

スキャナで取り込んだ地図画像の幾何補正

三好孝治¹・李偉青²・金田和文³・山下英生⁴・中前栄八郎⁵

¹正会員 工修 広島工業大学助教授 環境デザイン学科(〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

²Ph. D. 浙江大学助教授 CAD & CG 国家重点研究所 (中華人民共和国浙江省杭州市 310027)

³工博 広島大学助教授 大学院工学研究科情報工学専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

⁴工博 広島大学教授 大学院工学研究科情報工学専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

⁵正会員 工博 (株)三英技研取締役会長 (〒730-0014 広島市中区上職町 3-26)

地図のデジタル化は、空中写真、GPS 等の情報から直接作成するものと、既存の白地図 (ラスティメージ) を細線化し、これをベクトル化するものに大別される。後者の問題点は、原図の伸縮、スキャナの特性等に起因するラスティメージの幾何歪みの補正が必要なことである。

本論文は、膨大な白地図資源を有効に利用するため、個々の地図がもつ固有の入力可能な座標情報を最大限活用した、多様なケースに適応可能なインタラクティブな入力インタフェースと歪み補正システムを提案する。入力効率および入力座標の精度、ならびに補正画像の精度について、前者はカーソル利用の有用性を、後者は誤差度数分布図等を用いた検証により、提案手法が十分実用に供し得ることを確認した。

Key Words: *geometric rectification, topographic map, raster image, DTM, image processing*

1. はじめに

近年、国土地理院を始め各分野において、地図のデジタル化が鋭意進められている。また、これらを統合してオブジェクト指向データベースを構築し、各分野ごとの目的に応じた活用が図られている。さらに 3 次元化による多層構造デジタル地図の実現に向けて、多くの努力がなされている。地図のデジタル化は、直接、空中写真、レーザ計測、GPS 等によるものと、既存の白地図のラスティメージを細線化し、これをベクトル化するものに大別することができる。前者は、社会的要請の大きい都市部および新

建設計画地域周辺などから進められつつある。一方、後者については、既存の膨大な白地図資源(図-1)の活用、また道路建設計画を始め各方面で利用されている。

本論文は、スキャナを用いた白地図のデジタル化の際に問題となる地図の幾何補正法について、主として土木建設計画 CAD システムを対象とし、白地図のもつ特徴を活かしたユーザフレンドリーなデータ入力インタフェースと、それぞれの白地図の持つ多様な固有情報に対応した歪み補正システムを提案するものである。白地図の歪みの原因には、以下のものがあげられる。

i) 湿度変化による紙全体の伸縮による絶対尺度の信頼性の低下、および保存状態に起因する局所的な伸縮歪み。

ii) 白地図をドラムスキャナで取り込む際の、個々のスキャナの機械的特性および紙面への張力の偏りに起因する歪み。

iii) 保存状態の不良による皺、および破れの補修による歪み。

これらの何れの場合も、一般に非線形歪みを生じる。i), ii) の場合のラスティメージ (線情報について) は C_0 連続が保証される。一方、iii) の場合は、 C_0 不連続を生じ、本来連続であるはずの線分が切断

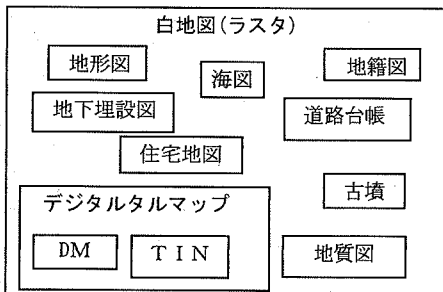
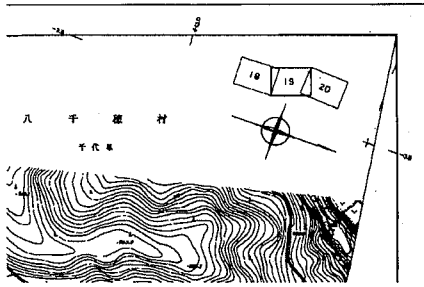
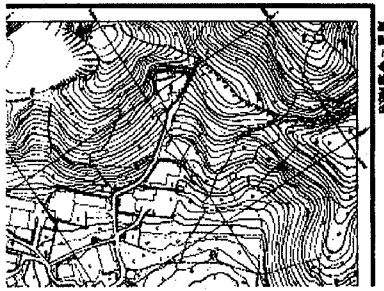


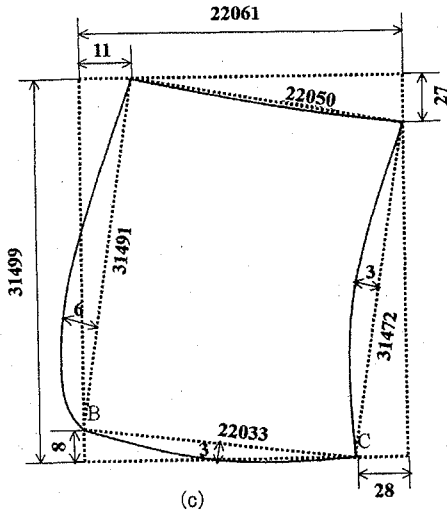
図-1 膨大な白地図資源



(a)



(b)



(c)

図-2 位置座標例と図形歪み (a) 十字マークの記入例, 1/2,500, (b) 正方向格子の記入例, 1/1,000, (c) (b)の歪みの概観 (単位:ピクセル)

されたり、折り重なりのため一部消失している場合が多い。本論文で取り扱う歪み補正は i), ii) を対象とする。

種々の媒体により提供される異なる座標系の地図

の幾何補正は、両者の幾何学的な関係を利用したシステム補正と、地図中に表記されている基準点を利用した座標変換法に大別される¹⁾。前者に対しては、座標系間の変換式を直接適用すればよく、一般にGISの汎用ソフトに装備されている。後者に対しては、ヘルムート変換、アフィン変換、双1次または高次多項式の未知のパラメタを最小自乗法によって推定する方法がよく用いられている^{2),3)}。その他、近年急速に普及しつつあるDigital Elevation Model (DEM)化のための空中写真の正射影変換に対しては、上述の最小自乗法のほかに、シンプルな論理演算法にニューラルネットワークを加えたもの、画像間の接続に対してファジー集合理論を適用したものなどがあり、GPSと空中レーザスキャナを組み合わせたシステムに採用され、都市景観やナビゲーションシステムの2.5次元図化に活用できるソフト⁴⁾が市場に登場している。また、山岳地帯などのDEM化に対して、地上からデジタルカメラで撮影した画像を中心投影する方法⁵⁾や、地上の数個の制御点(基準点)とカメラの焦点距離を活用した方法⁶⁾が提案されている。

スキャナで読み込んだ白地図の歪み補正を主題とする論文としては、本研究とは目的が異なるが、古地図と現在の地形図との幾何補正にDelaunayの三角形メッシュとアフィン変換を組み合わせたもの⁷⁾があり、それ以外には、著者等の知る限り存在しない。上述の文献2), 3)等のアプリケーションソフトでは、いずれも地図中の基準点(本文中では三角点およびGPS測点を指すものとする)、または、後述の十字マーク(緯経度線)の交点または、地図枠の4隅の点を手入力してアフィン変換や最小自乗法を適用したものであり、後述するように、白地図の持つ利用可能な情報を最大限に活用しているとは言えず、十分な精度を得られない。また、入力点を探索するインターフェースが親和性に欠けているため、入力作業に時間がかかり、また人為的な入力ミスが発生しやすい問題がある。

本研究で用いる地図の縮尺のほとんどは、1/1,000と1/2,500の白地図である。これらの地図には、枠上に緯・経度値が、また内部にいくつかの基準点が記入されている。しかしながら、三角点は、1/2,500の地図でも、数個記入されているだけであり、その位置座標の情報が地図に記載されていないため、利用上不便である。また、GPS測点は任意の位置で測定可能であるが、ユーザが常に利用できるとは限らない。そのためこれらの基準点の他に、例えば図-2(a)の例では、3枚の地図を連結するために、各地図の四隅近傍の緯経線を利用して、あらかじめ十字

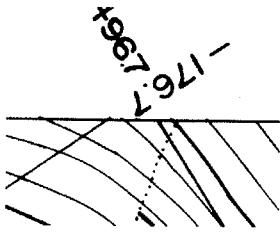


図-3 枠と緯(経)度線の交点

マークを記入したり、図-2(b)のように、地図に正交メッシュを記入、または枠内に数点十字マークを記入し、これに上述の手法を適用して地図間の連続性を確保し、歪み補正に役立っているのが現状である。

提案手法は、まず、個々の地図がもつ固有の座標値情報をもとに4種類に分類した情報入力インタフェースを提供する。ユーザは、処理対象に適合したインタフェースを選択後、システムの指示に従って機械的に入力操作をすることによって、必要最小限の座標情報を高精度かつ高効率で入力することができる。これにより、内職者等の地図に関する基礎知識を持たないユーザでも、作業に対する熟練度によらず、容易かつ正確に入力することができる。すなわち、個々の地図が持つ固有の入力可能な座標情報を、i) 地図枠の矩形形状、ii) 縮尺情報、iii) 地図枠線と緯経度線(平面直角座標系の地図では、緯経度値ではない値を用いる場合があるが、本論文では便宜上、すべて緯経度線と記述する)の交差、およびこれに附随した数値情報、iv) 緯経度線の直交性と等間隔性、v) 緯経度線と十字マーク方向との一致性、vi) 不規則に分布した基準点。これらを最大限活用するために、その特徴から2章で詳述する4つのケースに分類する。次に、ユーザフレンドリーなインタフェースによる、高精度かつ高効率の入力をおこない、この入力結果に基づいて、地図内部の歪み補正だけでなく、枠線分上のすべての点において絶対尺度を考慮したラスティメージを算出する。これにより補正精度を向上させ、隣接地図の枠上のラスティメージの連続性の確度を向上し、4方向の隣接地図を連続なラスティメージの接続を容易にする。このことは、長距離間の地域を対象とする道路設計には特に重要である。

以上に述べた機能を有する白地図の歪み補正システムは筆者等の知る限り存在しない。

次章では、提案手法の基本的な考え方とシステムの概要を示し、3章でユーザフレンドリーなインタラクティブインタフェースを提案し、4章においては特に、地図の緯経度線以外には内部に入力情報を

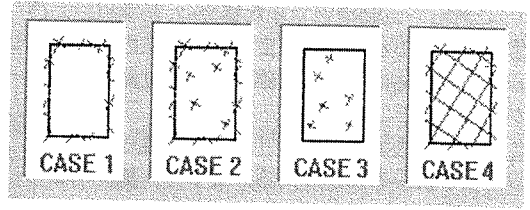


図-4 ケース選択ウインドウ

もたない場合の幾何補正法について詳述し、5章で提案手法の検証をおこない、6章で結論を述べる。

2. 基本的な考え方とシステムの概要

(1) 基本的な考え方

前章でも述べたように、歪み補正の立場から白地図を観察すると、個々の地図によって活用可能な入力情報は多種多様である。本提案システムの処理対象となる白地図の歪みの大きさは、図-2(c)に一例を示すように、一般にユーザの視察では感知できないほど小さい。

前章で述べた個々の地図の特徴の情報すべてを自動認識できれば、インタフェースは不要になり、理想的である。しかし、2値画像の自動認識の研究は、地図情報に関しても、1980年代初頭から90年代にかけて盛んにおこなわれたが実用化までには至らなかった^{9)~12)}。1990年代にはいって、コンピュータのインタフェース技術の進歩にともなって、インタラクティブな手法^{2), 3), 4), 7), 8)}が盛んに用いられるようになってきている。地図が持つ多種多様で複雑な形状のオブジェクト集合を完全に自動認識することは、今日のコンピュータの高速大容量化をもってしても困難であり、僅かに特定のオブジェクト(等高線、道路等)に対して、開発がおこなわれているに過ぎない^{9)~12)}。

本研究課題である地図の入力歪み補正に関しても、全自動認識をおこなうには、次のような困難な問題が存在する。すなわち、

- i) 地図枠周辺に記述された多様な形式の各種情報(地名、縮尺、地理記号等)があること、
- ii) 個々の地図によって、線幅の異なる1重ないし3重の枠が存在すること(図-2(b)参照)、
- iii) 地図枠線と緯(経)度線の交点の検出およびそれらの数値文字認識が複雑なこと(図-3)、
- iv) 地図内に存在する複雑なラスティメージ線画像と混在する基準点および十字マークとの判別が必要なこと、

v) これらが自動検出できた場合の、基準点および十字マーク（あるいは緯経度線）の交点のラスタイメージの細線化による、正確な交点の位置座標の検出が困難なこと。

これらを解決するアルゴリズムは複雑で、かつ計算コストの掛かる問題である。従って、提案手法では、

i) システムが、個々の地図がもつ固有の座標値情報に適応したインタフェースを提供し、

ii) ユーザは、処理対象に適合したインタフェースを選択し、

iii) システムの指示に従って機械的に入力操作をすることによって、ユーザのスキルに関係なく、必要最小限の座標情報を高精度かつ高効率で見落としなく正確に入力することができ、

iv) これに基づいた適切な補正計算法により、高精度な歪み補正を実現する。

(2) 入力地図の分類と問題点

個々の地図の入力可能な情報によって、インタフェースを4種類に分類することができる(図-4)。なお、case 3の場合を除いて、地図枠は与えられており、地図の縮尺率と尺度は地図枠の周辺に記載されている。

case 1: 有効な入力情報は、地図枠と交差する緯(経)度線およびその数値情報のみである。

case 2: case 1の情報に加えて、十字マークが存在する場合である。

case 3: 白地図が部分的に切り抜かれたものに、基準点あるいは十字マークが記入してあるものがこれに相当する。

case 4: すべての緯経度線が表示されており、格子を構成している。スキャナで読み込む前に、ユーザが歪み補正用に、白地図に記入したものがこれに相当する。この場合は、後の作業に支障をもたらさぬよう、この格子線を削除する問題が存在する。

ここで注目すべき点は、case 1, 2, 4において、4隅の点の座標が確定していない場合がある。例えば、緯度線・経度線の方向が地図枠線と平行もしくは垂直になっていない地図に多く見られる。図-2(a), (b)もその一例である。この場合は、枠と緯経度線との交点座標値も既知でないことである。また、case 3の基準点は、ランダムに点在しているため、適切なインタフェースなしに、ユーザがその位置を見つけるのは、手間を要するだけでなく、見落とし可能性も大きい。

提案手法では、次節および3章で詳述するように、これらの個々の地図がもつ特徴を活かした効率的か

つ高精度な入力手法を提案する。

(3) 入力手順の概要

入力インタフェースおよびそれに基づく幾何補正手順の概略は以下の通りである。

Step 1: ケースの選択

Step 2: if (case 1∨case 2∨case 4) スケールの入力;

Step 3: 地図枠の入力

Step 4: if (case 1∨case 2∨case 4) 枠と緯(経)度線の交点位置の入力

Step 5: if (case 2∨case 4) 内部の十字マーク(あるいは緯経度線)の交点の入力;

if (case 3) (基準点∨内部の十字マークの交点)の入力;

Step 6: 入力誤差分布の表示と入力データの修正

Step 7: 三角形メッシュの作成(例えば図-14, 図-15参照)

Step 8: 三角形メッシュ毎の線形内挿補間による幾何補正

Step 1 から Step 6 までの入力インタフェースの具体的な問題は、次章で述べる。Step 7 と Step 8 の幾何補正については、4章で詳述する。

3. インタラクティブなユーザインタフェース

(1) 人手入力の問題点とその対策

歪み補正に必要な情報を、インタラクティブに入力する際に生じる人為的なミス、または誤差の原因には、以下のことがあげられる。

i) 入力すべき点の見落としと重複入力: 座標入力点が多いこと、基準点が不規則分布していること、例えば図-5のように、入力点が種々の記号と輻輳している場合、見分けにくいこと。なお、図-5(b)は、図-5(a)のAの部分の拡大図である。

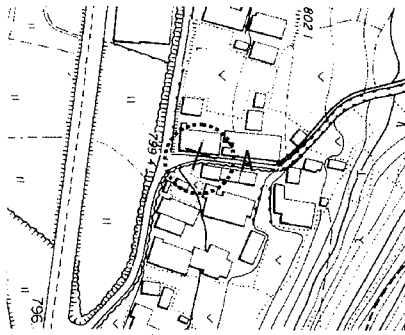
ii) 緯経度線の誤認: 等高線、道路等が緯(経)度線と重複または近傍で平行している場合(図-3参照)。

iii) 交点の入力誤差: 交線が鋭角の場合の錯視により生じる入力誤差(図-6)、入力点が地図の他の記号と重複している場合。

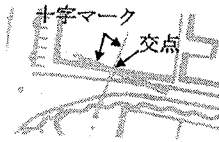
iv) 座標数値入力ミス: 基準点に対しては、ユーザがその都度数値座標を入力する必要がある。この場合の入力ミスの見過ごしは最終結果に致命的な誤差を与えること。

(2) 図形の特徴を活かしたインタフェース

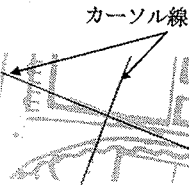
提案システムでは、これらの問題を回避するため



(a)



(b)



(c)

図-5 他の線分と重なる十字マーク

(a)分割表示された地図, (b)十字マーク近傍の拡大図, (c)カーソルの発生

に、以下の対策を講じる。

i) 入力すべき交点の見落としと重複入力: case 1, case 2, case 4 の場合、緯経度線の等間隔性と直交性、および縮尺情報を活用して、枠と緯(経)度線の交点の候補領域(case 4 の場合は内部格子交差点を含む)が拡大表示され、交点近傍に丸印を表示した(図-6)ウィンドウが開く。入力点をマウスでクリックすると、自動的に次の入力点の位置を含むウィンドウが順次開かれる。一方枠内の基準点および十字マークの探索は、枠の大きさから算出した適切な大きさに分割された地図が、順次自動的にウィンドウ上に表示される。入力点があれば、その点をクリックすると、その近傍を拡大表示したウィンドウが開く(図-5(b)参照)ので、再度入力点を正確にクリックする。なお、case 3 は、原則として枠が存在しないから、ユーザは、最初にマウスのドラッグによって、歪み補正が必要な領域を包含する矩形領域を選

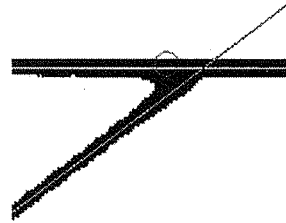


図-6 入力誤差を生じやすい交点

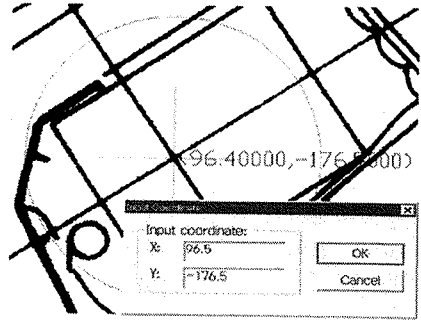


図-7 入力ダイアログウィンドウ

択する必要がある。

ii) 交点の入力誤差: 十字マーク(あるいは緯経度線)または枠と緯(経)度線の交点を入力する際、システムはそれぞれの線分と同一方向を持つクロスカーソルを表示する(図-5(c)参照)。クロスカーソルとは、マウスポインタを通り、地図枠および緯経度線の向きに合わせて自動生成する2つの交差する線分である。従って、ユーザはクロスカーソルをスクロールすることにより、錯視誤差の問題を回避すると共に、作業の迅速化を図ることができる。さらに、(3)で述べる入力修正機能を備えている。

iii) 座標数値入力ミス: case 3 の基準値座標点など、数値入力が必要な場合、ユーザは入力点近傍に表示される入力ダイアログウィンドウを用いて数値入力をおこなう。これにより画面に表示される入力値を再確認でき、また修正値の再入力を許容する(図-7)。

(3) ユーザインタフェースの詳細

2章(3)で述べた入力操作の一部について、その仕組みと有効性について詳述する。

a) ケースの選択

ユーザは、処理対象の地図から利用可能な入力情報を観察し、それに適合した補正法を図-4のメニューをクリックすることにより選択する。地図が枠と緯(経)度線との交点情報を持つことは大きな特徴で

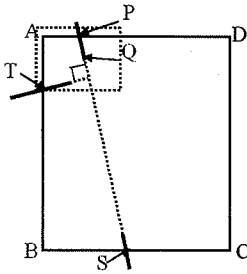


図-8 1組の直交する緯経線

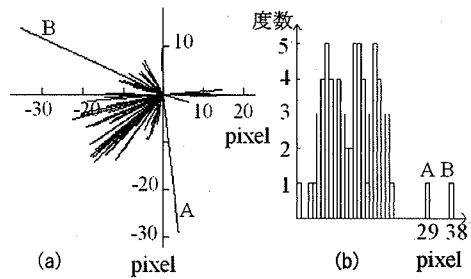


図-9 (a) 誤差ベクトル, (b) 度数分布

ある。

b) スケールおよび隣接する2つの緯(経)度線間距離の入力

通常 1/1,000 の地図では間隔が 100m, 1/2,500 の地図では間隔が 250m になっている。これらの情報は、Step 3 以降の自動検索領域表示の設定、および補正後の基準緯経度線メッシュの作成に活用することができる。

c) 地図枠の入力

case 1 では、4 章で述べるように、枠の 4 隅の点 A, B, C, D のすべてを歪み補正に用いる必要がある。その他の case 2 および case 4 では、メッシュ生成の領域を決めるためだけに用いるため、左上および右下隅の 2 点 A, C のみを入力すればよい。

なお、case 1, case 2, case 4 の場合は、Step 4 以降の緯経度線の基準方向を決めるため、以下の入力操作をおこなう。

i) Step 3 が終了すると、システムは左上隅の点近傍の領域を表示する(図-8 左上部の点線枠)。

ii) ユーザが上辺枠と交わる 1 つの経度線をマウスで指示すると、その近傍が拡大表示される。

iii) ユーザが経度線上の任意の点 P から点 Q(図-8)に向けて、マウスをドラッグすると、線分 PQ の延長線に対応する経度線と枠との交点 S の近傍が拡大表示される。

iv) 点 S を入力すると、システムは自動的に点 T の近傍を拡大表示するから、点 T を入力する。

v) システムは、点 T から線分 PQ に降ろした垂線の交点を基準点とする基準メッシュを作成すると共に、その 2 直線と同一方向を向くクロスカーソルを準備する。

(4) 入力誤差分布の表示と入力座標値の修正

Step 5 の終了後、case 2, case 4 の場合は、ユーザの要求によって、緯経度線の交点の入力データの位置と基準メッシュの交点との偏差を示すベクトル

ル分布(誤差分布と呼ぶ)、およびその頻度分布を表示することができる(図-9)。このベクトルは、処理対象地図の歪みを直接示すものではないが、これから歪みの大略傾向を知ることができる。また、誤差ベクトルが非常に大きいか、ベクトル方向が異なるものは、入力ミスの可能性が高い(図-9 A, B は、意図的に誤入力した)。この場合、ユーザがこれらのベクトルをクリックすると、さらにその近傍の拡大図が表示されるから、入力の修正を容易におこなうことができる。

4. 歪み補正法

(1) 歪み補正法の問題点と枠上の緯経度線交点の活用

1 章で述べたように、システム補正を除き、これまでに開発された白地図の幾何補正は、地図内に存在する既知の基準点座標値のみを利用しており、これらを基準点とし、ヘルマート変換、アフィン変換、射影変換または多項式の未知パラメタを最小自乗法によって推定するか、または上記の座標値を真値とし、これらの点を Delaunay 分割により三角形パッチを作成し、各パッチについて双 1 次内挿変換を適用している。

本論文で取り扱う case 3 の入力データはこれに相当する。case 2 および case 4 は、ユーザインタフェースを用いて、これに枠と緯(経)度線の交点情報を追加したものである。case 2 および case 4 において、システムは枠上の緯経度線の交点およびその方向を利用して、枠近傍のみの緯経度線の交点を求め、これらの点を基準点として活用する(図-14: 黒丸の点参照)。幾何補正計算法には、よく知られている Delaunay 分割と、線形補間法を活用する。

これに対して、case 1 の場合は枠上に緯経度線の

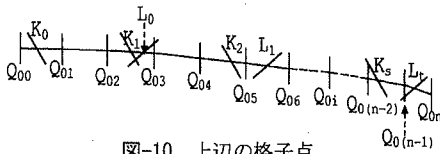


図-10 上辺の格子点

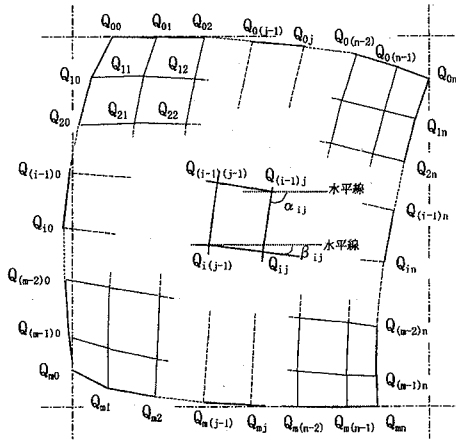


図-11 内部格子点

みが記入されており、内部に利用できる基準点がない。そのため、既存のソフトでは、地図枠の4隅の点の座標(図-8 A, B, C, D 参照)を用いるか、1章で述べた図-2(a)のように、4隅に近傍に十字マークを設定し、それらを用いた三角形パッチの生成後、アフィン変換をおこなっている。従って、枠の湾曲歪みおよび局所的な伸縮歪みを補正することができない。本論文で提案する case 1 は、4隅の点の座標値と、4枠と緯経度線の交点の座標値から、4枠線分の湾曲および伸縮による非線形歪みを検知し、これらの交点間を折れ線近似し(図-10)、上下の横枠対および左右の縦枠対それぞれの非線形歪みを独立に線形内挿近似する。これらの点を用いてこれにより、より高精度な枠上および内部の歪み補正計算を順次おこなない、既存の白地図の広範な有効利用を図るものである。以下、case 1 の歪み補正法について詳述する。

(2) 枠線分の湾曲および伸縮による非線形歪みの折れ線近似

図-10 において、 Q_{00} および Q_{0n} は上辺枠の両端点、 K_0, K_1, \dots, K_s は緯度線と上辺枠との交点、 L_0, L_1, \dots, L_r は経度線と上辺枠との交点とする。枠の湾曲は、各交点間を直線で結び直線近似する。線分 K_0K_1 を基準長 w とする。交点 K_0 から K_s までの各区間 ($Q_{00}K_0, K_0K_1, K_1K_2, \dots, K_sQ_{0n}$) の歪み率は、この基準値

と各 K_iK_{i+1} ($i=1, \dots, (s-1)$) の比によって求めることができる。枠の両端の線分、 $Q_{00}K_0$ および K_sQ_{0n} の伸縮歪み率はそれぞれ K_0K_1 および K_sK_{s-1} の歪み率に等しいと仮定する。この歪み率を考慮して、 Q_{00} から Q_{0n} まで間隔 d で等分割する ($Q_{00}, Q_{01}, Q_{02}, \dots, Q_{0(n-1)}, Q_{0n}$)。なお、 d はユーザが任意に決めることができる(デフォルト値は $w/3$)。

基準値 w を用いて、他の3枠についても伸縮歪みを求める。なお、自明のことながら、歪みのない場合の横枠上の緯(経)度線の間隔と縦枠上の経(緯)度線の間隔は、常に等しい。

(3) 格子点の座標の算出

(2) で求めた二つの対、すなわち上下の横枠および左右の縦枠、それぞれの非線形歪みを、以下の手順によって、上下方向と左右方向の歪みを独立に線形内挿近似し、内部格子点 Q_{ij} ($i=1, 2, \dots, (m-1), j=1, 2, \dots, (n-1)$) を求める(図-11)。すなわち、各辺の伸縮歪みについては、(2) に述べた d で等分割する過程で補正を可能にする。上辺と下辺、および左辺と右辺の各区間(幅 d) ごとの線分の傾斜を求めることにより、湾曲歪みの補正を可能にする。これらの情報を基に、内部のすべての格子線の傾きを計算する。得られた各区間の2つの線分の式から、順次内部の交点(格子点)を求める。

基準ベクトル $e(1, 0)$ に対する、隣接格子点間のベクトル $Q_{(i-1)j}Q_{ij}$ および $Q_{i(j-1)}Q_{ij}$ の時計回り方向角を、それぞれ、 $\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij})$ および $\Phi(Q_{i(j-1)}Q_{ij})$ とすると、

$$\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \cos^{-1}(e \cdot Q_{(i-1)j}Q_{ij} / (|Q_{(i-1)j}Q_{ij}|)) \quad (1a)$$

$$\Phi(Q_{i(j-1)}Q_{ij}) = \cos^{-1}(e \cdot Q_{i(j-1)}Q_{ij} / (|Q_{i(j-1)}Q_{ij}|)) \quad (1b)$$

が成立する。従って、線分 $Q_{(i-1)j}Q_{ij}$ および $\Phi(Q_{i(j-1)}Q_{ij})$ の基準ベクトルに対する正接 α_{ij} 、 β_{ij} は、それぞれ、

$$\alpha_{ij} = \tan(\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij})) \quad (2a)$$

$$\beta_{ij} = \tan(\Phi(Q_{i(j-1)}Q_{ij})) \quad (2b)$$

で表わされる。ここで、

$$\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \Phi(Q_{(i-1)0}Q_{i0}) + \Phi(Q_{(i-1)n}Q_{in}) - \Phi(Q_{(i-1)0}Q_{i0}) |Q_{(i-1)0}Q_{i0}| / |Q_{(i-1)0}Q_{i0}| \quad (3a)$$

$$\Phi(Q_{i(j-1)}Q_{ij}) = \Phi(Q_{0(j-1)}Q_{0j}) + \Phi(Q_{m(j-1)}Q_{mj}) - \Phi(Q_{0(j-1)}Q_{0j}) |Q_{0(j-1)}Q_{0j}| / |Q_{0(j-1)}Q_{0j}| \quad (3b)$$

また、 $Q_{(i-1)j}$ ($x_{(i-1)j}, y_{(i-1)j}$) を通る正接 α_{ij} の線分 $Q_{(i-1)j}Q_{ij}$ と、 $Q_{i(j-1)}$ ($x_{i(j-1)}, y_{i(j-1)}$) を通る正接 β_{ij} の線分 $Q_{i(j-1)}Q_{ij}$ は、それぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \alpha_{ij}(x - x_{(i-1)j}) + y_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) \neq \pi/2) \\ x &= x_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \pi/2) \end{aligned} \right\} (4a)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= \beta_{ij}(x - x_{(i-1)j}) + y_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) \neq \pi/2) \\ x &= x_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \pi/2) \end{aligned} \right\} (4b)$$

従って、この2直線の交点 $Q_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ は、次式で表わされる。なお、自明のことながら $\alpha_{ij} \neq \beta_{ij}$ は常に成立する。

$$\left. \begin{aligned} x_{ij} &= ((\alpha_{ij} \cdot x_{(i-1)j} - \beta_{ij} \cdot x_{(i-1)j}) + (y_{(i-1)j} - y_{(i-1)j})) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) \neq \pi/2) \\ x_{ij} &= x_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \pi/2) \\ x_{ij} &= x_{(i-1)j} & (\Phi(Q_{(i-1)j}Q_{ij}) = \pi/2) \\ y_{ij} &= \alpha_{ij}(x_{ij} - x_{(i-1)j}) + y_{(i-1)j} \end{aligned} \right\} (5)$$

従って、 Q_{00} を基点として、 Q_{11}, Q_{12}, \dots を順次求めることによって、全ての交点 $Q_{ij}(i=0, \dots, m-1, j=0, \dots, n-1)$ の座標値を求めることができる。これを歪みのない正規直交格子網に写像し、両者の格子網を三角形パッチに分割し、それぞれについて線形内挿することによって、歪み補正をおこなう。

5. 提案手法の検証

提案手法の正当性を検証するために、まず検証対象、検証方法について述べ、次に以下の2項目について論述する。i) クロスカーソルの使用効果と取得座標値の誤差、ii) 各ケースに対する補正画像の精度。

(1) 検証方法

a) 検討資料

地図のような複雑で多様な2値画像から構成されているラスターイメージの歪み補正の誤差検証法として、ここでは、図-2(b)および図-12に示す正方格子(枠内格子点数70)が記入されている地図を採用した。図化素図用紙はポリエステルフィルム、地図サイズ約0.9m×1.2m、縮尺1/1,000の地図を800dpiのドラムスキャナで読み込んだもので、図-2(c)に外枠の歪みの概容を示す。図中の数値単位はピクセルである。図に示すように、地図枠の湾曲歪みは大きくなく、最大6ピクセルである。これに対して、左右、上下枠の伸縮歪みは、それぞれ19ピクセルおよび17ピクセルである。使用地図における緯経度線および枠の線幅は0.2mm(約7ピクセル)、等高線の主曲線は0.1mm(約3.5ピクセル)、計曲線は0.2mm線

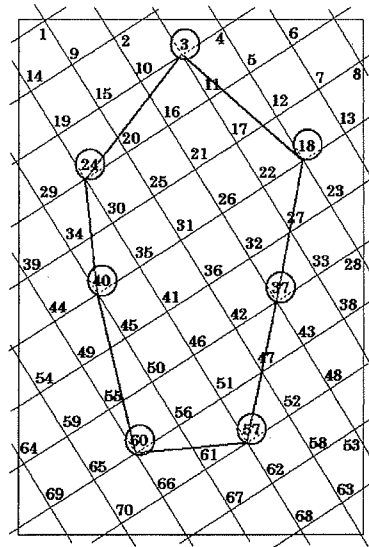


図-12 使用する地図の測定点および内部入力点

より少し大き目の線幅で描かれている。歪みの大きさは、これらの線幅の大きさと比較して、極めて大きいことを示している。

この資料は case 4 に相当する。case 4 を選択した理由は、以下の通りである。

- i) 格子点座標が既知であること。
- ii) 格子点が地図全体に均一に分布していること。
- iii) 格子点は十字マークを構成しているから、(2)で述べるように、入力誤差が小さいこと。
- iv) case 4 は、case 1, case 2, case 3 の情報をすべて包含しているから、各 case の誤差の検証に用いることができる。すなわち、図-12に示す No. 1 から No. 70 までの格子点座標値はすべて既知であるから、歪み補正後の画像における、補正対象領域内の格子点の座標を計測することによって、補正精度を検証できる。すなわち、歪みのない理想的な地図における、緯経度線の作るすべての格子点座標(真値)と、各ケースの補正画像のすべての格子点座標を計測することによって、歪み補正精度を検証することができる。

b) 入力データと歪み補正対象範囲

各ケースの入力手順は2章(3)に従う。各ケースの入力点および補正対象範囲は、以下の通りである。

- i) case 1 の入力座標は、図-12中の枠と緯(経)度線の交点(46点)、および図-8に示す4つのコーナ(点A, B, C, D)である。補正対象領域は枠内であり、検証

表-1 手入力誤差 (カーソルの有効性)

交点の種類	交差角 (度)	カーソル有無	RMSE (pixel)	最大誤差 (pixel)
十字マーク (a)	90	なし	0.639	0.851
十字マーク (a)	90	あり	0.398	0.839
十字マーク (b)	90	なし	1.022	1.557
十字マーク (b)	90	あり	0.791	0.980
枠と緯(経)線	58	なし	2.148	4.233
枠と緯(経)線	58	あり	0.650	1.504
枠と緯(経)線	32	なし	4.645	6.435
枠と緯(経)線	32	あり	0.425	0.872

表-2 各 case 別の誤差測定結果

case	測定場所	RMSE (pixel)	最大誤差 (pixel)	3.5 未満 (pixel)	7.0 未満 (pixel)
未補正	全体	9.0	25.7	2.9	37.1
1	全体	4.0	8.3	51.4	92.9
2	内部	3.1	5.8	53.6	100.0
2	外部	2.7	6.5	76.2	100.0
3	内部	3.2	6.3	53.6	91.7
3	外部	7.8	21.4	31.0	50.0
4	全体	0.7	1.5	100.0	100.0
5	内部	4.9	11.3	35.7	78.6
5	外部	6.3	18.2	23.8	66.7

対象の格子点数は 70 である。

ii) case 2 の入力座標点は、枠と緯経度線の交点 (46 点)、および図-12 の丸印 (7 点) である。補正対象領域および検証対象の格子点数は case 1 と同じである。

iii) case 3 の入力座標点は、図-12 の丸印 (7 点) のみである。すなわち、case 2 および case 5 と比較するために、これら 3 case の枠内の入力点は、すべて同じ点を用いる。以降、入力座標点を包含する凸包体内 (適用例では、図-12 中の 7 角形領域内) を内部、凸包体外を外部と呼ぶことにする。補正対象領域は、7 点の内部であり、検証対象の格子点数は 28 点である。

iv) case 4 の入力座標点は、枠と緯(経)度線の交点 (46 点)、および図-12 に示す、すべての格子点 (70 点) である。補正対象領域および検証対象の格子点数は case 1 と同じである。

v) case 5 は、既存ソフトでよく用いられる最小自乗誤差法を用いた場合

であり、提案手法の補正精度と比較検証するために、

加えたものである。入力座標点として、case 3 と同じく、図-12 の丸印 (7 点) を採用した。このケースのデータ入力では、図-7 に示すウインドウ上で、キーボードを用いて数値を入力した。補正対象領域および検証対象の格子点数は case 1 と同じである。

c) 検証方法

各ケースの歪み補正精度は、誤差度数分布図、および RMSE (二乗平均平方根誤差) と最大誤差を用いて考察する。これらの誤差の検討は、線幅 0.1mm および、線幅 0.2mm の線分の接続性を念頭においておこなう。すなわち、地図内部の座標精度と同時に、隣接する地図間の等高線および道路などの接続の可否が一つの目安となる。

(2) マウスによる取得座標誤差

表-1 に、マウスクリックによって取得する枠内部のすべての十字マーク (70 点)、および枠と緯(経)度線との交点 (46 点) について、カーソル使用の有無による入力誤差 (RMSE および最大誤差) を示す。表中の (a) は、十字マークと他の線分が重なっていない場合であり、(b) は、十字マークと他の線分が重なっている場合 (図-5 参照) である。

a) 入力誤差について

表-1 から明らかのように、十字マーク (交差角が約 90 度) では、カーソルの有無に関係なく入力誤差は小さく、最大誤差で 1.56 (ピクセル) である。これは十字マークの中心点に対する視認識が容易なことを示している。これに対して、枠と緯(経)度線との交点入力の場合、交差角が鋭角になるほど錯視誤差が大きくなることを示している。例えば図-6 に見られるような交点の場合、カーソルがない場合の最大誤差は 6.44 (ピクセル) であり、歪み補正の精度に大きな影響をおよぼす。

b) 入力作業効率

本適用例における入力作業時間は、入力点数 (116 点) の一番多い case 4 の場合、カーソル使用、不使用に対して、それぞれ約 10 分と 7 分であり、約 30% の作業効率の改善が得られた。

これらの実験結果から適切なカーソルの使用は、地図に対する知識をもたない作業者に対して、特に有効であり、マウスによる位置座標の取得誤差が実用的なレベルを満たしていることが確認できた。

(3) 補正画像精度の検証

表-2 にケース別の RMSE および最大誤差を示す。内部測定点数は 28、外部測定点数は 42 である。表中の全体とは、内部および外部を合わせた領域である。また、3.5 未満および 7.0 未満の欄には、それ

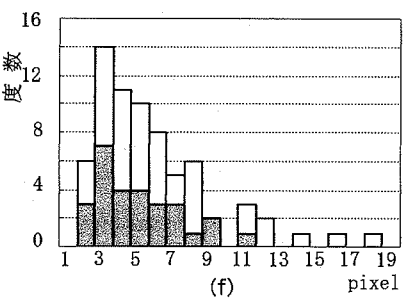
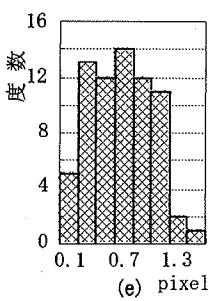
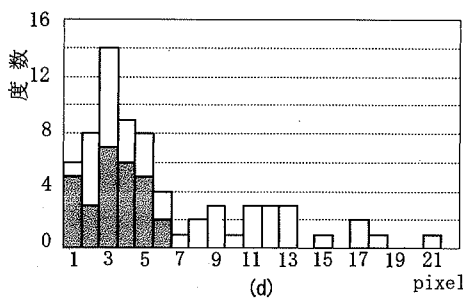
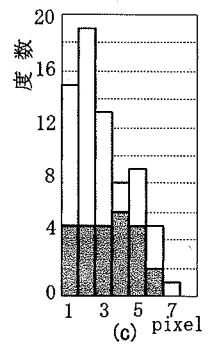
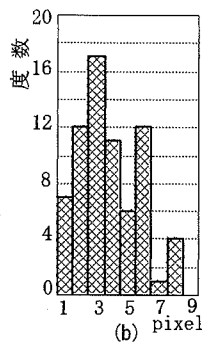
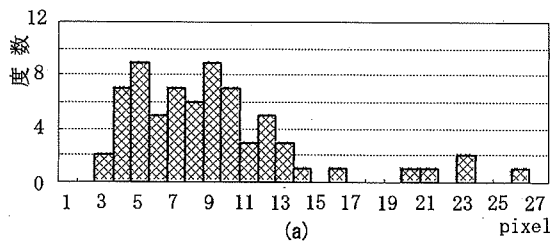


図-13 (a) 未補正, (b) case 1, (c) case 2, (d) case 3, (e) case 4, (f) case 5
 ☒: 全体, ☐: 内部, □: 外部

それぞれの誤差範囲内の測定点数を、その領域内の全測定点数で割った比率 (%) で示している。

a) 補正前の地図について

表-2 に示すように、補正前の地図の RMSE は 9.0 ピクセル、最大誤差は 25.7 ピクセルである。RMSE は 0.2mm の線幅を超えており、最大で、線分幅の 3 倍以上のずれがあることを示している。

b) case 4 について

理論的には、RMSE、最大誤差とも零になるべきであるが、図-13(e)、表-2 に示すようにマウスを用いた入力時の RMSE が約 0.7 ピクセル、最大誤差が 1.5 ピクセル発生している。これは手入力誤差によるものであり、表-1 のカーソルを使用した場合の誤差測定結果からも理解できる値である。なお、この誤差は他のケースにおいても常に考慮されるべき数値である。

c) case 1 について

利用できる情報は、枠と緯(経)度線の交点情報だけであり、これらの交点は、4章(1)で述べたように確定した座標値をもたない場合である。それにも拘わらず、図-13(b)および表-2 に示すように RMSE および最大誤差が case 3 内部より少し大きい程度であり、7 ピクセルを超えるものは約 7% である。なお、枠上の緯・経度線位置の精度は、入力誤差によるもの

のだけであり、表-1 中の枠と緯(経)線の場合に相当する。すなわち、その RMSE は 1.0 ピクセルを越えることはない。従って、隣接する地図と接続する場合のラスタイメージの連続性の確度を向上することができる。

d) case 2 について

case 1 と同様に、本法の特徴である枠上の緯(経度)の位置座標情報を活用して補正をおこなったものであり、図-13(c)および表-2 に示すように、case 4 を除く他のケースと比較して、内部、外部、いずれも誤差が小さく、高精度な補正ができる。すなわち、最大誤差は内部、外部共、すべて 7.0 ピクセル以内であり、内部は半数以上、外部は約 76% が 3.5 ピクセル線幅以内にある。なお、case 2 が高精度な理由は、枠上の情報 46 点を利用しており、4章(1)で述べたように枠近傍の交点(図-14 の黒丸)を算出し、これらの点および内部入力点(図-14 の白丸)を用いて、外部にも高密度の三角形メッシュを発生し、これに Delaunay 三角形分割を適用していることによる。なお、枠外の黒丸以外の三角形は、処理過程で発生した正方メッシュであり、歪み補正とは直接的な関係はない。

e) case 3 について

本ケースは、(1)b iii) で述べたように、入力点が

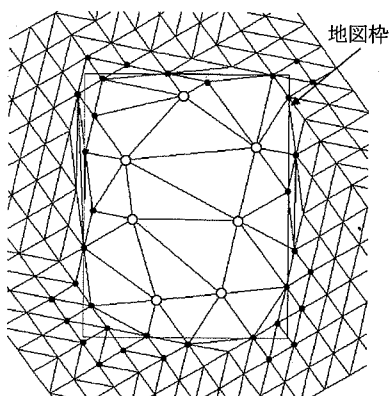


図-14 case2: 歪み補正のための三角形メッシュ

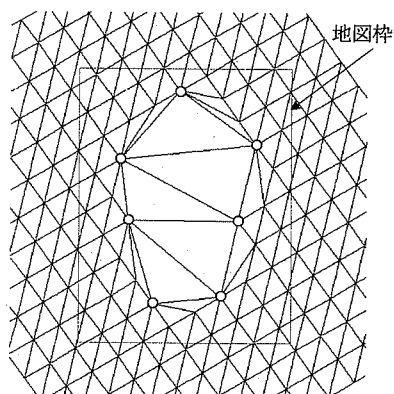


図-15 case3: 歪み補正のための三角形メッシュ

内部だけにある場合の局所的な補正を目的としたものである。図-15に示すように、内部に生成される三角形メッシュはcase 2の場合と同じである。従って、内部の精度はcase 2と理論的には同じ結果になるべきであるが、表-2に示すように、手入力誤差の範囲内の相異がみられる。なお、参考までに外部の誤差を表-2および図-13(d)に示す。当然の結果として外部の精度は最も悪い。なお、図-15に見られる凸包体の外部領域の三角形メッシュは、case 2でも述べたように、処理過程で発生した正方メッシュである。

f) case 5について

従来からよく使用されている最小自乗法(双一次)を用いたものである。入力データはcase 3と同一(丸印7点)であるが、表-2および図-13(f)に示すように、内部の誤差はcase 3の内部、およびcase 1全体と比較して大きい。このことは、補正領域が限定されている場合には、case 3を用いる方がよいこと

を示している。従って、case 5は、case 1、case 2のように枠上の情報を活用できない場合で、かつ入力座標点を包含する凸包体の外側、すなわちcase 3の外部の補正を必要とする場合に、有効な補正法といえる。

case 1からcase 5までの検証結果から、各ケースの入力可能な情報を活用して、歪み補正することの有効性を実証した。特に、地図枠と緯(経)線との交点を活用することが有効なことは、case 1およびcase 2で明らかである。case 3あるいはcase 5は、この枠上の情報を活用できない場合に有効であり、case 3は、補正領域が限定されている場合、入力点が少なくてよいという利点がある。

なお、使用マシンはwindowsNT、CPU動作周波数は約600MHzで、本適用例での補正時間は約15分である。

6. 結論

本歪み補正システムは、windowsNT上で、autoCADの拡張機能として作動する。本システムの特徴を要約すると以下の通りである。

i) システムが、ユーザに対して先ず個々の地図に記載されている座標情報に最適な4ケースの座標データの入力手段を提示すること。

ii) ユーザは、システムの指示に従って、順次拡大表示される入力座標点を、その都度提供されるクロスカーソルを用いて、入力座標点を見落とすことなく、容易に高速かつ正確に入力することができる。従って、ユーザは、機械的な単純作業をするだけでよい。

iii) システムは、入力データに基づいて最適な歪み補正を自動的に行い、補正結果を提示すること。

正方向格子をもつ地図を用いて、各ケースの補正結果の誤差分布を示し、その有効性を実証した。具体的には、枠上のみ緯経度線をもつcase 1の歪み補正法を提案し、実用可能な補正精度を得ることが出来た。内部にも座標情報をもつcase 2の場合は、極めて高精度な歪み補正を実現した。地図内部だけに座標情報をもつcase 3では、入力座標点を包含する凸包体内において、最小自乗法を用いたcase 5より高精度な補正が実現できることが確認できた。

この研究の課題のその他の活用法について以下に記す。現在、道路、林業、農産、ガス、水道、電気、通信等の分野において、各事業所で個々に地図を作成し利用している。これらの地図を本法を用いて、デジタル化するならば、分野間にまたがって、ばら

ばらに利用されている地図の統合化し、各分野間の効率的な運用が期待できる。

また、上記の地図を含め、地形、都市の形成過程、土地利用形態の変化（例えば 1/25,000 の地図は、都市部で 5 年に一度の更新がおこなわれている）および各分野の発展の相互関係など、時系列的な解析および考察等に寄与することが考えられる。

本提案システムは、これらの研究・開発の効率化、高精度化に役立つものとする。

参考文献

- 1) 中村英夫, 清水英範: 測量学, 技報堂出版, 2000.
- 2) AD Design: CADRaster.
- 3) National Science and Technology Center (NSTC): Erdas IMAGINE 8.3.
- 4) INCREMENT P, CAD CENTER, PASCO: MAP CUBE.
- 5) Jauregui, M., Vilchez, J. and Chacon, L.: A procedure for map updating using digital mono-plotting, *Computers & Geosciences*, Vol.28, No.4, pp.513-523, 2002.
- 6) Aschenwald, J., Leichter, K., Tasser, E. and Tappeiner, U.: Spatio-temporal landscape analysis in mountainous terrain by means of small format photography: a methodological approach, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.39, No.4, pp.885-893, 2001.
- 7) 清水英範, 布施孝志, 森地茂: 古地図の幾何補正に関する研究, *土木学会論文集*, No.625/IV-44, pp.89-98, 1999.
- 8) 山田博三, 山本和彦, 細川勝美, 中村: MAP (Multi-Angled Parallel) 演算法と MAP 整合法による地形図の特徴抽出と認識, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J74-D-2, No.6, pp.718-726, 1991.
- 9) Jiao, G.F., Nakamae, E., Tadamura, K. and Inuyama, H.: On the Extraction of Various Regions in Vector Maps, *MVA'94 IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pp.230-234, 1994.
- 10) Li, W., Nakamae, E. and Miyoshi, M.: Extracting Contour Lines Utilizing Features of a Raster Image Map, *JSCE*, IV-53, No.688, pp.135-144, 2001.
- 11) 水谷宣夫, 渡邊豊英, 吉田雄二, 岡部直木: ボロノイ線図による隣接関係を用いた等高線の抽出, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J74-D-II, No.11, pp.1499-1506, 1991.
- 12) 金 旭炫, 平井有三, 古川卓, 有田秀: 空間フィルタによる地図画像のからの道路セグメントの抽出, *電子情報通信学会論文誌*, vol. J76-D-II, No3, pp566-574, 1993.

(2002.12.25 受付)

GEOMETRIC CORRECTION OF TOPOGRAPHIC MAPS SCANNED BY AN IMAGE SCANNER

Takaharu MIYOSHI, Weiqing LI, Kazufumi KANEDA, Hideo YAMASHITA
and Eihachiro NAKAMAE

It is an important issue to utilize the resources of numerous traditional topographic maps by alternating to digital data. We propose an efficient and precise means of geometric correction for those topographic maps distorted due to not only elasticity of paper but also due peculiarity of each scanner. The paper consists of two items; i.e. an interactive inputting interface utilizing the coordinates information of each map, and for geometric correction appropriate algorithms responding to each ones. The preciseness of the input data and geometric correction were verified by employing frequency distribution diagrams, and the sufficient results for practical use were given.