

数値図化作業におけるデジタルステレオ図化機性能検証報告書

アジア航測株式会社

1. はじめに

デジタルステレオ図化機「図化名人 V2.0(以下図化名人)」について、公共測量作業規程上の性能を評価するとともに、デジタルステレオ図化機の特性に従い、内部の測定過程も含めた実質的な座標測定性能の検証を行った。本報告書でその検証結果を報告する。

2. 精度検証を実施する機器

精度検証を実施するデジタルステレオ図化機の概要を下の表に示す。

名称	図化名人 V2.0	
開発・販売元	アジア航測株式会社	
動作環境	PC	DOS/V 互換機
	OS	Microsoft WindowsXP または Microsoft Windows2000
	メモリ	1024MB 以上
	CPU	Pentium4 2.4GHz 以上
	ドライブ	CD-ROM ドライブ
	HDD	120GB 以上（作業用として常に空き容量を 40GB 以上確保すること）
	グラフィックカード	OpenGL 対応で、VRAM 128MB 以上を搭載し、3Pin ステレオシャッター端子（VESA 規格）を備えた専用グラフィックカード
	モニター	デュアルモニターが前提 ステレオ視モニター 20 インチ以上・SXGA（1280x1024）以上・リフレッシュレート 100Hz 以上 作業用モニターは下記仕様のもの サイズ：17 インチ以上の CRT、または液晶モニタ・SXGA（1280x1024）以上
	立体観測装置	液晶シャッターディスプレイタイプ、液晶シャッター・メガネタイプ
	オプション	専用 XY ハンドル、Z 盤（マウス使用インターフェース）
構成アプリケーション	プロジェクト管理アプリケーション（標定図作成等） 標定解析アプリケーション（内部標定・相互標定・バンドル標定・偏位修正画像作成） DEM 自動計測（ステレオ画像マッチングによる DSM 計算） 数値図化・編集アプリケーション（XYZ 座標取得、データ編集） オルソ画像作成アプリケーション（オルソ画像作成・正方 DEM 出力）	

なお、フィルムスキャナはシステムには含まれていない。空中写真測量の精度を確保できるスキャナを使用することを前提とする。

3. 公共測量作業規程上の性能と結果

公共測量作業規程において規定されている性能と、図化名人の性能を表1に示す。表に示すように、公共測量規程による性能を図化名人はすべて満たしていると判定できる。

表 1 検証すべき性能と検証結果

公共測量作業規程	規定の要求事項	要求性能	図化名人の性能
第 289 条 運用基準 1	数値図化機の基本性能	XYZ 座標値と所定コードの入力・記録	DGN ファイル形式によって、座標とコードを記録可能。また、線状対象物の連続測定・連続記録（オペレータの指定時・一定距離間隔・一定角度変化時）が可能。
第 289 条 運用基準 2	数値図化機の読取精度	標準偏差 0.01mm 以内	3次元測定結果より、標準偏差 0.01mm 以下で測定できることが結論できる。「4. デジタルステレオ図化機の実質精度について」を参照。
	数値図化機の読取分解能	0.005mm 以内	数値図化・編集アプリケーションは、画素サイズの 1/100 まで読取可能(0.01mm/画素のとき、0.0001mm)
第 289 条 運用基準 3	数値写真の画素の大きさ	0.01mm 以下、ロスレス圧縮画像	要求性能を満たすフィルムスキャナを使用することを前提とする*。 航空写真フィルムと同等の画像を解像度 0.01mm/ロスレス圧縮（BMP もしくは TIFF 形式）で取り扱い可能。
第 290 条	座標値の単位	cm 以下	DGN ファイルで mm 単位に記録可能。

*デジタルステレオ図化機の場合、フィルムスキャナの読取位置精度がもっとも計測精度に影響する。航空写真測専用の位置補正機能つきのスキャナを用いないと 0.01mm を超えるのひずみが生じてしまうからである。また、航空写真測専用スキャナを用いる場合も、スキャナのキャリブレーションを定期的に行い、画像に歪が生じないように維持することが必要である。

4. デジタルステレオ図化機の実質精度について

4.1. 実質精度検証概要

デジタルステレオ図化機の場合は、単に画像上の座標の読取精度だけでなく、3次元座標算出のまでの過程を含めアルゴリズム的に正しく動作しているかどうかを含めた実質的な精度検証する必要がある。そこで、デジタルステレオ図化機「図化名人」について、次の2つについて検証を行った。

- ・ 偏位修正画像作成精度
- ・ 3次元数値図化精度検証

4.2. 検証方法

(1) 偏位修正画像生成精度

検証対象となっている図化名人は、データハンドリングや立体視の利便性のために、偏位修正画像を作成するタイプである。偏位修正画像は、撮影方向をモデル座標のZ軸に一致するように修正した画像であり、レンズ歪等を取り除いた後、画像に射影変換を施すことによって得られる(図1)。数値図化はこの偏位修正画像を用いて行われるので、偏位修正画像作成時に座標的な誤差が生じないことが重要である。偏位修正画像作成精度は、そのまま数値図化時の画像座標計測精度に直結するからである。

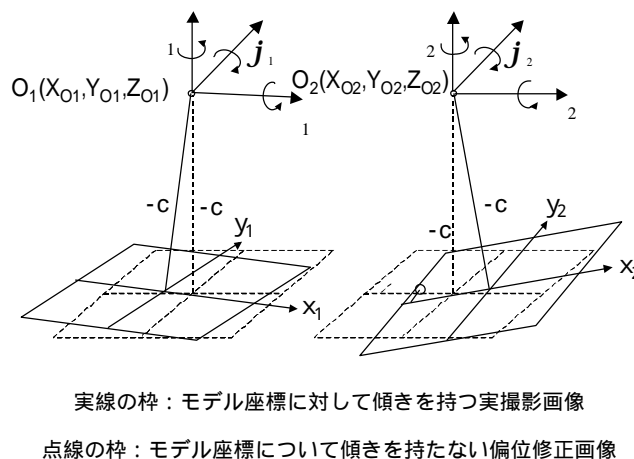


図1 撮影画像と偏位修正画像の関係

偏位修正画像の生成精度を検証は次のステップで行う。

仮想的な検証点を含むテストフィールドからシミュレーション画像を作成する。

偏位修正画像と同じカメラ幾何学で生成した際の検証点の画像座標(正解座標)を別途計算しておく。

偏位修正画像上の検証点の座標と正解座標を比較する。

(2) 数値図化精度

実際に数値図化を行うインターフェースにおいて、座標が既知の点が正しく測定できているかどうかを検証する。これは、ステレオ画像内にある座標が既知の点(検証点)の座標を測定することによって検証できる。

4.3. シミュレーション画像作成方法

(1) 生成アルゴリズム

シミュレーション画像は、仮想的に作成したテストフィールドを撮影した画像を与えられたカメラの光学系のパラメータで合成することによって得られる。今、仮想テストフィールドの3次元座標点 $P(X, Y, Z)$ を、投影中心座標 (X_0, Y_0, Z_0) 、地上座標系に対する回転行列 a_{ij} 、焦点距離 c のカメラから撮影したとすると、点 P が写る写真座標 (x, y) は次の式で与えられる。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{21}(Y - Y_0) + a_{31}(Z - Z_0)}{a_{13}(X - X_0) + a_{23}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y = -c \frac{a_{12}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{32}(Z - Z_0)}{a_{13}(X - X_0) + a_{23}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

さらに、レンズ歪や主点位置ずれによる誤差 $(\Delta x, \Delta y)$ を加えた指標座標 (x', y') は、

$$x' = x + \Delta x$$
$$y' = y + \Delta y$$

である。ここでは、村井らの提案する誤差モデルを採用している²⁾。機械座標に当たる画像座標 (x'', y'') は、スキャン時の解像度等によって決まるヘルマート変換係数 h_i を使って、次の式で与えられる。

$$x'' = h_1 x - h_2 y + h_3$$
$$y'' = h_2 x + h_1 y + h_4$$

ステレオカメラにカメラのパラメータや誤差モデルパラメータを与えれば、以上の手順によりテストフィールドのシミュレーション画像を生成することができる。

なお、シミュレーション画像を作成する際、写真座標は画像座標に量子化される。この時、最大 0.5 画素の座標量子化誤差が生じる。

(2) 仮想テストフィールドの設計

仮想テストフィールドは、3次元座標が既知の検証点を配置した仮想的な3次元空間である。仮想テストフィールドは、次の点に留意して設計する必要がある。

1 画素精度で座標を読むことができるようにする。このため、検証点を幅 1 画素の十字形で表現する。各点の違いが容易に識別できるようにする。このため、各点の横に ID 番号を表示するとともに、点表示のために数種類の色を用意し、観測時に見間違わないようにする。

画像内に均等に散らばるようにする。このため、点がメッシュ状に散らばるように配置する。

各点の奥行き方向座標が適当に分散するようにする。このため、メッシュ位置ごとに異なる高さの点を配置しするとともに、それぞれの検証点の近辺に更に別の高さの検証点を設ける。これによって、大域的な高さ分布および狭い領域における高さ分布の両方で検証できるようにする。

上記のような仮想テストフィールドから生成したシミュレーション画像の例を図 2 に示す。

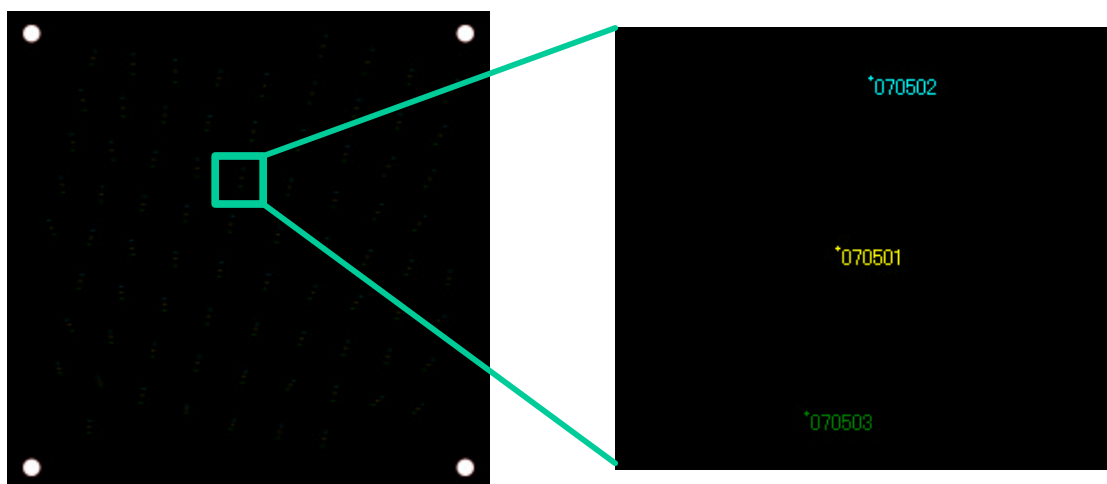


図 2 テスト画像の生成例

4.4. 精度検証結果

(1) シミュレーションデータ諸元

デジタルステレオ図化機「図化名人」について実際に精度検証を行った。シミュレーション画像の撮影諸元を表 2 に示す。カメラ諸元は、空中三角測量済みの空中写真画像の外部標定要素をそのまま使用した。

なお、検証点については、あらかじめ 3 次元座標と画像上の座標を別に記録しておき、精度検証のための正解データとした。

表 2 シミュレーションデータ諸元

撮影縮尺	1/10000	
スキャン解像度	10 μ m	
地上解像度	0.1m	
検証点	左右写真各 300 点 (モデル内 159 点)	
焦点距離	153.13mm	
カメラ諸元 (左)	X,Y,Z	-1998.88, 75605.50, 1624.61
	ω, ϕ, κ	-0.029304, -0.008179, 0.015679
カメラ諸元 (右)	X,Y,Z	-1163.86, 75617.73, 1630.97
	ω, ϕ, κ	0.011174, -0.002228, 0.031452

4.5. テスト結果

(1) 偏位修正画像作成精度

図化名人で作成された偏位修正画像上の検証点座標と、偏位修正画像と同じ条件で撮影した場合の偏位修正シミュレーション画像の幾何学で実際に写るべき座標(正解座標)と比較した。189点の座標を測定した結果、X方向残差の標準偏差は0.31画素、Y方向残差の標準偏差は0.29画素、水平残差の標準偏差は0.43画素となった。元のシミュレーション画像に最大-0.5~0.5画素の量子化誤差が均等に生じることを考慮すると、量子化による残差は、次の式で予想される。

- ・ XおよびY方向の残差の標準偏差：0.29画素

$$\sqrt{\int_{-0.5}^{0.5} x^2 dx} \cong 0.29$$

- ・ 水平方向の残差の標準偏差：0.41画素

$$\sqrt{\int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} (x^2 + y^2) dx dy} \cong 0.41$$

得られた残差の標準偏差はこの予想値にほぼ一致しており、偏位修正画像作成によって特別な残差は生じていないと判定できる。

表 3 偏位修正画像作成精度(検証点 189点)

X方向残差(画素)		Y方向残差(画素)		水平残差(画素)	
標準偏差	最大	標準偏差	最大	標準偏差	最大
0.31	0.66	0.29	0.70	0.43	0.72

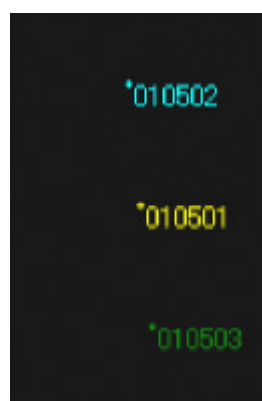


図 3 偏位修正画像上の検証点

(2) 数値図化精度

シミュレーション画像上の検証点を図化名人数値図化・編集アプリケーションの3次元座標測定インターフェースで測定し、検証点の正解座標と比較した。なお、シミュレーション画像は偏位修正の影響を含まぬよう、偏位修正をおこなわず直接偏位修正画像の幾何学条件を用いて生成した。

検証点 159 点を測定した結果、水平残差の標準偏差は 0.048m となった。撮影縮尺より画像の解像度が 0.1 m であるので、これを画素に換算すると約 0.48 画素となる。水平解像度それぞれとして換算したさらにシミュレーション画像作成時に最大半画素分 (0.05m) の座標の量子化誤差が生じること、および観測時に観測誤差が生じることとを考慮すると、水平残差は 1 画素以内、つまりフィルム面上で 0.01mm 以内と判定できる。

また、垂直残差の標準偏差は最大 0.067m となった。基線長：撮影高度が約 1:1.8 であるので視差 1 画素に対し約 0.18m となるので、垂直残差を画素換算すると 0.37 画素となる。つまり鉛直方向も 1 画素相当解像度以内、つまりフィルム面上で 0.01mm 以内に収まっていると判定できる。

表 4 数値図化精度 (検証点 159 点)

(1) 地上座標換算精度

X 方向残差 (m)		Y 方向残差 (m)		水平残差 (m)		Z 方向残差 (m)	
標準偏差	最大	標準偏差	最大	標準偏差	最大	標準偏差	最大
0.026	0.068	0.040	0.110	0.048	0.115	0.067	0.161

(2) 画素換算精度

(水平 0.1m/画素、鉛直 0.18m/画素として換算)

X 方向残差 (pixel)		Y 方向残差 (pixel)		水平残差 (pixel)		Z 方向残差 (pixel)	
標準偏差	最大	標準偏差	最大	標準偏差	最大	標準偏差	最大
0.26	0.68	0.40	1.10	0.48	1.15	0.37	0.89

(3) 偏位修正と数値図化の精度をあわせた座標観測精度

以上より、偏位修正と数値図化によるフィルム面上の座標観測の標準偏差は、それぞれ 0.43 画素と 0.48 画素となる。実際に計測するときこれらの誤差が線形に加えられ、それぞれの誤差が独立とすれば、両者をあわせた観測誤差の分散は、それぞれの分散の和と考えられる。すなわち、両者をあわせた標準偏差は、

$$\sqrt{0.43*0.43+0.48*0.48} = 0.64$$

つまり、0.64 画素相当の標準偏差となり、やはり 1 画素相当解像度以内、つまりフィルム面上で 0.01mm 以内と判定できる。実際には、これにはシミュレーション画像作成時の座標量子化誤差も含まれているので、実際の標準偏差はさらに小さくなると考えられる。