

地形図における3次元情報の自動抽出とその応用†

森 正 寿^{††} 瀬 戸 浩 昭^{†††} 中 村 彰^{††††}

地形図処理の一環として、等高線の抽出、3次元化等に対する新しい手法を提案する。等高線はこれまで主にモノクロ情報として処理されてきたが、ここではスキャナによって分解された色情報を正規化し、地形図に記述されている地名、各種記号等から選択的に抽出する手法について述べる。抽出された等高線は細線化された後、連結され、1画素幅の完全な形に復元される。これらの復元された各等高線に対する標高付与法として、新たに国土数値情報を基準標高値として使い、効率的に処理する手法を開発した。3次元化された等高線データの応用として、傾斜量地図の作成、降水シミュレーション、複合的なデータ構築としての Landsat TM 画像の鳥瞰図作成を行った。

1. ま え が き

地形図処理はこれまで写真技術を中心としたアナログ処理が主流であったが、最近は大規模化に伴いデジタル処理が急速に進展している。地形図は道路、建物、河川、等高線などの多様な情報を含んでおり数値化したデータを標準化することにより、より広範囲な利用法が広がるものと思われる。このような状況のなかで、米国地質調査所の Light は地形図情報の総合的データベースとして DCDB (Digital Cartographic Data Base)¹⁾ を提案している。これは階層的データ構造となっており、大分類として主題図データ、画像データ、地形情報データから成り、さらにそれぞれの分類のうちで細目が分れている。我が国においては地形図データの標準化を目指した場合²⁾、国土地理院発行の地形図は、記号、色、寸法などが規格化されており、信頼性が高く、入手が容易であり、対象としては最適であると思われる。本稿では、最終的には地形図データベースの重要な構成要素になるとと思われる等高線データの構築を目指して、3次元情報の自動抽出を試みる。

地形情報の中でも等高線は地形の3次元情報を表すものとして、応用範囲が広く、特に重要な意味を持っている。地形の3次元情報は集中豪雨などの災害時に、洪水や崖崩れが起りやすい地域を予測するため

の基礎的な資料となり、防災上非常に有用である。等高線を対象にした研究は等高線を抽出し、標高付与を行うことを主な目的としている³⁾⁻⁶⁾。これらの研究はこれまでかなりの自動化が進んでいるが、それでもなお基準標高値の入力には依然として人手が介在する作業が残っていた。

本稿では人手を介さない自動的な等高線処理の手法について報告する。処理の概略を以下に示す。3章において最初に等高線を抽出する手法について述べる。抽出には等高線の線幅を利用した方法や色情報を利用した方法⁷⁾が報告されているが、ここでは、色情報の正規化による抽出方法を試みる。この方法によって、ほかの色の記号などが混在する場合でも明確に抽出が可能となる。次に4章においては標高の付与とその応用について述べる。3章で抽出した等高線の細線化を行い、線の構造を認識したあと、線の跡切れ、分岐などを除去し完全な等高線へ復元する。その後で等高線に標高付与を施す。標高付与には標高数値を直接読み取り、認識する方法が考えられているが、本稿では国土数値情報を用い標高を推定する手法を考える。さらに標高を与えた等高線から自動的に立体図を作成することを試みる。また立体図を利用して、地図上の各点についての傾斜量を求めた傾斜量地図を作成する。最後に5章において相異なる地形図データと画像データの結合として地上分解能が高い Landsat TM (Thematic Mapper) 画像データの3次元化を行い、鳥瞰図を作成し、その応用分野についての検討を加える。

2. 地形図データと前処理

2.1 地形図データ

原データとしては、国土地理院発行の5万分の1の地形図(長崎)をドラムスキャナで10本/mmの走査

† Automatic Extraction of Contour Lines in a Topographical Map and Its Application by MASATOSHI MORI (Department of Management Engineering, Kyushu College of Engineering, Kinki University), HIROAKI SETO (Sony Corporation) and AKIRA NAKAMURA (Department of Electronics, Faculty of Engineering, Nagasaki University).

†† 近畿大学九州工学部経営工学科

††† ソニー(株)

†††† 長崎大学工学部電子工学科



図1 スキャナで得られた地形図データのカラー・ディスプレイ表示

Fig. 1 Color image of scanned topographical data on a display.

密度で入力したデータを用いた。地形図は入力時に $R, G, B, B/W$ の 256 輝度レベルの色情報に分解される。図1は典型的な領域を実際にスキャナで色分解し、さらにそれをイメージ・ディスプレイ上でカラー画像に再構成したものであるが、この程度の走査密度で必要な情報を損なうことなく十分再現できているのがわかる。

等高線には主曲線（標高 20 m 間隔，線幅 0.08 mm），計曲線（標高 100 m 間隔，線幅 0.15 mm）の 2 種類があり，色は両者とも同じ茶色である。また地図上では，地名，記号（黒色），植生（緑色），水域（水色）が優先するため，等高線と重なってこれらが存在している。また国道記号や標高数値も同じ茶色である。国道は茶色の網点であり，標高数値は等高線を跡切れさせて存在している。それに加え等高線の特殊記号として凹地や崖などがある。これらは等高線の抽出を複雑なものにしている。本稿では簡単のために，これらの記号を含まない領域の処理を行った。

2.2 前処理

国土地理院の地形図は投影法としてユニバーサル横メルカトル図法を採用しているため，緯線は平行であるが（緯線方向の平行度のずれは，10 本/mm の走査密度の場合，1 枚の地形図全体で最大 1 画素以下なのでここでは実用上平行と見なす），経線は平行とはならない。そこでスキャナで地形図データを入力する場合，走査方向を緯線に平行か，または垂直に取るが，1 画素の精度で位置取りをするのは不可能であり，補正を行う必要がある。この場合の補正は傾き補正だけでよく，一次アフィン変換で十分である。変換式は出力画像の画素の座標を (x, y) ，それに対応する入力画

像の画素を (u, v) とすると

$$\left. \begin{aligned} u &= x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta, \\ v &= -x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。ここで θ は回転角である。 θ は地形図の周辺部にマークしてある基準座標点をコントロール・ポイントとして計算できる。また，輝度値の推定については，原データの内容を損なわないように nearest neighbor 法をとった。

3. 等高線の抽出

等高線を抽出する手法はすでいくつか発表されているが，色情報を利用したものとして金子らの研究⁷⁾がある。金子らは特に R, G, B 成分と各表現色（黒色，茶色，藍色）の関係を調べ， R と B の比 R/B が特徴的な量であることを見だし，これを利用して，各表現色を分離する手法を提案している。しかしながら他方では，舟久保が行った複数のスキャナの特性を測定・検討した結果^{8),9)}によると，スキャナ自体のフィルタ，光源，受光管特性には差異が認められている。したがって，金子らの手法のように特定の R/B 値に着目した場合，スキャナの種類によっては有効に働かない可能性が考えられる。固有のスキャナごとに最小自乗法により最適近似直線を決定し，手法に使用されているパラメータを決定するにしてもアルゴリズム自体がやや複雑であるため，多少の困難を伴うことも考えられる。そこで本研究ではスキャナから得られる R, G, B 成分の特定の組み合わせは使わず，スキャナごとの差があまり問題とならないように単独で使うことを考えた。

3.1 色情報の正規化による抽出法

等高線の抽出法としては基本的には，リモートセンシング画像処理で広く使用されているマルチレベルスライスによる分類手法を採用した。これはアルゴリズムが簡単であり，チャンネルごとのデータを独立して処理するので，今回の例のようにスキャナの種別で R, G, B のデータ構造に差異が生じる可能性がある場合には適していると思われる。

図2は図1の画像データの R, G, B ごとの1次元ヒストグラムを示したものである。スキャナで画像を反射型で読み取る場合，白地に輝度値の最大値（255）を合わせる。しかしながらこの場合図2からもわかるように，黒地でも輝度値は0とはならず，ある有限の値を持つ。したがって実際の輝度値は常にこの最小値に相当する直流成分を含んでいることになる。今回の

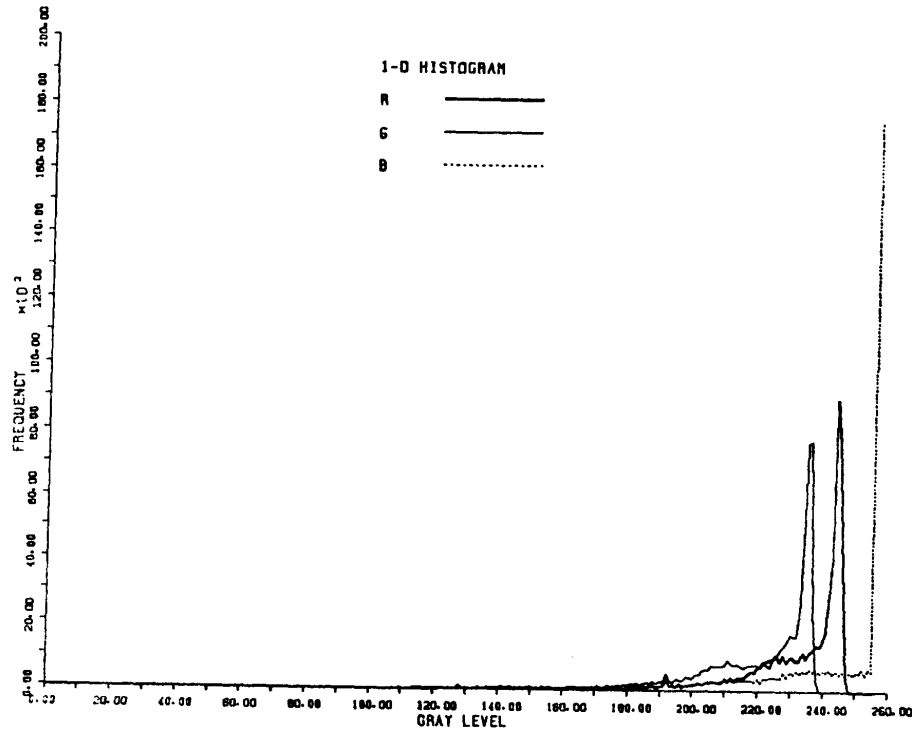


図2 図1のR,G,B別の1次元ヒストグラム
Fig. 2 One-dimensional histograms of R,G,B data of Fig. 1.

場合、それぞれ $R_0=150$, $G_0=106$, $B_0=100$ とかなり大きな値を持つ。

正規化の方法としては色彩学の立場から、生の輝度値を R , G , B とすると $1/(R+G+B)$ で行っている場合もあるが、図3(a)は、この方法により白地と等高線を含む画像データの $G/(R+G+B)$ と $B/(R+G+B)$ を2軸とする2次元ヒストグラムを示したものである。マルチレベルスライス法ではこの2次元ヒストグラムで各要素が分離して存在する必要があるが、この図では白地と等高線が分離せず一体となっていることがわかる。

本研究ではより効率よく分離できるように正規化にノルム型を採用し、さらにダイナミックレンジを有効に使うために

$$\left. \begin{aligned} r &= (R - R_0)/L, \\ g &= (G - G_0)/L, \\ b &= (B - B_0)/L, \\ L &= \sqrt{(R - R_0)^2 + (G - G_0)^2 + (B - B_0)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で与えられる正規化を行った。図3(b)は図3(a)と同一のデータを式(2)を使い、 g , b の2軸で2次元ヒストグラムを示したものである。さらに図3(b)における等高線の分布位置を確認するために、白地の

部分だけのヒストグラムを図3(c)に示した。図3(b), (c)からわかるように等高線がはっきりと分離していることがわかる。さらに計量的に処理するために、主曲線と計曲線から画素レベルで直接サンプリングを行った。特に主曲線の線幅はセンサのアパーチャ口径と同程度であるため、センサが主曲線と白地を同時に検知する確率が高くなる。その場合輝度値は、白地の部分と等高線の一部が平均化されて読み込まれることになる。したがってヒストグラムは図3(b)のように白地の部分から等高線の一部へと連続的に変化して行く。このように等高線を部分的に検知しているサンプルは誤分類の原因となるため、これらを除外して r , g , b ごとの平均、標準偏差を計算した。図3(b)の+マークは等高線サンプル集合の平均を示しており、等高線全体の平均より白地から離れた位置にあるのがわかる。抽出に必要な基準値の求め方は以下の方法に従った。

- ① スキャナで得られたデータから等高線を構成する画素をサンプリングする。
- ② サンプル集合を式(2)により正規化する。
- ③ ②で得られた各 r , g , b の平均 (\bar{r} , \bar{g} , \bar{b}), 標準偏差 (σ_r , σ_g , σ_b) を求める。

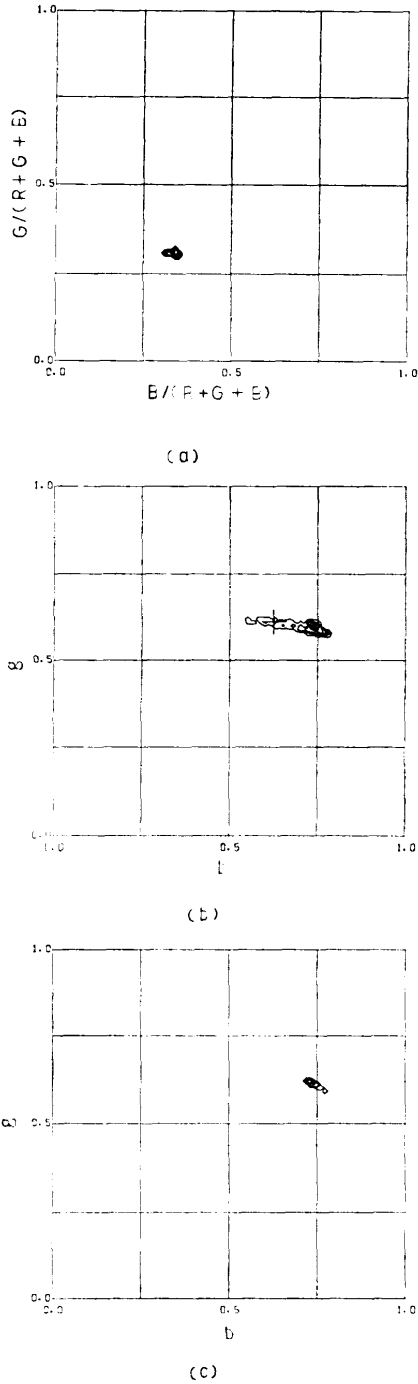


図 3 正規化されたデータの2次元ヒストグラム, (a) 白地と等高線を含むデータを $1/(R+G+B)$ で正規化したもの, (b) (a) と同一のデータを式(2)で正規化したもの, (c) 白地だけのデータを式(2)で正規化したもの

Fig. 3 Two-dimensional histograms of normalized image data, (a) image data containing white background and contour lines normalized by $1/(R+G+B)$, (b) the same data as (a) normalized by Eq. (2), (c) image data containing white background normalized by Eq. (2).

実際の抽出の段階では, 平均値に許容範囲 (係数×標準偏差) を持たせ

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} - K_r \cdot \sigma_r < r < \bar{r} + K_r \cdot \sigma_r, \\ \bar{g} - K_g \cdot \sigma_g < g < \bar{g} + K_g \cdot \sigma_g, \\ \bar{b} - K_b \cdot \sigma_b < b < \bar{b} + K_b \cdot \sigma_b \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

という条件を同時に満たす画素を抽出した. 具体的には多数の標本点から算出し, パラメータとして

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} = 0.4747, \quad \sigma_r = 0.0247, \\ \bar{g} = 0.6121, \quad \sigma_g = 0.0168, \\ \bar{b} = 0.6249, \quad \sigma_b = 0.0331, \\ K_r = K_g = K_b = 1.75 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

という値を用いた. 以上のように本研究で提案したアルゴリズムは全体として単純であり, R, G, B 成分を正規化したあとで独立して取り扱っているため, スキャナ自体の特性に多少差があっても対応できるものと思われる.

図 4 は原データ (120×120 画素) の W/B を閾値 10 で 2 値化したものである. 地図上では, 等高線の上に “本河内高部水源” の地名, “高压電線” の線の記号, 水域や植生などが混在している. 図 5 は図 4 より等高線を式(3)を使って抽出したものである. 等高線は文字や記号が重なった部分でもほぼ完全に抽出されていることがわかる. このことよりスキャナで入力されたデータは, 等高線と他の記号が重なった部分においても茶色の成分比率を示していることがわかった.

3.2 細線化

等高線の情報としては 1 画素で十分であるから細線化を行う. 等高線を対象にした細線化法はいくつかすでに報告されているが, そこにある細線化法は線が連続している場合を対象にしている¹⁰. 図 5 の等高線には跡切れが所々に存在している. したがって, 線の縮

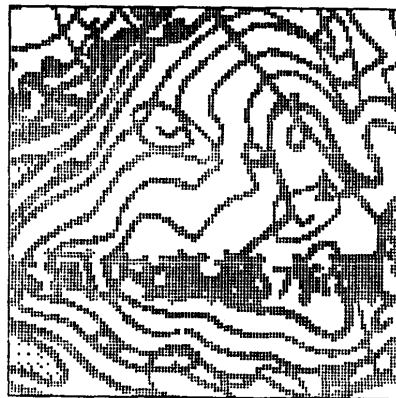


図 4 2 値化処理された地形図 (120×120 画素)
Fig. 4 Topographical map with two values (120×120 pixels).

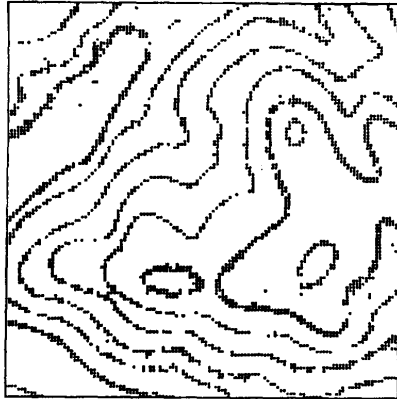


図5 図4より抽出された等高線

Fig. 5 Extracted contour lines from Fig. 4.

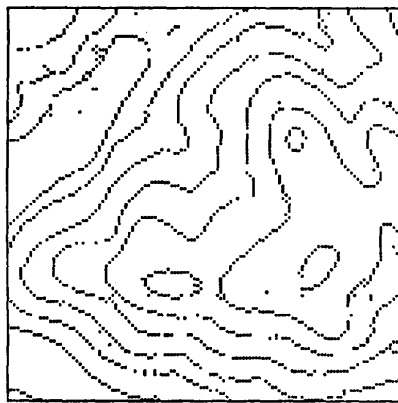


図6 細線化された等高線

Fig. 6 Thinned contour lines.

退（跡切れ）に強い細線化が必要である。そこで本稿では縮退に強い8連結による方法を採用した¹¹⁾。これは逐次型の細線化アルゴリズムであり、等高線の中心画素だけを残し、不要な画素を除去判定マスクを使用して取り除く。このマスク自体を画像の左上から順次走査し、判定条件に従って最終的に等高線の細線化を行うものである。このほかにも同様のアルゴリズムで4連結による方法が提案されているが、これはヒゲ状ノイズ枝の発生が多く、今回は使用していない。この8連結法を使い、図5を細線化したものが図6である。この処理で中心線のみ残ったことになるが、図中には依然として跡切れ、枝、分岐が生じている。次の復元操作によってこれらを除去することを考える。

3.3 構造を認識した復元

細線化された等高線が情報を失わないように復元する。この場合、復元された等高線は連続かつ単一画素の曲線であり、それが

《1》 閉曲線である

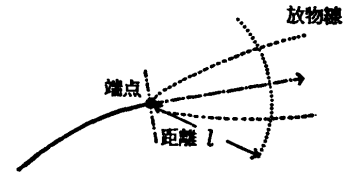


図7 端点の領域

Fig. 7 Effective region of an end point.

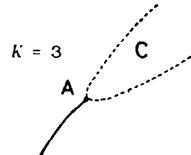
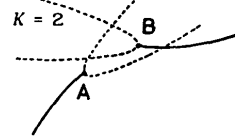
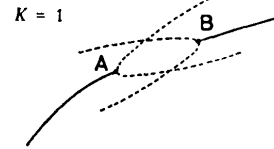


図8 連結優先順位

Fig. 8 Order of priority to connect end points.

《2》 両端が枠に達する開曲線である

のいずれかの条件を満たしておけばよい。以上の条件を満たすように、跡切れ、枝、分岐を除去し図6を復元する。

3.3.1 線の連続性

最初に、跡切れた部分を連結することを考える。基本的には細貝らの線の構造を考えた手法を利用した¹²⁾。これは有効な情報を保存し、さらに次の段階で分岐点処理が効果的に作用するように、本来連続していたと思われる線が、そこで切断されていると判断できる端点を検出することにある。方法は、跡切れた方向と連結が予想される線との関係を考えて、最も連結しやすいものから優先的に処理を行う。優先順位は以下のような方法で定める。図7に示すように跡切れや線の先端を端点とし、端点から線の方を軸として放物線を発生させる。放物線内にかつ端点から一定距離内のところを端点の領域とする。図8において端点Aの領域内に端点Bが存在し、端点Bの領域にも端点Aが存在すれば優先順位 $K=1$ 、存在しなければ優先順位 $K=2$ とする。また端点Aの領域内に弧立点Cだけしか存在しない場合は、優先順位 $K=3$ とする。

ただし、孤立点を相手にする場合は端点の領域は先の領域より小さくともとする。連結は K が小さいものから先に行く。もし、ある端点が複数の端点領域内に存在するならば、 K がより小さいものに対してのみ処理を行い、他の端点については連結は行わないようにする。

3.3.2 線の単一性

線の連結終了後、残った枝、分岐点、短線分、孤立点をすべて除去する。枝と分岐点には密接な関係があるため、先に枝と分岐点を合わせた処理を行う。この処理もまた線連結と同様に優先順位を定め、それに従って処理を進めていく。分岐点の検出には 3×3 のマスクを使い、マスクの中で中心画素を含めて値1の画素が4個存在し、中心を除いた画素が隣り合わない時、中心画素を分岐点と判定した。ここでは線構造の複雑さが少ないものから大きいものへ処理を行う。図9に処理の優先順位と方法を示す。

C=1: 枝はすべて除去する。

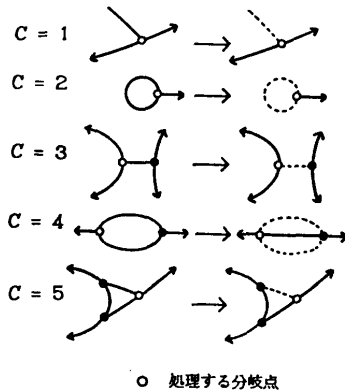


図9 分岐点の処理

Fig. 9 Recovering processes of junctions.

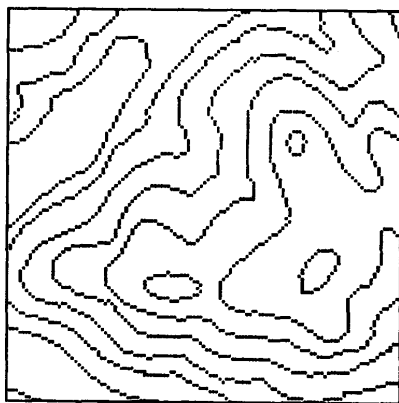


図10 復元された等高線

Fig. 10 Reconstructed contour lines.

C=2: 短閉曲線とつながる分岐点は短閉曲線を除去する。

C=3: 十分長い線間にかかる短い線分は除去する。

C=4: 分岐点が向かい合って存在していれば、分岐点間に直線を引き、分岐点から生じている他の線を除去する。

C=5: 直線性が強い方を残す。

しかしながら C=2 では、図9のような短閉曲線とつながる分岐点が本来の等高線に接続している場合、C=2 の処理では図のように短閉曲線は除去できるが、分岐点は依然として残ることになる。また、C=5 の場合でも直線性が強い方は残るが、分岐点としてはまだ残ることになる。これは同じ処理をもう一度繰り返すことによって除去が可能である。この処理は線の構造をより単純なものへ解体していき、分岐点を除去することを目的としたものである。以上の操作による分岐点の除去の後、短線分、孤立点をまとめて消去する。図10は図6を復元したものである。線はすべて連続かつ単一の曲線で《1》または《2》の条件を満たしていることがわかる。

4. 標高付与とその応用

等高線が抽出された段階で次に必要となるのが標高の付与である。これまでに標高付与はかなり自動化が進んでいるが、やはり初期条件としての基準標高の付与は、対話形式を使いながらの手作業として残っていた。一部には同様な目的で海図における等深線の読み取りを、文字認識を応用して行うという試みもあるが¹³⁾、海図においては記載されている記号等が単純であり、そのまま地形図に適用するには困難ではないかと思われる。

このような状況の中で本稿では標高付与に、より完全な自動化を目指して国土数値情報を利用することにした。国土数値情報と等高線データとのレジストレーションを行い、初期条件としての基準標高に国土数値情報のデータをそのまま使うというものである。したがってこれまでのように、一部にせよ標高値を手作業で入力するというプロセスは全くなくなる。その後は等高線の隣接間の関係を順次使い、最終的な全体の標高を決定することになる。

4.1 国土数値情報^{14), 15)}

国土数値情報は国土地理院が作成しており、さまざまな地形情報を数値化しファイルとして記録している。ファイル書式は日本全土を緯線、経線に沿った格

子状に分割し、それを単位として情報を登録している。その中の標高データは図 11 に示すように縦横 250 m の格子を単位としており、各格子点が位置する所 (標高計測点) の標高がそれぞれ登録されている。図 12 の領域 (220×220 画素) に標高データを重ね合わせることを考える。標高データ自体は位置情報を持っていないため、格子の間隔より位置を算出しなければならない。図 13 は図 12 より等高線を抽出し、そ

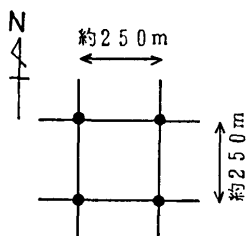


図 11 標高計測点間隔

Fig. 11 Intervals between measured height-points.

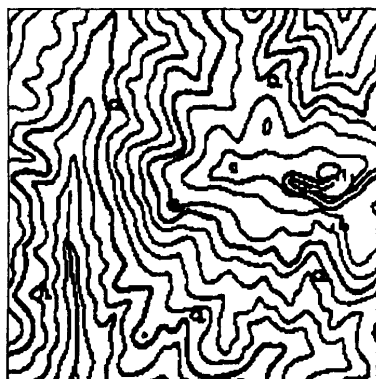


図 12 2値化処理された地形図 (220×220 画素)
Fig. 12 Topographical map with two values (220×220 pixels).

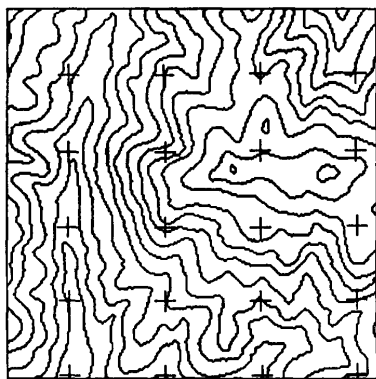


図 13 等高線と標高点 (+) の重ね合わせ
Fig. 13 Registration between contour lines and height-points (+).

れに標高計測点 (以下標高点と呼ぶ) の位置を正確に重ね合わせたものである。また 5 万分の 1 の地形図を 0.1 mm/画素の走査密度で入力しているため、1 画素 5 m となっている。したがって、標高点は 50 画素間隔で存在することになり、図 13 中には 20 点の標高点 (+) が落ちることになった。

4.2 標高付与

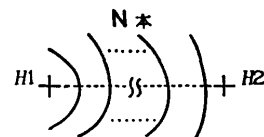
本稿では等高線と標高データを重ね合わせることによる標高付与法を開発した。前処理として等高線の位置関係を認識しておき、各等高線に番号を付け、開曲線と閉曲線を判別する。閉曲線に対しては自分自身の内部に他の閉曲線が存在するものと存在しないものとを判別しておく。また各等高線に対して隣り合う線を調べてテーブル化しておき、これらの位置関係を判定条件として利用する。標高付与は開曲線、閉曲線の順で行う。

4.2.1 開曲線

等高線の標高は、標高データの位置とその間に存在する等高線の本数の関係より推定される。すなわち $H1, H2$ (m) を隣り合う標高点における標高値とすると、標高値の差 $|H1 - H2|$ (m) がその間に存在する N 本の等高線の標高差 $20 \times (N - 1)$ (m) に等しいとき

$$|H1 - H2| = 20 \times (N - 1) \quad (5)$$

となり、等高線の標高は一意的に定まる (図 14(a))。この条件を満たすときに、標高点間に存在するそれぞ



$$|H1 - H2| = 20 \times (N - 1) \quad (a)$$

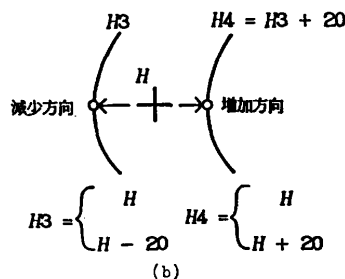


図 14 開曲線に対する標高付与
Fig. 14 Conditions for determination of height on open contour lines.

れの等高線に標高を与える。ただし、ここでは標高値は等高線の単位標高差 20 m で量子化されているものとする。

実際には、推定の段階で次のようなことが起こる。図 14 (b) において、標高値 H (m) の右を増加方向、左を減少方向としてこれらの関係から推定を行うことを考える。図より標高値 H はすぐ右の等高線の標高

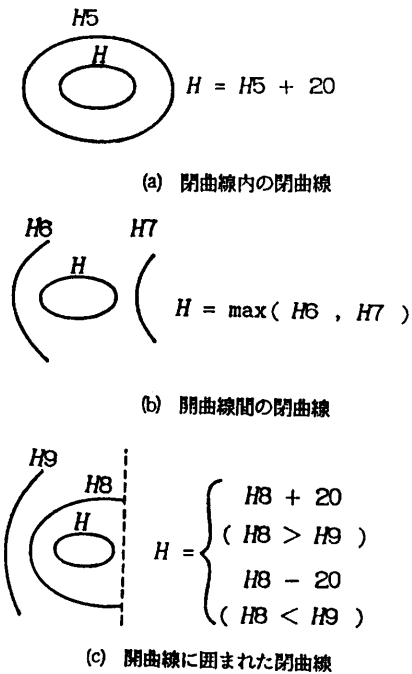


図 15 閉曲線に対する標高付与
Fig. 15 Conditions for determination of height on closed contour lines.

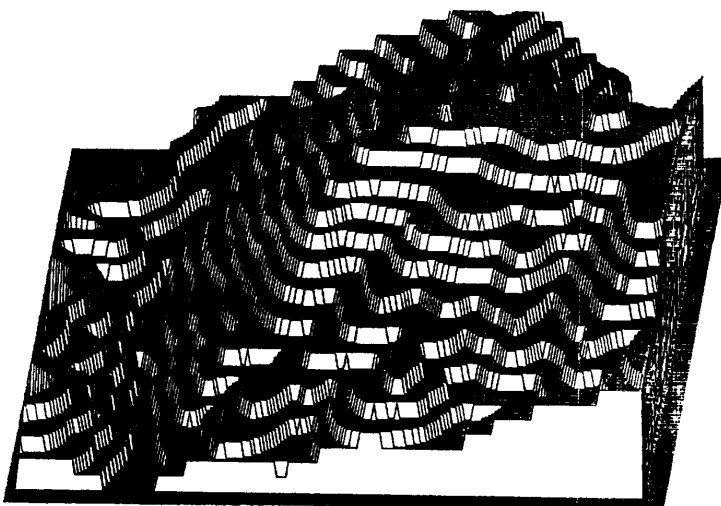


図 16 等高線から構成された立体図
Fig. 16 Three-dimensional map constructed using contour lines.

値 $H + 20$ (m), または左の等高線の標高値 $H - 20$ (m) として使われる。しかし、標高値 H は増加方向では $H + 20$ とした方が都合が良い場合があり、逆に減少方向では $H - 20$ とした方が都合が良い場合がある。したがって、標高値 H の増加方向と減少方向によって、標高値を単位標高差 20 m で操作することを考えた。増加方向では H または $H + 20$, 減少方向では H または $H - 20$ の標高値の操作を行う。また正確を期すために、それぞれの標高値の組み合わせによって推定された結果を登録しておき、最終的な標高の決定は登録の回数による多数決により行った。

4.2.2 閉曲線

ここでは簡単のために、閉曲線はすべて凸地を表すものとして、単調増加、単調減少の地形として考える。また求める標高値 H 以外はすべて求められているものとする。

処理手順;

図 15 (a): 外側より 20 m 高い標高を与える

$$H = H5 + 20,$$

(b): より高い標高を与える

$$H = \max(H6, H7),$$

(c): 1つ外側を調べ判断する

単調増加 ($H8 > H9$) ならば

$$H = H8 + 20,$$

単調減少 ($H8 < H9$) ならば

$$H = H8 - 20.$$

以上の処理より、図 12 に標高を与え立体化したものが図 16 である。値を 20 m で量子化しているため、最低 20 m, 最高 280 m になっている。次に、量子化された立体図において標高値を補間することを考える。

4.3 立体図作成

標高データは、すでに述べたように約 250 m 間隔で存在しているが、このデータは間隔が大きく利用しにくい。したがって、図 16 の標高値の補間を行い立体図の平滑化を行う。これによって、近似的ではあるが 5 m 間隔の標高値が得られることになる。

平滑化には 2次元の B-SPLINE 関数による補間を用いた。この補間には 2次元の標高値のサンプリングが必要である。図 17 のように X, Y 方向のサンプリング間隔をそれぞれ $\Delta x, \Delta y$ として

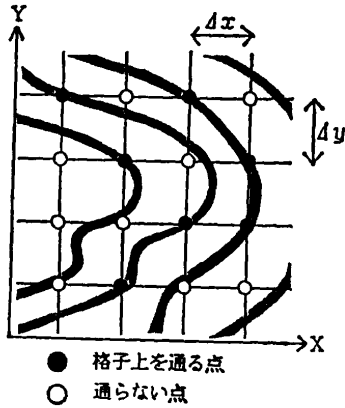


図 17 2次元における標高点のサンプリング
Fig. 17 Sampling height-points in a two-dimensional map.

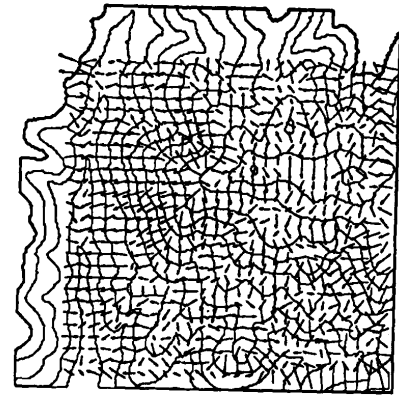


図 19 傾斜量地図
Fig. 19 Inclination map on landform.

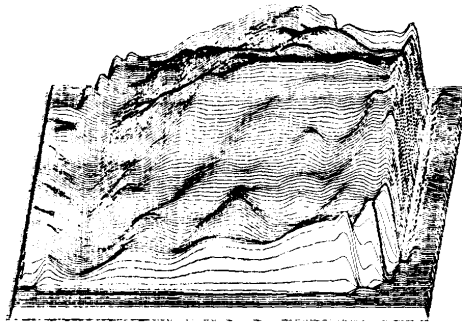


図 18 補間された立体図
Fig. 18 Three-dimensional map based on interpolated values.

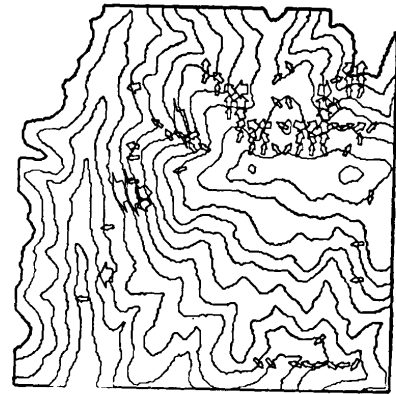


図 20 降水の流出シミュレーション
Fig. 20 Flow simulation of rain water.

標高値のサンプリングを行う。しかし、必ずしも等高線が格子点を通るとは限らないことがわかる。そこで、 X, Y 方向それぞれについて1次元の B-SPLINE 関数による補間を先に行い、すべての格子点を補間した標高値で埋めておくことにした。各格子点の標高値は X, Y 両方向の補間によって得られたそれぞれの値の平均をとった。以上のようにして得られた2次元配列の値を補間した結果が図 18 である。

4.4 傾斜量地図

傾斜量データは国土数値情報の中にすでに整備されている。しかし、そこに登録されている傾斜量データは標高計測点における標高データを用いて算出されているため、データが同じ 250 m 間隔と粗く、その表示方向も 8 方向と限られており、実用上は利用が困難である。そこで、本研究では図 18 の立体図を利用して傾斜量地図を作成した。

傾斜量の算出は B-SPLINE 関数の数値微分を用いた。方法は、ある地点の X, Y 方向の微分値を求め、

その微分値からその点における最大傾斜を算出した。図 19 がその結果である。これは 35 m 間隔の格子点での最大傾斜の方向とその大きさを矢印で表示したものである。この傾斜量地図は近似的なものではあるが、最小 5 m 間隔の格子点での傾斜量が求められ、その方向も任意の方向として算出できる。また閾値を設定することにより、大きな傾斜部分のみの表示も可能である。矢印による表示は直観的に傾斜量がわかりやすいものになっている。

4.5 降水の流出シミュレーション

集中豪雨などの時に、降水がどこに集中するかを予測することは防災上重要である。傾斜量地図の応用として、本稿では降水の流出シミュレーションを行った。シミュレーションの方法は以下のとおりである。

条件としては降水は土中には吸収されずにすべて流出するとした。また各点における水流の方向はその点における傾斜方向だけによるものとした。まず全領域について各画素ごとに傾斜量を求めておき、一定間隔

で点を落とす。点は傾斜の方向にそって移動していき、移動してきた点の通過を各画素でカウントする。したがって、カウントされた回数が多いところほど降水が集中することになる。図 20 はシミュレーションの結果である。矢印の方向が流出していく方向、矢印の幅が集中の度合を表している。降水は谷の方向へ集中していて、その量も直観的に把握することができる。

5. Landsat TM 画像との合成と鳥瞰図の作成

3次元化された等高線データは、同一の地域におけるリモートセンシング等の画像データと合成されると、さらに高度な情報へと変化する。すなわち3次元的な視覚イメージの実現により、地形に対するより直観的な理解、リモートセンシングの特性からくところの高精度な植生の判読、さらにその地形と植生との関係の把握、地質学的には褶曲、断層、リニアメント等の検索への重要な手掛かりとなるなど、その応用範囲は広いものと思われる。

近似的であるにせよ 5m 間隔の標高値が与えられた場合、地上分解能がこれに匹敵する画像データは、航空機リモートセンシング・データであるが、これはデータ自体がきわめて得難く一般的でない。現在容易に入手できて、地上分解能が高いデータとしては Landsat TM データがある。これは地上分解能(瞬間視野)が 27m と同じく Landsat MSS データの 80m と比較すると格段の高精度である。TM データの鳥瞰図作成の例^{16),17)}はすでにあるが、これらの場合最大の難点は標高値のデータを地形図から手作業で読み取り、さらにパンチして標高ファイルを作成するところにあった。しかもサンプリングは MSS データに合わせて 80m メッシュとなっており、かなり粗いデータとなっている。それに比べて本研究では、手作業による入力はなく、地上分解能も格段に向上している。Landsat TM についての詳しい内容については他の文献に譲るとして^{18),19)}、今回等高線データと Landsat TM 画像データとの合成を行い鳥瞰図作成を試みた。

5.1 Landsat TM データのリサンプリング²⁰⁾

一般に供給されている Landsat TM データは種々の歪を含んでおり、画像のライン方向、カラム方向は当然のことながら地形図の経線、緯線方向には一致していない²¹⁾。そこでリサンプリングにより歪補正、および座標変換を行う必要がある。5万分の1の地形図

で表される程度の領域の場合、変換には一次のアフィン変換で十分であるとされている。ただしこの場合 2.2 節の前処理とは異なり回転だけでなく、スケールを伴うため変換式は

$$\left. \begin{aligned} u &= ax + by + c, \\ v &= dx + ey + f \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。ここで (u, v) は入力画像、 (x, y) は出力画像の座標である。また係数の決定に際しては対象領域を含む十分広い範囲において橋、河川の分岐、海岸線の突起等を GCP (Ground Control Point) として使い最小二乗法を使って決定した。輝度値については 27m から 5m 間隔へのリサンプリングであるため、nearest neighbor 法ではステップ関数的となり不自然になるため、より滑らかな曲面を得るために Cubic Convolution 法を採用した。図 21 は図 12 の等高線の範囲における TM データのナチュラル・カラー画像であり、TM データのバンド 2、バンド 3、バンド 4



図 21 Landsat TM データのナチュラル・カラー表示
Fig. 21 Natural color image of Landsat TM data.

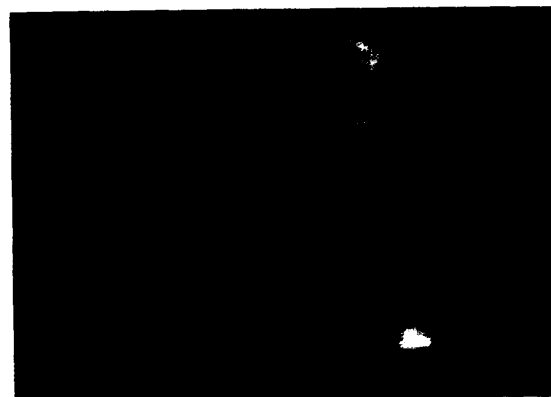


図 22 Landsat TM データの3次元画像表示
Fig. 22 Three-dimensional view of Landsat TM data.

にそれぞれ青、赤、緑を対応させている。図中の右下にある白っぽいものは雲であり、左下にその影が映っている。また、図 12 の等高線と対応させると左側に上下に谷が走っているのもよくわかる。

5.2 鳥瞰図の作成

鳥瞰図そのものの作成法についてはすでにいくつもの解説があり^{16), 17), 22)}、それらを参考にして図 21 の TM 画像の鳥瞰図を作成した。図 22 にその結果を示す。図では強調するために高さ方向を平面方向に比べて2倍のスケールにしている。右下に見えるのは雲であるが、ここでは特に除去処理をしていない。全体的に見て山の起伏がはっきりとわかり、このような3次元の視覚的イメージは等高線と2次元画像から推測するのはきわめて困難であると思われる。

6. む す び

今回地形図処理の一環として等高線の抽出、認識を行った。スキャナにより分解された色情報を、R, G, B 空間において正規化し、等高線を抽出した。その後2値化された等高線データの細線化、8連結法による復元を行った。復元された各等高線に対する標高付与については、今回新たに国土数値情報を基準標高値として使い、効率的に処理する手法を開発した。3次元化された等高線の応用として、傾斜量地図の作成、降水シミュレーション、Landsat TM 画像の鳥瞰図作成を行った。

現状の問題点としては、等高線の認識に必要な参照テーブルに相当の容量を必要とするので、今回 220×220 画素の領域で処理を行ったが、最終的にはさらに効率化を図り、地形図1枚程度(3500×4500画素)の処理を検討している。また、まれではあるにせよ凹地が存在する場合や、傾斜の大きな崖で、複数の等高線が1本になるような場合は、今回のアルゴリズムでは処理できず、今後の課題として残ることになる。

最後に本研究の実施にあたっては、国土情報整備事業の一環として、建設省国土地理院において作成された標高に関する国土数値情報を利用した。

参 考 文 献

- 1) Light, L.: Planning for Optical Disk Technology with Digital Cartography, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 4, pp. 551-557 (1986).
- 2) 安居院, 飯塚, 中嶋: ピラミッド階層構造データの位相変化情報を利用した市街地地図の処理, 信

学論 (D), Vol. J 65-D, No. 10, pp. 1243-1249 (1982).

- 3) 安居院, 古川: 計算機による等高線の抽出, 信学技報, PRL 79-69 (1979).
- 4) 安居院, 伊藤, 中嶋: 山岳地図情報処理に関する研究第一報, 信学技報, PRL 81-37 (1981).
- 5) 安居院, 伊藤, 中嶋: 等高線群に対する効率的な高度付与方法, 信学論 (D), Vol. J 65-D, No. 12, pp. 1507-1512 (1982).
- 6) Montuno, D. Y., Yoshida, Y. and Fukumura, T.: Structural Description of Contour Maps and Its Application to Weather Maps, *Trans. IECE Japan*, Vol. E 63, No. 6, pp. 421-428 (1980).
- 7) 金子, 奥平: 地形図の色分離ファイル化法, 画像工学コンファレンス論文集, Vol. 11, pp. 155-158 (1980).
- 8) 舟久保登: ドラム・スキャナにより入力したカラー画像の色彩情報処理法, 電総研集報, Vol. 45, No. 3-4, pp. 190-208 (1981).
- 9) 舟久保登: ドラム・スキャナにより入力したカラー画像の色彩情報処理法 (補足), 電総研集報, Vol. 47, No. 12, pp. 1253-1258 (1983).
- 10) Stefanelli, R. and Rosenfeld, A.: Some Parallel Thinning Algorithm for Digital Pictures, *J. ACM*, Vol. 18, No. 2, pp. 255-264 (1971).
- 11) 鶴岡, 木村, 吉村, 横井, 三宅: デジタル図形の一細線化法と手書き文字認識システムへの応用, 信学論 (D), Vol. J 66-D, No. 5, pp. 525-532 (1983).
- 12) 細貝, 中村, 奥野: 構造認識に基づく線画像の階層的復元アルゴリズム, 信学論 (D), Vol. J 63-D, No. 9, pp. 731-738 (1980).
- 13) Tozawa, T., Ioka, M. and Sato, M.: Automatic Input of Water Depth Map, 1983 *IEEE Computer Society Work Shop on Computer-Architecture for Pattern Analysis and Image Database Management Proceeding*, pp. 194-201 (1983).
- 14) 建設省国土地理院: 国土数値情報の概要 (1983).
- 15) 特集, 国土数値地域情報システムの利用, 土木とコンピュータ, 6月号 (1985).
- 16) 杉村, 西川, 藤井: ランドサット TM データから作成した3次元表示画像とその将来性, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 359-370 (1985).
- 17) 杉村, 田中, 工藤: ランドサット TM データおよび数値地形モデルを使った土地景観の立体画像作成, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 371-380 (1985).
- 18) Special Issue, Landsat Image Data Quality Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 9 (1985).
- 19) 宇宙開発事業団地球観測センター: 地球観測

データ利用ハンドブック (1982).

- 20) Prakash, A. and Beyer, E. P. : Landsat D Thematic Mapper Image Resampling for Scan Geometry Correction, *1981 Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, pp. 189-200 (1981).
- 21) U. S. Geological Survey: *Landsat Data Users Handbook* (1979).
- 22) 建石隆太郎: 鳥瞰図作成のアルゴリズム, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 22, No. 3, pp. 14-25 (1983).

(昭和 61 年 12 月 18 日受付)
(昭和 63 年 1 月 19 日採録)



森 正寿 (正会員)

昭和 27 年生. 昭和 51 年九州大学理学部物理学科卒業. 昭和 56 年九州大学大学院博士課程中退. 長崎大学工学部電子工学科を経て, 現在近畿大学九州工学部経営工学科勤務. 理学博士. リモートセンシング等の画像処理に従事. APS 会員.



瀬戸 浩昭

昭和 35 年生. 昭和 59 年長崎大学工学部電子工学科卒業. 昭和 61 年長崎大学大学院工学研究科電子工学専攻修了. 画像処理に関する研究に従事. 現在, ソニー(株)ビデオコム事業開発本部勤務.



中村 彰 (正会員)

昭和 6 年生. 昭和 33 年九州大学工学部通信工学科卒業. 同年日本電信電話公社電気通信研究所に入社. 主として電子計算機または電子交換機(中央処理系)のハードウェアの開発, および故障診断技術の研究等に従事. 現在, 長崎大学工学部電子工学科教授. 工学博士. 電子情報通信学会会員.