I－5 既往の数値地図を活用した航空写真からの地理画像生成
－航空写真のオルソフォト／モザイク生成システム－

Geocoding of Aerial Photo Images with Existing Digital Maps
- An Economical System for Generating Orthogonal / Mosaic Imageries -

土居原 健　織田 和夫　魯 偉　内田 修
Takeshi Doihara　Kazuo Oda　Wei Lu　Osamu Uchida

【抄録】国土空間データ基盤の整備が進むなど、手軽に数値地図データの入手が可能となってきている。本論文では、これらの標高データや地図データを有効に利用して、簡易的に航空写真から正射投影写真（オルソフォト）を作成し、地理参照可能な地理画像を生成するシステム（オルソフォト / モザイク作成システム）を提案する。本システムは、単写真標定やバンドル法を用いて航空写真の外部標定要素を求め、数値地図データと組み合わせて簡易的にオルソフォトを生成する。更に作成したオルソフォト画像を簡単にモザイクすることもできる。本システムで生成した画像は地理情報システム（GIS）等に直接に取り込むことが可能である。本システムは、ステレオマッチングなどの画像処理により標高データを計測する必要がないので、低コストで大量にオルソフォト画像を生産することができる。

【Abstract】In this paper, we propose a system for economical generation of orthoimage, based on existing DEM data or digital map. The proposed system can also mosaic the orthogonal imagery smoothly to form panorama image. This system makes use of orientation and bundle adjustment technologies to calculate camera's parameters, then generates orthoimage with the parameters and existing DEM data. Since the output orthogonal imagery is geo-coded, they can be easily mosaiced together or directly attached to GIS system. Thanks to the promotion of economic DEM data by Geographical Survey Institute Japan, this system is applicable to mass production of economic orthoimages.

【キーワード】 GIS、航空写真、地理画像、オルソフォト、モザイク、標定、バンドル法

【Keywords】GIS, Aerial photography, Geocoded Image, Orthoimage, Mosaic, Orientation, Bundle Adjustment

1. はじめに

航空写真は航空測量によって地図データを作成する原データであり、地図にはない多くの情報を含んでる。このことから航空写真を地理参照可能にした画像（ここでは地理画像と呼ぶ）は、地理情報システム（GIS）の背景画像として有効である。一方、航空写真は中心投影であるため標高差により縮尺が変わってしまい、そのままでは地図と重ね合せることが難しい。このため写真を正射投影に変換したオルソフォトを作成する必要が生じる。

オルソフォトは地形起伏による歪みがなく、地図との重ね合わせが容易である。また、そのまま変型させずに貼り合わせることによりモザイク画像を作成することができる。しかし日本では欧米に比べオルソフォトの整備が遅れているのが現状である。

オルソフォトを作成する一つの方法は、地表からなるべく遠い場所から直下視の画像の撮影を行い、近似的に正射投影にするものが挙げられる。その一つに 1/2500 程度の大縮尺の地図との併用が可能な商用高分解能画像衛星の計画が進められている [1] が、いまだ実稼働しているものがない（99/5/28 現在）。

もう一つの方法は地形を計測した上で画像を正射投影に直すものである。最も一般的なのは航空写真をステレオ画像処理することにより地形を計測し、オルソフォトを生成する方法である（例えば [2])。また最近では

連絡先：アジア航測株式会社　土居原　健　〒243-0016 神奈川県厚木市田村町 8-10　朝日生命ビル 3F
Tel: 0462-95-1886 Fax: 0462-95-1934 Email: ta.doihara@ajiko.co.jp

レーザスキャナによって地形を計測し、航空写真やラインCCDセンサ画像と組み合わせてオルソフォトを作成する試みをが行われている [3]。いずれにしても地形を計測するという行程が必要であり、地理画像の生産コストを圧迫している。

本論文では、既往のデジタル地形データや地図データを有効利用して簡易的に航空写真の地理画像（オルソフォトやモザイク画像）を生成するシステムを提案する。最近は国土地理院の数値地図 50m メッシュの登場により、全国規模のデジタル地形データを安価に入手できるようになった。このようなデータからデジタル標高モデル（DEM; Digital Elevation Model）を生成し、更にDEMと航空写真の位置関係を求めれば、地形を計測することなしにオルソフォトやモザイク画像を作成することができる。

本論文では、まずオルソフォト生成の原理について述べる。特に航空写真の撮影位置と姿勢（航空写真の外部標定要素）の推定方法について詳しく述べる。次に実際に開発したオルソフォト／モザイク作成システムの概要と諸機能について述べる。最後に実際の処理例から、生成されたオルソフォトが地図との重ね合わせやモザイク生成に有効であることを示す。

2. オルソフォト作成の原理

2.1 オルソフォトの定義

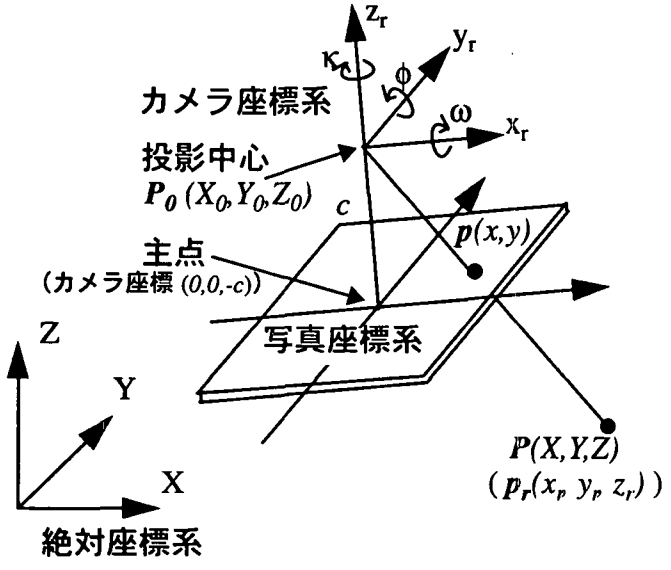


図２－１ 座標系の模式図

航空写真の投影中心の座標を$\boldsymbol{P}_0 = {}^t[X_0\ Y_0\ Z_0]$、カメラの地上座標に対する回転角を$\boldsymbol{T} = {}^t[\omega\ \phi\ \kappa]$、これらを合わせた外部標定要素を$\boldsymbol{E} = {}^t[{}^t\boldsymbol{T}\ {}^t\boldsymbol{P}_0]$とする（左肩の$t$は転置行列もしくは転置ベクトルを示す）。このとき、地上座標$\boldsymbol{P} = {}^t[X\ Y\ Z]$はカメラ座標系（投影中心に相対的な３次元座標系）$\boldsymbol{p}_r$で次のように表現される。

$$\boldsymbol{p}_r = {}^t[x_r\ y_r\ z_r] = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{T})(\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}_0) \qquad (2\text{-}1)$$

ここで、$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{T})$は、次の式で定義される回転行列である。

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{T}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}2)$$

また、$\boldsymbol{P}$が投影される写真座標（投影中心の像（主点）を原点とする2次元座標）$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{P},\boldsymbol{E}) = {}^t[x\ y]$は次の式で表わされる。

$$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{P},\boldsymbol{E}) = {}^t\left[-\frac{cx_r}{z_r}\ -\frac{cy_r}{z_r}\right] \qquad (2\text{-}3)$$

ここでcは航空写真の焦点距離である。式 (2-3) は、カメラの外部標定要素と地上点の３次元座標がわかれば、それに対応する写真座標がわかることを意味する。

更に地表面の高さZが地表の水平方向の２次元座標(X, Y)の関数として与えられている場合は、各水平座標(X, Y)に写真座標$\boldsymbol{p}(X, Y, \boldsymbol{E})$を対応させることができる。Zと$(X, Y)$の関係は、国土地理院発行の数値地図50mメッシュ（標高）等を用いてデジタル標高モデル（DEM）を生成し、任意の座標の標高値を内挿によりもとめることができる。写真画像を$I(x, y)$とすると、正射投影画像$I_{ortho}(X, Y, \boldsymbol{E})$は次の式で与えられる。

$$I_{ortho}(X, Y, \boldsymbol{E}) = I(\boldsymbol{p}(X, Y, \boldsymbol{E})) \qquad (2\text{-}4)$$

つまり、DEMと外部標定要素$\boldsymbol{E}$がわかれば、航空写真$I(x, y)$からオルソフォト$I_{ortho}(X, Y)$を生成することができる。

2.2 外部標定要素の算出方法

式 (2-4) より、オルソフォトを生成するには外部標定要素$\boldsymbol{E}$を算出する必要がある。今、航空写真I^i (i=1,..,m) の外部標定要素を$\boldsymbol{E}^i$とし、地上点$\boldsymbol{P}^j$ (j=1,..,n) のI^iの写真座標を$\boldsymbol{p}^{ij}$とする。今、$F(\boldsymbol{E}^i, \boldsymbol{P}^j, \boldsymbol{p}^{ij})$を、

$$F(\boldsymbol{E}^i, \boldsymbol{P}^j, \boldsymbol{p}^{ij}) = \left({}^t\left[-(cx_r)/z_r\ -(cy_r)/z_r\right]\right)^{ij} - \boldsymbol{p}^{ij} \qquad (2\text{-}5)$$

と定義すると、式(2-3)より次の方程式を得る。

$$F(\boldsymbol{E}^i, \boldsymbol{P}^j, \boldsymbol{p}^{ij}) = \boldsymbol{0} \qquad (2\text{-}6)$$

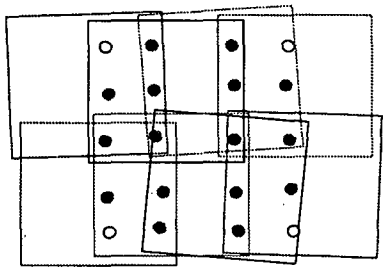
式(2-6)は2つの独立した方程式となる。この式に写真上で観測される座標 $\boldsymbol{p}^{ij}$ および3次元座標が既知の地上点（基準点）の座標 $\boldsymbol{P}^j$ を代入した連立方程式を解けば、外部標定要素 $\boldsymbol{E}^i$ および未知の地上点の座標 $\boldsymbol{P}^j$ を求めることができる。

2.2.1 単写真標定

今、1枚の写真内で、n個の基準点を観測したとする。このとき式(2-6)の未知数は外部標定要素（6変数）となり、2n 個の独立した方程式が得られる。ここで $n \geq 3$ ならば、外部標定要素を求めることができる。この方法は単写真標定と呼ばれている。式(2-6)は未知数に対し非線形であるが、未知数に適当な初期値を与え、非線形最小自乗法により解を求めることができる。この計算方法については、文献[4]に詳しい。

2.2.2 バンドル法

m枚の写真が与えられ、n個の基準点とN個の座標未知の地上点が航空写真で観測されたとする。このとき未知数の数は(6m+3N)となる。これらを同時に求める方法はバンドル法と呼ばれる。地上点が航空写真1枚でしか観測されないとすると、方程式の数は(2(n+N))となり、nが大きくないと解くことができない。つまり、各地上点をいくつかの写真で観測する(すなわち写真間の対応点を観測する)ことにより、基準点の数を減らすことができる。バンドル法は山岳部のように目標物が少なく、図面標定で多くの基準点を得ることができない場合に有効である。



○● ：観測点（○は基準点）

□ ：航空写真の範囲

図2－2 バンドル法における観測点の配置例

図2－2は、バンドル法を用いる場合の典型的な観測点（地上点）の配点を示す。一般に航空写真は撮影コース方向（飛行方向）に60%、各々の撮影コース間で30%のオーバラップを設けて撮影するので、各地上点は撮影コースの端を除いて3枚の写真上で(撮影コース間で共通の点は4～6枚)観測することができる。またコース内で隣り合う写真で最低6点の共通の観測点をとる。こうすれば基準点は全体で最低3点から解くことができる。

実際の標定計算方法については、文献[4]に詳しい。

2.2.3 バンドル法（地形が平坦な場合）

地形がほぼ平坦な場合は、すべての地上点のZ座標は一定(Z=0として一般性を失わない)と仮定できるので、バンドル法の未知数は(6m+2N)となる。この時は隣り合う写真で最低4点の観測点をとればよい(図2－3)。またZ一定の制限の元で式(2-1)および(2-3)を展開すると、地上の水平座標 (X, Y) と、それに対応する航空写真 I^i 写真座標 $(x, y)^i$ の関係は射影変換となることがわかる。このことを利用すれば、オルソフォトを作成することなしに直接航空写真のモザイクを作成することができる。

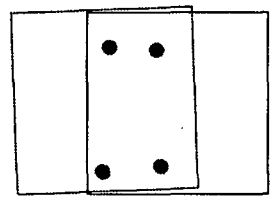


図2－3 観測点の配置例（地形が平坦な場合）

3. オルソフォト／モザイク作成システム

オルソフォト／モザイク作成システムは、デジタル地図データ（標高データ、ベクトル型地図データ、ラスター型地図データ（地図画像））を用いて航空写真からオルソフォトおよびモザイクを作成するシステムである。オルソフォト／モザイク作成システムの動作環境を表3－1に示す。

表3－1 動作環境

項目	内容
OS	Windows95/98
メモリ	128MByte以上
画面サイズ	XGA以上推奨
表示色	16bit High Color以上推奨
ハードディスク	作業用に1GByte以上

オルソフォト／モザイク作成システムは、デジタル航空写真と地図データの同時表示機能や、対応点取得・写真指標の自動計測機能を有し、グラフィカルユーザインターフェースを通じて簡便かつ高速な標定作業環境を実現している。また大容量になりやすいデジタル航空写真データを分割処理することにより大容量メモリを持たないパーソナルコンピュータ上でも処理できるように工夫されている。オルソフォト／モザイク作成システムにおけるオルソフォトおよびモザイク画像の作成フローを図３－１に示す。以下、作成フロー内の各項目について説明を加える。

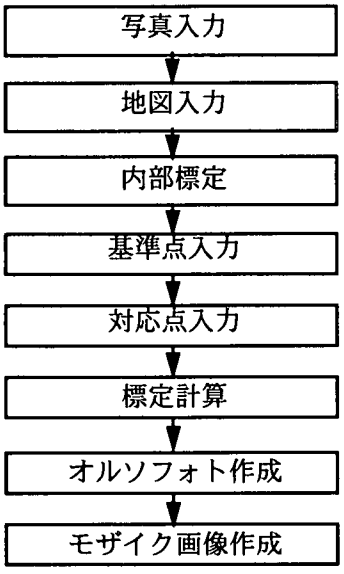


図３－１ オルソフォト / モザイク作成の概略フロー

(1) 写真入力

処理する写真画像ファイルを指定する。単写真標定を行う場合、指定する写真は１枚である。バンドル標定を行う場合は複数の撮影コースにわたり最大200 枚まで指定可能である。

(2) 地図入力

オルソフォト作成に必要な標高データ、および基準点座標の入力（図面標定）に必要な地図データを指定する。標高データには、国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ (標高) の他、標高付の等高線データやテキスト形式によるランダム点の３次元座標も読み込むことができる。標高データからは、TIN 内挿などによってデジタル標高モデル (DEM) を生成する。

(3) 内部標定

写真画像のピクセル座標を写真座標に変換するために、写真座標の原点である主点（写真画像内の投影中心の像）の座標を測定する。主点は、航空写真の４隅もしくは４辺上にある指標の中心である。主点の測定方法には次の２つがある。

• 主点の直接入力

印画した航空写真上で主点を求め、その位置を画像を画面上で直接指定する。厳密な方法ではないが、写真画像の A/D 変換（スキャナ読み取り）時に写真の指標がトリミングされて写真画像内に残っていない場合有効な方法である。

• 指標の測定

画像内で指標位置を測定することにより主点位置を求める（図３－２)。本システムでは、登録された写真の内１枚で１点だけ指標を測定すれば、残りのすべての指標をパターンマッチングにより自動的に測定する機能を備えている（マッチング手法については [5] を参照)。

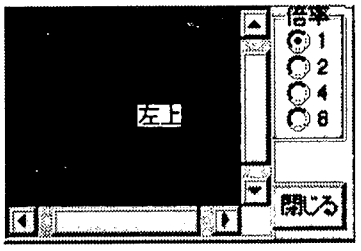


図３－２ 指標の測定

(4) 基準点入力 (図面標定)

登録されたベクトル型地図データもしくはラスター型地図データと航空写真との対応点を指定することにより、基準点座標を入力する。ベクトル地図データを用いる場合は、地図を写真画像上にオーバレイし、基準点となる地図内の位置と写真画像を対応させる(図３－３)。ラスター型地図データ（地図画像）の場合は、写真画像と地図画像を別々に表示し、対応点を指定する（図３－４)。なお、基準点の標高 (Z) は、標高データから発生したデジタル標高モデル (DEM) を用いて計算する。

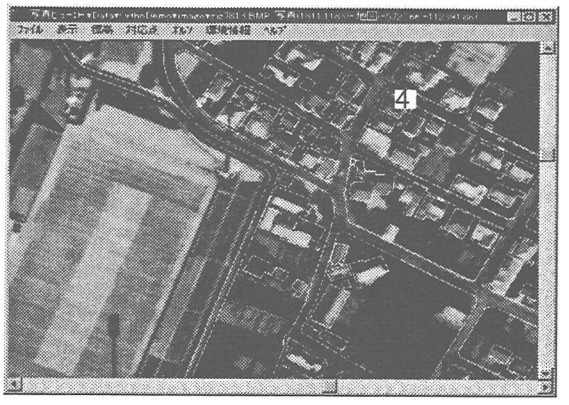


図３－３ ベクトル型地図オーバレイによる図面標定

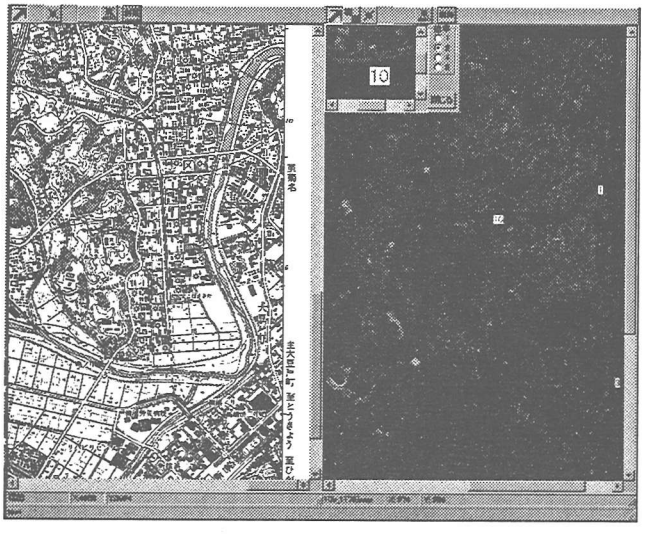


図３－４ ラスター型地図による図面標定

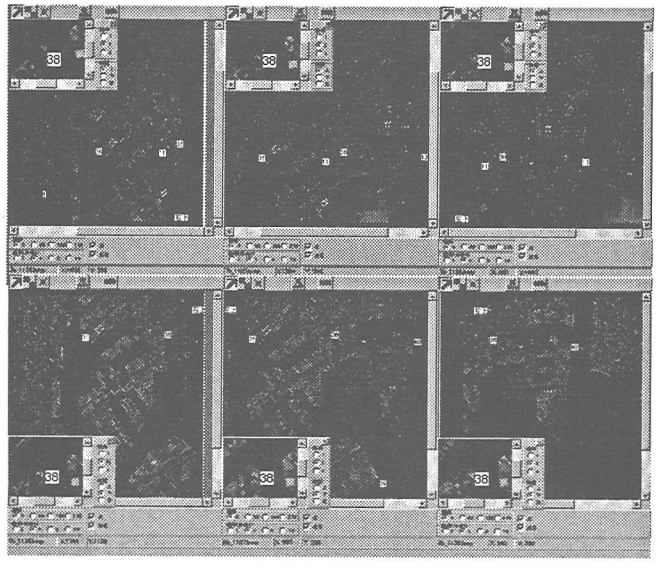


図３－５ 対応点入力画面

(5) 対応点入力

バンドル法を用いる場合は、写真画像間の対応点（パスポイント／タイポイント）を入力する必要がある。本システムでは最大６枚（２つの撮影コース毎各３枚）の画像を同時に画面に表示し、対応点を入力することができる（図３－５）。

ここでは入力を簡単にするために、各画像間で１点以上の対応点があれば、２点目以降の対応点については自動的に位置を推定するようにしている。また撮影コース内の画像のオーバラップが60%以上のときは、隣接する３画像に共通する対応点（パスポイント）を自動的に生成／測定することができる。

(6) 標定計算

単写真標定もしくはバンドル法により、写真画像の外部標定要素を計算する。

(7) オルソフォト作成

式(2-4)に基づき、各写真のオルソフォトを生成する。生成時に、出力する画像の範囲や出力解像度(m/画素）を指定する。

(8) モザイク画像作成

作成したオルソフォトの各画素は水平座標(X, Y)と１対１に対応することができるので、オルソフォトを更に接合して１枚の画像に貼り合せることができる。接合方法は、次の２つの方法から選択する（図３－６）。

• 中心優先

各々のオルソフォトの中心に近い部分を優先して貼り合わせる。

• 重み付平均

中心からの距離に応じて重み付けし、境界部付近のみ平均処理を行う。重み関数としては、境界部付近でなめらかに１から０に変化するものを使用する。これにより、境界部分を目立たなくすることができる（図３－７）。重み付平均は、標定精度や地形データの精度によっては画像にぼけが生じるが、山岳部など特に目立った地物がない場合や、低解像度(200DPI程度)の場合、また農地のように起伏が少ない地区の場合は特に有効に動作する。

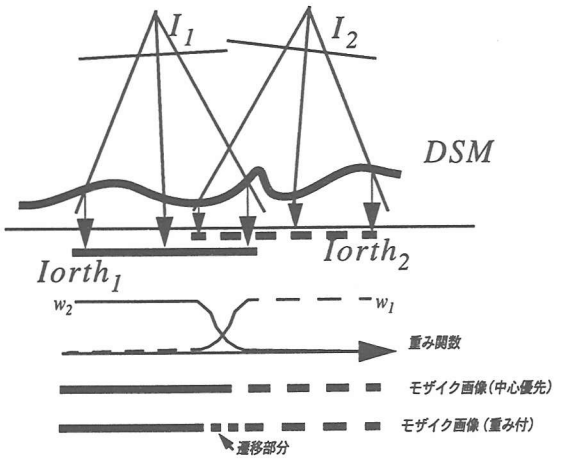
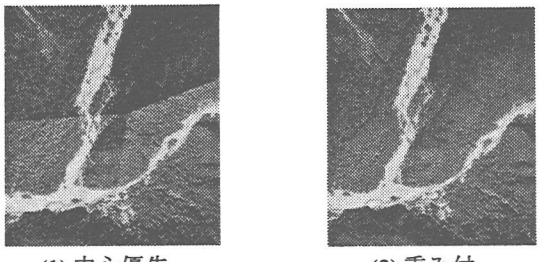


図３－６ 複数のオルソフォトの接合



(1) 中心優先　　(2) 重み付

図３－７ 重み付モザイクの効果

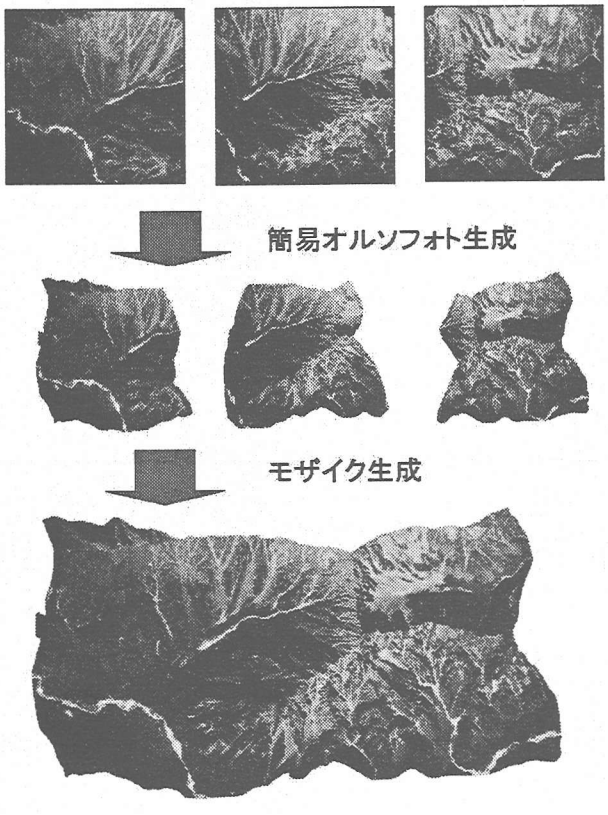


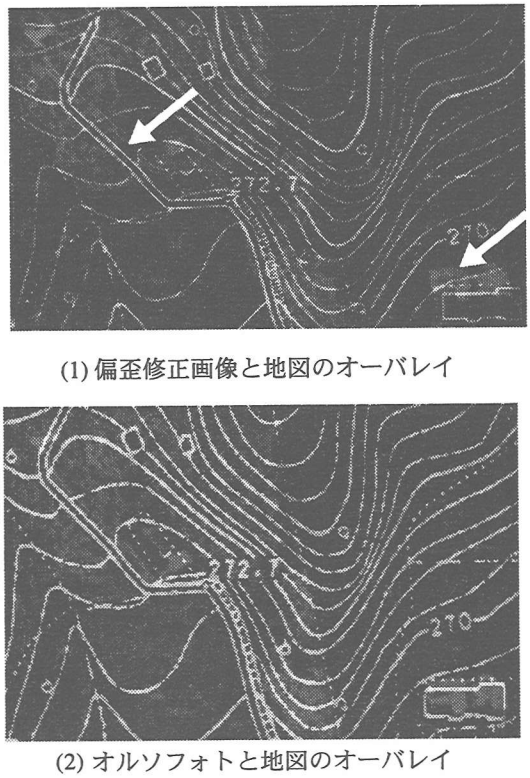
図３－８ オルソフォト／モザイク生成

4. オルソフォトおよびモザイク生成実験

4.1 オルソフォトとモザイク生成

開発したシステムが既往の標高データを用いて正しくオルソフォトが生成できるかどうかを、実際にオルソフォトやモザイクを生成することによって確認した。図３－８は、３枚の航空写真（撮影縮尺 1/20000, 読み取り解像度 200dpi）からオルソフォト作成およびモザイク作成を行った例である。標高データには国土地理院発行の数値地図 50m メッシュを用いた。また図面標定には国土地理院発行の数値地図 25000（地図画像）を用い、バンドル法により外部標定要素を計算した。図より、オルソフォト（中段）では航空写真が地形に応じて変型されているのがわかる。すなわち、谷部ではもともと縮尺が小さく撮影されるのでオルソフォトでは外側に伸びるように、反対に尾根部では内側に縮むように変型される。

図４－１は、地図と生成したオルソフォトのオーバレイの例である。比較のため、画像と地図の対応点を４点とって偏歪修正（射影変換）によって地図に合わせた画像と比較した。偏歪修正画像（図４－1(1)）では、一部道路や家屋に地図と重ならない部分があるが、オルソフォトでは改善されている（図４－1(2)）。



(1) 偏歪修正画像と地図のオーバレイ

(2) オルソフォトと地図のオーバレイ

図４－１ オルソフォトの生成効果：地図のオーバレイ

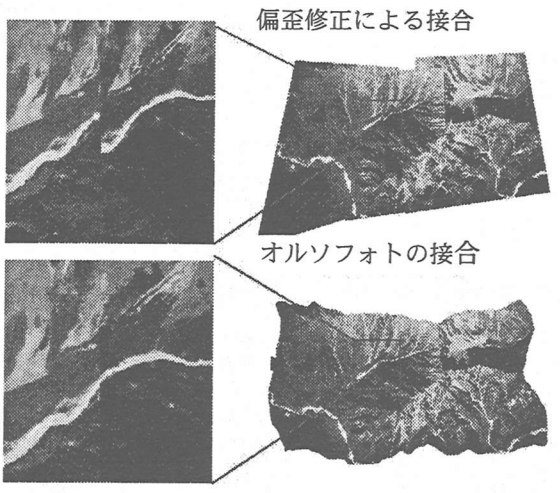


図４－２ オルソフォトの作成効果：モザイク

図4－2は本システムで生成したオルソフォトのモザイク画像の接合状況を示す。図からわかるように、オルソフォトでは偏歪修正で接合した例と比べ正しく接合されていることがわかる。図４－３は、上高地地区の航空写真２２枚を接合した例である。表４－１にその実験諸元をしめす。

4.2 平坦部のモザイク

2.2.3 で述べたように、比較的地形が平坦な場合はオルソフォトを生成することなしに偏歪修正にてモザイク画像を直接生成できる。図４－４は、１８枚の航空写真 (撮影縮尺 1/40000, 読み取り解像度 200dpi) を接合した例である。表４－２にその実験諸元をしめす。

表４－１ 実験諸元（上高地地区）

項目	諸元
接合枚数	22 枚
撮影縮尺	1/20000
読み取り解像度	200dpi
標定方法	バンドル法
接合方法	重み付モザイク
処理時間	7 時間（スキャン時間含まず）

表４－２ 実験諸元（横浜・川崎地区）

項目	諸元
接合枚数	18 枚
撮影縮尺	1/40000
読み取り解像度	200dpi
標定方法	バンドル法（平坦部として簡略化）
接合方法	中心優先モザイク
処理時間	5 時間（スキャン時間含まず）

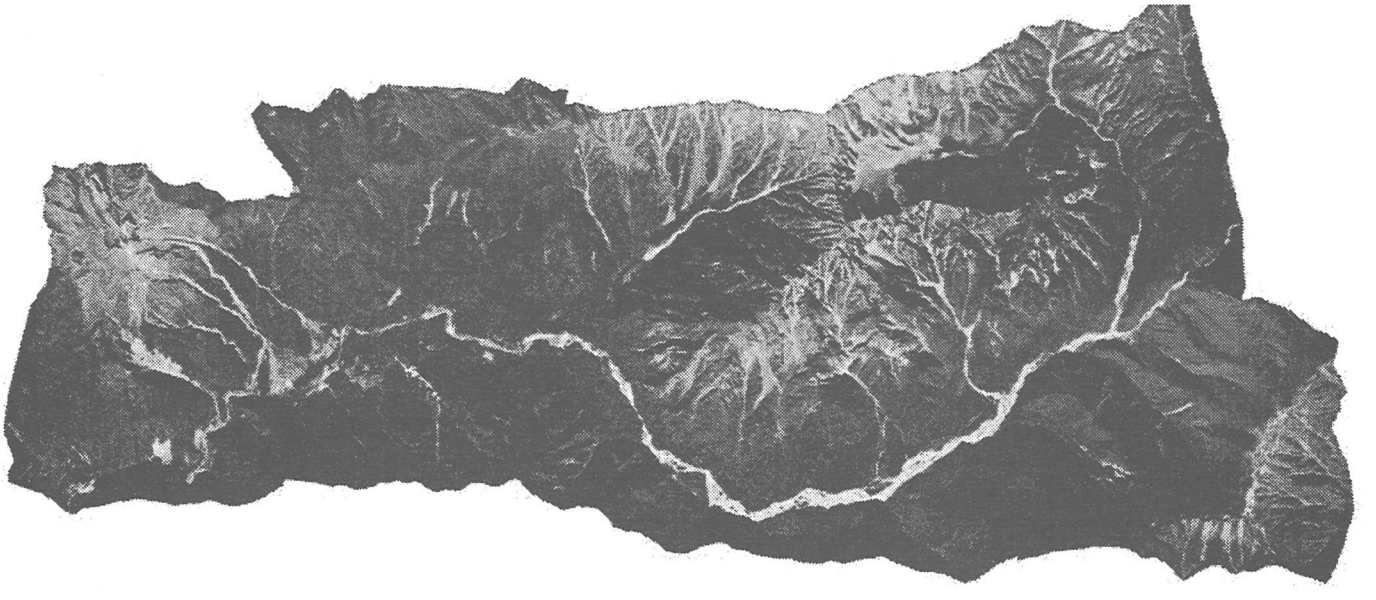


図４－３ 山岳地のモザイク画像（上高地地区、２２枚）

図４－４ 平坦部のモザイク（横浜・川崎地区、１８枚）

5. まとめ

本論文では既往の数値データを利用して簡易的に地理画像を生成するシステムを提案した。また、実際に航空写真画像を使った実験を行い、システムの有用性を確認した。本システムで生成された地理画像の品質は、利用する標高データの精度や解像度に左右されるが、山岳地域のモザイクや GIS における背景画像等には十分利用できる。

地理画像生成システムは既往の情報インフラストラクチャを有効に活用するよう設計した。地形データも含めたデジタル地図データは今後社会的に整備が進むと考えられ、本システムの有用性がますます高まるものと期待している。

6. 参考文献

[1] 岩下、松前、高解像度衛星への期待、写真測量とリモートセンシング、Vol35、No.4、pp40-44、1996.

[2] 内田、デジタル計測情報管理システム：機能と事例の紹介、APA No.69, pp.31-454, 1998.

[3] 長谷川、中川、政春、岩浪、レーザスキャナと CCD スキャナによる正射画像の作成、日本写真測量学会秋期学術講演会論文集、pp.51-54、1998.

[4] 日本写真測量学会、解析写真測量、1983.

[5] 織田、近藤、尾幡、土居原、LM 法による画像の自動モザイクの研究、写真測量とリモートセンシング、Vol37、No.3、pp42-51、1998.