陰影が濃く写し出され、その陰影によって本来

* 九州大学大学院芸術工学研究院視覚情報部門
Faculty of Design, Kyushu University

** 国際航業株式会社技術センター
Kokusai Kogyo Co., Ltd.

〒102-0085 東京都千代田区六番町 2 番地

***九州大学大学院芸術工学研究院環境計画部門
Faculty of Design, Kyushu University

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 45, NO. 3, 2006

図1 多重オルソフォト画像を用いた樹冠円の抽出手順

1つである樹冠が複数に分断されて抽出されてしまうような恐れがある)の軽減に配慮した。

なお、2節では使用した多時期のカラー航空写真と多重オルソフォト画像の作成、3節では多重オルソフォト画像から樹冠円を抽出する方法を提示し(図1)、4節では、多重オルソフォト画像を用いることによって、1時期の画像だけを用いる場合よりも樹冠円抽出の精度が向上することの検証結果を示す。5節では、まとめと今後の課題等を述べる。

2. 使用した多時期のカラー航空写真と多重オルソフォト画像の作成

本研究では、福岡市北東の古賀市谷山にある古賀ダム流域の里山を対象とし、1999年4月～2000年2月までの8回にわたり撮影したカラー航空写真(撮影縮尺1/10,000)を用いた。各時期の航空写真の比較照合が容易になるように、各撮影日の天候は晴～快晴、雲量は0.0～3.5(平均雲量10分比)で、GPS搭載の航空写

表1 撮影時期とそのねらい

回数	撮影年月日	撮影のねらい
1	1999.04.08	サクラの開花・樹木の芽吹き時期
2	1999.04.27	常緑広葉樹・落葉広葉樹の新葉時期
3	1999.05.12	常緑広葉樹・落葉広葉樹の葉色変化時期
4	1999.06.14	梅雨期、モウソウチクの葉色変化時期
5	1999.11.05	落葉広葉樹の紅葉開始時期
6	1999.11.22	落葉広葉樹の紅葉伸展時期
7	1999.12.08	落葉広葉樹の紅葉・黄葉最盛時期
8	2000.02.18	落葉期・スギの褐変時期

真測量用カメラ(Leica社製RC-30)を使用した。

対象とした里山は、常緑広葉樹を主体に落葉広葉樹が混在しているため、カラー航空写真撮影は、春季の常緑広葉樹の開花や新葉の時期、秋季～晩秋季の落葉広葉樹の紅葉・黄葉時期、などを主体に、そのほか梅雨期や厳冬期にも撮影した(表1)。ただし、夏季は葉色変化も安定し、常緑広葉樹と落葉広葉樹のそれぞれの葉色にそれほど変化が生じないため、撮影は実施していない。

多重オルソフォト画像の作成にあたっては、上記のカラー航空写真のネガフィルムを用いて、地上解像度約20cmを1画素とするデジタル画像データに変換し、解析用には1画素1m四方の画像データを使用した。この画像データと数値地図50mメッシュ標高データを用いて各時期のオルソフォト画像を作成した。このうち、撮影中心に近い100×100画素の範囲を樹冠円抽出の対象領域とした(図2参照)。

対象領域の高木層をみると、図2(C)の画像中央部(緑色の箇所に直径20mの円形の調査区を設定)は、タブノキ、ノグルミが優占する樹高8～13m、平均胸高直径27cm、高木本数13本からなる傾斜約38°の平滑斜面上の林分である。図2(C)の画像左下(黄土色の箇所に直径20mの円形の調査区を設定)の高木層は、スダジイが優占する樹高15～16m、平均胸高直径36cm、高木本数15本からなる傾斜約35°の凸型斜面上の林分である。なお、図2(C)の画像右端と右下角の樹林はスギ人工林で、樹高17m、平均胸高直径27cmである。

また、多重オルソフォト画像間の色調を相対的に比較できるようにできるだけ統一し、相互の画像上での樹葉の葉色変化を把握しやすいように処理した。この相対的な色調処理にあたっては、8時期の画像の色調

図2 多重オルソフォト画像の例
(100画素×100画素, 1画素1mの解像度)

表2 1999年4月8日を基準とした場合の相対的な色調補正のための相関係数

撮影年月日	R 値	G 値	B 値
1999.04.27	0.9469	0.9201	0.9139
1999.05.12	0.9354	0.8971	0.9002
1999.06.14	0.9613	0.9439	0.9314
1999.11.05	0.9788	0.9781	0.9758
1999.11.22	0.9262	0.9253	0.9235
1999.12.08	0.9366	0.9355	0.9404
2000.02.18	0.9548	0.9415	0.9409

が相対的に比較できることを目的としたため各画像上で、その形状と色調とが明瞭に識別できる地物（例えば赤色・青色・白色の屋根、黒色のビニールハウスなど）の領域をそれぞれ30箇所抽出し、RGB 値の平均値と標準偏差を求めた。1999年4月8日撮影時点（最初のカラー航空写真撮影日）のRGB 値を基準に、他の7時期分のRGB 値との相関係数を求めた（表2）。これらの値にしたがって各時期のRGB 値を補正し、4月8日時点を基準とした場合の色調に他の7時期分のRGB 値を整合させた。

3. 多重オルソフォト画像を用いた樹冠円抽出のための提案手法

本研究では、多重オルソフォト画像を用いて、単木単位で樹冠部に円を近似し、樹冠円を抽出する手法を提案している。この手法では、多時期のオルソフォト画像を用いているため、1時期のオルソフォト画像を用いた樹冠円の抽出の場合に比較して、画像上の陰影による樹冠円の分断が軽減できること、季節的な樹葉の葉色変化を情報として加味しながら、樹冠円をより高精度に抽出できる点が大きな特色である。

多重オルソフォト画像を用いた樹冠円抽出の手順を図1に示す。その手順は次の通りである。

- (1) 多重オルソフォト画像を構成する各画像で樹冠円の半径を推定する。
- (2) 上記の処理によって、各画素について画像枚数分の半径の推定値が得られるので、そのなかでの中央値（値の大きさの順に並べたときに中央にある値）をその画素での半径の推定値とする。
- (3) 半径が大きい樹冠円から順に抽出していき、抽出した樹冠円に含まれる小さい樹冠円は除去する。

上記の(2)において、中央値を選択することによって大きすぎたり、小さすぎたりする半径を除外すること

ができ、それによって樹冠円半径の推定精度が向上する。

提案手法の具体的な内容は次の通りである。

m 枚のオルソフォト画像からなる多重オルソフォト画像を $f=[f^{(i)}](i=1, \dots, m)$ とし、 i 番目の画像 $f^{(i)}$ の第 j 画素の RGB 値をそれぞれ $f_{Rj}^{(i)}, f_{Gj}^{(i)}, f_{Bj}^{(i)}$ とする。各画像 i の画素数は $n(j=1, \dots, n)$ とする。まず各画像をメジアンフィルタで平滑化する。フィルタは RGB の各成分に個別にかける。平滑化した多重オルソフォト画像を $\hat{f}$ とする。次に各画像 i の各画素 j を樹冠円の中心とするときの樹冠円の半径 $r_j^{(i)}$ を全ての (i, j) ($i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$) について計算する。 $r_j^{(i)}$ の計算方法は次の通りである。

Step 1 : 半径の初期値を $r=1$ とする。

Step 2 : 画素 j を中心とする半径 r の円に含まれる全ての画素 j' について

$$\max_{x \in \{R, G, B\}} \{ \hat{f}_{xj}^{(i)} - \hat{f}_{xj'}^{(i)} \} \leq T_j^{(i)} \quad (1)$$

かつ

$$\max_{x \in \{R, G, B\}} \{ \hat{f}_{xj}^{(i)} - \hat{f}_{xj'}^{(i)} \} \leq t_j^{(i)} \quad (2)$$

なら Step 3 に進み、その他は Step 4 に進む。

Step 3 : $r=r+1$ と更新して Step 2 に戻る。

Step 4 : $r_j^{(i)}=r-1$ として終了する。

式(1)は円内の輝度値の最大値に関する制約であり、式(2)は最小値に関する制約である。 $T_j^{(i)}, t_j^{(i)}$ はそれぞれ

$$T_j^{(i)} = T_0(1 + \tilde{d}_j^{(i)}) \quad (3)$$

$$t_j^{(i)} = t_0(1 + \tilde{d}_j^{(i)}) \quad (4)$$

で計算される。ここで T_0, t_0 は予め設定する正定数であり、 $\tilde{d}_j^{(i)}$ は正規化局所フラクタル次元(小村ら, 2003)である。局所フラクタル次元は樹冠内部で大きな値となることが知られている(小村ら, 2003)。これは樹冠内部の枝葉が作る細かな陰影がフラクタル性をもつことによる。式(3)、式(4)のようにしてフラクタル次元が高い画素で $T_j^{(i)}, t_j^{(i)}$ の値を大きくすると、樹冠内部の細かな陰影を樹冠の境界と誤る可能性が低くなる。 $\tilde{d}_j^{(i)}$ の計算方法については付録を参照されたい。

以上の計算で、各 (i, j) について $r_j^{(i)}$ の値が求まる。すなわち各画素 j について m 個の半径の推定値 $r_j^{(i)}$ ($i=1, \dots, m$) が得られる。しかし、この中には樹冠内の細かな影の影響で半径を過小評価したものや、隣接す

る樹冠との色変化が少ないために半径を過大評価したものが含まれる可能性がある。このような誤ったデータを排除するために各画素 j で半径推定値の中央値

$$r_j^{med} = \text{median}_{i \in \{1, \dots, m\}} \{ r_j^{(i)} \} \quad (5)$$

を選択する。ここで $median$ は中央値を選択することを表す。

最後に以下の手順で重複した樹冠円を除去する。

Step 1 : $r_j^{med} > 0$ である画素の集合を $S_0 = \{j | r_j^{med} > 0\}$ とし、出力画素の集合を $S = \phi$ と初期設定する。

Step 2 : S_0 に含まれる画素の中で r_j^{med} が最大の画素を選び、それを j^* とする。 j^* を S_0 から S に移す。

Step 3 : 画素 j^* と j' の間の距離を $D_E(j^*, j')$ とし、 $D_E(j^*, j') \leq r_{j^*}^{med}$ を満たす $j' \in S_0$ を全て S_0 から除去する。

Step 4 : $S_0 \neq \phi$ なら Step 2 に戻り、その他は S を出力して終了する。

以上の手順で得られる S に含まれる各画素 j を中心とし、それに対応する r_j^{med} を半径として画像上に円を描くと推定樹冠円の分布が得られる。

4. 提案手法の適用性評価

ここでは、前述(2.)の8時期分の多重オルソフォト画像のうち、1999年4月8日、4月27日、5月12日、6月14日、11月5日、11月22日、12月8日の7回にわたって撮影した画像を用いた(ただし、2000年2月18日撮影の画像は落葉後のため使用せず)。図2には、本提案手法の適用性を評価した検証箇所を示す。各画像のサイズは100×100画像で、空間解像度は1画素1mである。輝度分解能はRGBそれぞれ8ビットである。

評価用の検証画像は、図2の画像を用いて目視判読によって単木単位に樹冠円を識別し、識別した樹冠円の中心に白点を付け、これを正解とした(図3)。落葉樹林は春先の開葉期および秋の落葉期には葉色に特色があり、判読が比較的容易である。しかし、常緑広葉樹林は葉色にあまり差がなく、落葉樹林に比べて判読が難しい。現地での平均的な樹冠円の観察結果等を参考に判読した。

ここで、目視抽出した樹冠中心画素の集合を S_L とし、樹冠円抽出アルゴリズムによって自動抽出した樹

図3 目視判読による評価検証用の樹冠中心

図5 本手法で抽出された樹冠円
(図中で白色箇所は、どの樹冠円にも属さない箇所を表す)

冠円の中心画素の集合を S_T とし、 S_L と S_T の誤差を

$$\frac{\sum_{j \in S_L} \min_{j' \in S_T} D_E(j, j')}{\sum_{j \in S_L} 1} + \frac{\sum_{j \in S_T} \min_{j' \in S_L} D_E(j, j')}{\sum_{j \in S_T} 1} \quad (6)$$

によって評価する。これは2つの集合 S_L , S_T 間で各樹冠円中心に最も近い樹冠円中心を他方の集合から選び、その距離を全ての樹冠円で平均したものである。式(6)の値は $S_L = S_T$ のときに0となり、それ以外では正の値となる。図4に誤差評価の結果を示す。

図4には8つの点がプロットされており、同図中で左から7つの点は、前述までの7時期分(1999年4月

8日～12月8日までの7時期に撮影)の各画像(図1(A)～(G)の各画像)から個別に樹冠円を抽出したときの誤差を示している。左から5つ目の点(11月5日撮影)のように撮影時期によっては、誤差が大きくなる場合があることが分かる。右端の点は本研究による提案手法での誤差であり、各画像から個別に抽出した場合よりも誤差が小さくなっている。これは樹冠円抽出に用いる画像の枚数を増やすことによって抽出の精度を向上させ得ることを示している。提案手法によって抽出された樹冠円の分布を図5に示す。

樹冠円の色には図2(C)の右上の画像の色を用い、各樹冠円は中心画素の色で着色した。このように多重オルソフォト画像を用いることによって、1時期分の画像だけを用いる場合よりも目視抽出に近い樹冠円抽出が行えることが確認された。提案手法は、特定の森林域を複数の時期にわたって撮影可能な場合に有効であると考えられる。なおメジアンフィルタのウィンドウサイズは 3×3 画素とし、式(3)、式(4)の定数は $T_0=20$, $t_0=30$ とした。

5. おわりに

多重オルソフォト画像から樹冠円を抽出する方法を提案し、1時期の画像から抽出する従来手法よりも目視抽出に近い結果が得られることを検証で確認でき

図4 樹冠円の抽出誤差

た。ただし、樹冠円抽出に適した撮影時期の特定などが課題となる。

今後、多重オルソフォト画像と航空機レーザスキャナデータとを併用した樹冠円抽出手法の確立や林相タイプ別（例えば、今回のような多種多様な樹種から構成される里山林以外にも、常緑広葉樹から形成される自然林やスギ・ヒノキ人工林など）での適用性を検証したいと考えている。

（受付日2006.2.23，受理日2006.5.12）

参考文献

- 朝廣和夫，井上光平，上原三知，重松敏則，瀬戸島政博，2003. 空撮画像の同質領域判定による九州北部里山林の樹冠抽出に関する研究，日本造園学会誌，66(5)，pp.499-502.
- 小熊宏之，山形与志樹，2000. リモートセンシングデータを用いた森林樹冠率の推定（京都議定書対応のためのリモートセンシング技術の確立），写真測量とリモートセンシング，39(2)，pp.82-89.
- 小村良太郎，久保 守，村本健一郎，2003. 空撮画像を用いた局所フラクタル次元による樹冠解析，写真測量とリモートセンシング，42(4)，pp.27-37.
- 瀬戸島政博，赤松幸生，福井裕子，今井靖晃，朝廣和夫，重松敏則，2001. 年間にわたる時系列なカラー航空写真データからみた里山林の代表的な常緑広葉樹の色調変化，環境情報科学論文集，15，pp.31-36.
- 瀬戸島政博，赤松幸生，今井靖晃，重松敏則，朝廣和夫，児玉滋彦，2002. カラー航空写真上の季節の色調変化からみた里山構成樹種の識別に関する研究，ランドスケープ研究，65(5)，pp.679-684.
- 瀬戸島政博，今井靖晃，船橋 学，勝木俊雄，2005. 航空データ上の色調変化および落葉推移に基づく混交林の代表的な樹種の区分，ランドスケープ研究，68(5)，pp.931-936.
- 重松敏則，朝廣和夫，瀬戸島政博，牧田史子，1997. 現存植生環境動態図の作成とその活用に関する基礎的研究，日本造園学会誌，60(5)，pp.527-530.
- Song, C., Woodcock, C.E., 2003. Estimating tree crown size from multiresolution remotely sensed imagery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(11), pp.1263-1270.

中山 寛，曾根光男，高木幹雄，1989. フラクタル次元と低次統計量とを用いた気象衛星 NOAA 画像の解析とその評価，情報処理学会論文誌，30(1)，pp. 91-100.

補足 局所フラクタル次元の計算

本節では、局所フラクタル次元の計算方法を概説する。詳しくは小村ら（2003）や中山ら（1989）を参照されたい。まず多重オルソフォト画像を構成する各画像 i の各画素 j を $g_{ij}^{(i)} = 0.299f_{Rj}^{(i)} + 0.587f_{Gj}^{(i)} + 0.114f_{Bj}^{(i)}$ によってモノクロにする。局所フラクタル次元の計算は各画像 i で独立に行えるので、以下では記述を簡単にするために i は省略することにする。画素 j を中心とする直径 D の円を考え、その円に含まれる画素の集合を $C_j^{(D)}$ とする。また $C_j^{(D)}$ に含まれる各画素 $j' \in C_j^{(D)}$ を中心とする直径 d の円を考え、その円に含まれる画素の集合を $C_{jj'}^{(d)}$ とする。

$$g_{jj'}^{\max}(d) = \max_{j'' \in C_{jj'}^{(d)}} \{g_{jj''}\} \quad (7)$$

$$g_{jj'}^{\min}(d) = \min_{j'' \in C_{jj'}^{(d)}} \{g_{jj''}\} \quad (8)$$

として

$$v_{jj'}(d) = \lfloor [g_{jj'}^{\max}(d) - g_{jj'}^{\min}(d)] / d \rfloor + 1 \quad (9)$$

とする。更に

$$V_j(d) = \left(\frac{D_2}{d_2} \right)^{\frac{\sum_{j' \in C_j^{(D)}} v_{jj'}(d)}{\sum_{j' \in C_j^{(D)}} 1}} \quad (10)$$

とする。 $D=25$ とし、 d は $d=4, 8, 16$ と変化させて3つの点 $(x_d, y_d) = (\log d, \log V_j(d))$ ($d=4, 8, 16$) を求め、この3点への回帰直線の傾き

$$a = \frac{(\sum_d x_d y_d)(\sum_d 1) - (\sum_d x_d)(\sum_d y_d)}{(\sum_d x_d^2)(\sum_d 1) - (\sum_d x_d)^2} \quad (11)$$

より、局所フラクタル次元を $\hat{d}_j = -a$ とする。 $\hat{d}^{\max} = \max_j \{\hat{d}_j\}$, $\hat{d}^{\min} = \min_j \{\hat{d}_j\}$ において

$$\tilde{d}_j = \frac{\hat{d}_j - \hat{d}^{\min}}{\hat{d}^{\max} - \hat{d}^{\min}} \quad (12)$$

としたものが正規化局所フラクタル次元である。