



デジタルエリアセンサー画像による自動ブロック調整の精度検証

橘 菊生* 笹川 正*

1. はじめに

航空機搭載のデジタルセンサーが商用化されて既に数年を経て、国内でも数種のラインセンサー、エリアセンサーが稼働している状態である。デジタルセンサーの特徴は一貫したデジタル処理と、これによる自動化処理を可能としている点である。従来の空中三角測量ではマニュアルで選点、観測されたパスポイント、タイポイントが画像相関等を用いたマッチング処理により自動的に生成される。この際、直接定位システムによる外部標定要素を各写真画像の近似値として与えることにより、高速化、高精度化が図れる事が予想される。株式会社パスコでは、直接定位システムの精度検証¹⁾をはじめ、航空カメラのスキヤニング画像と直接定位システムによる外部標定要素を近似値として用いた自動空中三角

測量および、直接定位システムによる外部標定要素を観測値として同時に調整する同時調整法による精度検証等²⁾³⁾を実施し、小縮尺図化作業における直接定位の有効性や大縮尺図化作業における同時調整法の有効性を確認してきた。本文では昨年度より導入した複合型デジタルエリアセンサーULTRACAMD（以下UCDと記述する。）によって取得、作成された大縮尺エリア画像のブロックにおける、自動タイポイント生成および同時調整の精度について報告する。

2. 複合型デジタルエリアセンサーUCD

UCDは中央部に直線配置された4本のレンズにより高解像度パンクロマティック画像を分割取得し、この画像から1枚の高解像度複合画像を作成する、複合型のエリアセンサー

表. 1 UCDの諸元

	VEXCEL ULTRACAM _D
センサー形式	複合型エリアセンサー
画角	55度（飛行直角方向）37度（飛行方向）
画素数 パンクロ R,G,B,NIR	4,008 × 2,672（9枚使用、複合前） 11,500 × 7,500（複合画像） 4,008 × 2,672
焦点距離 パンクロ R,G,B,NIR	101.4mm 28mm
ピクセルサイズ	9 μm
撮影間隔	1sec
色深度	12bit(CCD)14bit(ADコンバータ)16bit(出力)
FMC	TDI制御
データ容量	1Tb
最大記録可能画像数	2,700枚(ノーマルモード) 1,850枚(非圧縮)



図.1 機体に搭載されたUCD

* 株式会社パスコ

である。表. 1 にUCDの諸元を示す。

個々のレンズにはそれぞれ1枚、4枚、2枚、2枚、計9枚のCCDエリアセンサーが組み合わされている。これらのレンズは飛行速度に基づく微妙な時間差を持って連続的に露出される。この位置同期で撮影を行う手法をシントピック（同地）法と呼んでいる。図. 2 にUCDのレンズ構成を、図. 3 にシントピック撮影の概念、図. 4 にそれぞれのレンズで取得される画像例を示す。

個々の画像自体はまったく同じ中心投影画像であり、ほぼ同じ位置から撮影された画像となるため、複合画像を作成する際に幾何的

な矛盾を持たないことが特徴である。

UCDでは従来の航空カメラのFMC装置に相当する前進ぶれの補正を、TDI（Time Delayed Integration）制御で行う。TDI制御は、物理的なセンサーの移動ではなく、画像データの書き出し方の制御である。シャッター開放時間中に機体が地上解像度分進行するのに合わせて、CCDセンサー上の各ライン（飛行直角方向）のデータを1ライン後方へシフトさせる。この処理をシャッターが閉じるまで繰り返し、最終的に1枚の画像としてデータを書き出す。これにより、前進ぶれの影響を軽減することが可能となる。

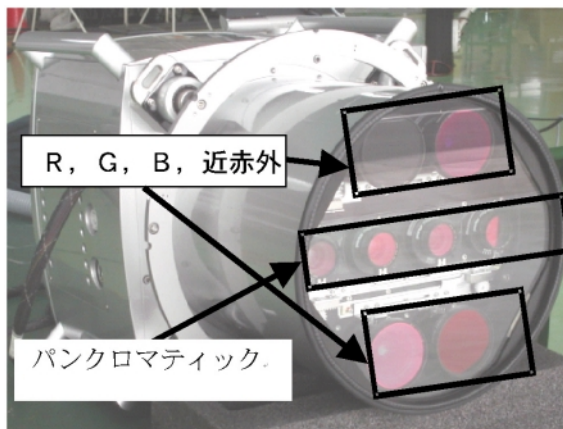


図. 2 UCDのレンズ構成

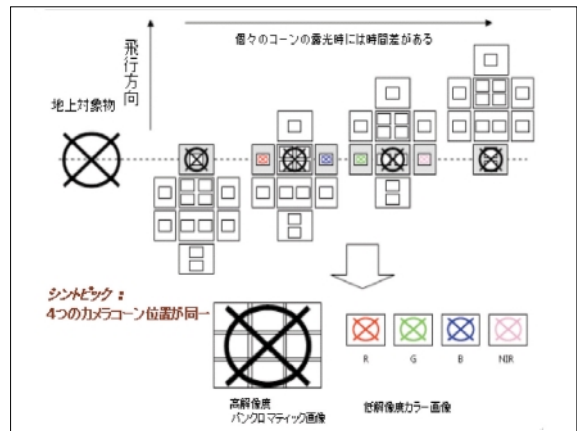


図. 3 シントピック撮影の概念

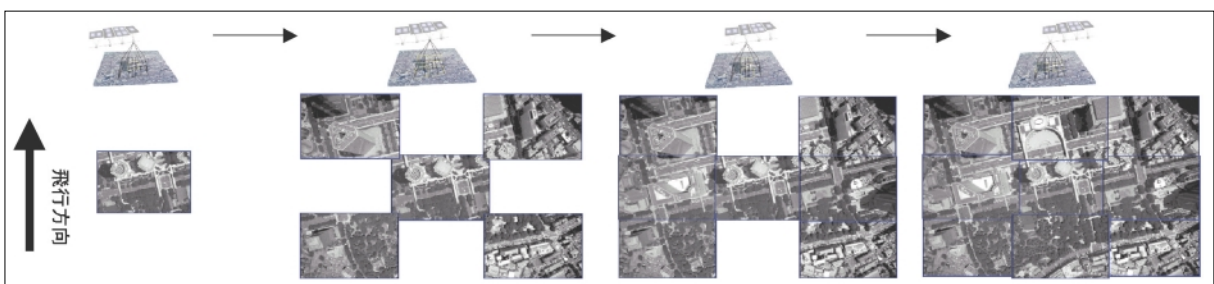


図. 3 シントピック撮影による取得画像

複合画像の調整は、マスターコーンといわれる4隅のエリアを撮影範囲とする2本目のレンズで取得された画像に、残りの画像を内挿する形で行われるため、幾何的な精度を保つことができる。この処理では内部的に12箇

所の画像重複領域で自動タイポイントマッチングが行われ、射影変換による調整が行われる。更に事前に実施されているキャリブレーションデータを用いてジオメトリック補正、ラジオメトリック調整も同時に施され、最終

的に11,500×7,500ピクセルのディストーションフリー状態のパンクロマティック複合画像が生成される。図.5に複合画像調整の結果を示す。対象地域は新宿副都心の高層ビル街で、画像の接合領域がこれらの高層ビル上に相当するが、重複部

自動タイポイントマッチングの残差の平均二乗誤差はそれぞれ0.07、0.04、0.08、0.06ピクセルで、実長では0.63、0.36、0.72、0.54 μm となり、きわめて良好であることがわかる。また視覚的にも画像調整による問題がまったく無いことがわかる。

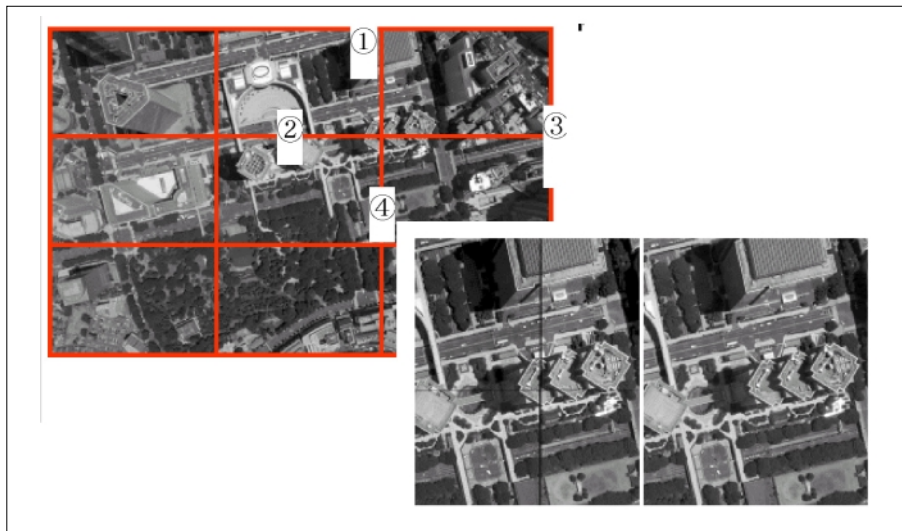


図.5 複合画像調整時の結果

これらのジオメトリック、ラジオメトリック複合画像調整の結果は各複合画像毎にファイル化され、精度管理に用いることができる。

撮影時には周辺に配置された4個のカメラによりR,G,Bおよび近赤外の画像も同時に取得される。これらはパンクロマティック画像とともにパンシャープン処理が行われ、パンシャープンカラー画像あるいはカラー近赤外画像等が作成される。パンシャープン比率は1：3.6程度となる。

UCDはサードパーティーのフライトナビゲーションシステムあるいは直接定位システムとの統合が可能である。同様に既存の航空カメラマウントにアダプターを介して装着が可能となっている。弊社の場合の設定は、センサーユニットをLEICA社のジャイロスタビライズドマウントPAV30にアダプターリングを装着

して使用している。PAV30はAPPLANIX社の直接定位システムPOSと連動しており、飛行中の偏流の自動調整等を行っている。また、独自のフライトマネジメントシステムからは対地速度情報、高度情報等が送られ、これらの情報はTDI制御に用いられる。カメラのトリガー情報も同様にフライトマネジメントシステムからUCDへ送られ、ついでミッドエクスポージャーパルスがPOSイベント情報として発信される。ラインセンサーでは必須とされるGPS/IMUシステムがエリアセンサーではオプション扱いとされる場合もあるが、デジタルエリアセンサーにおいても上記のような理由からGPS/IMUシステムは重要な意味合いを持つ。特に大縮尺図化等を想定した同時調整時には、地上基準点の低減や精度向上が図れる。

3. 自動ブロック調整の精度検証

3.1 精度検証実験概要

本検証では、複合型のデジタルエリア画像が有効なものであるか、デジタル画像による自動タイポイントマッチングはどのような能力があるか、直接定位同時調整の精度はどの程度であるかを主題として精度検証を実施した。

本検証に使用した画像の取得諸元は表. 2のとおりである。想定している地図情報レベルは500で、図化対象地物等を考慮して画像の平均地上解像度を8cmとし、オーバー、サイドラップともに80%の設定とした。なお、天候および対象地域が伊丹空港の東に隣接することから管制の影響を受け、全21コースの撮影に3日を要した。

表. 2 精度検証実験諸元

対象地域	豊中市
使用カメラ	UCD #14 F=101.4mm
撮影年月日	2005/3/10 (C1-C7) 2005/3/14 (C8,9) 2005/3/16 (C10-C21)
撮影コース	南北方向21コース
平均コース長	5km
画像サイズ	11,500×7,500ピクセル (9μm×9μm)
平均地上解像度	8cm
対地高度	900m
オーバー・サイドラップ	80% (基線長120m)
写真枚数	966枚
基準点・検証点数	406点

なお、本件で使用している直接定位システムは通常用いている最上位機種ではなくPOS AV310である。これは、大縮尺を主眼とした同時調整を前提としたもので、適宜上位機種AV510等の使用も可能である。表. 3にPOS AV310のカタログスペックを以下に示す。

表. 3 APPLANIX POS AV310の性能

項 目	精 度
位置 (m)	0.05 - 0.30
速度 (m/sec)	0.075
ロール&ピッチ (度)	0.015
ヘディング (度)	0.035
相対精度	
ノイズ (度/sqrt (hr))	0.15
ドリフト (度/hr)	0.5

数値は後処理後の絶対精度

3.2 複合画像調整結果

複合画像調整では、分割撮影された画像を1枚の高解像度画像に合成処理する。この処理ではジオメトリック及びラジオメトリックの調整が行われ、結果がテキストファイルとして出力される。従来のフィルムカメラあるいは単独のCCDエリアセンサーとの相違点であり、品質保証の面からも、この過程を点検する必要がある。ここではジオメトリックの調整についてのみ結果を示す。

ジオメトリック調整では9枚の画像の重複部12箇所で行われる自動タイポイントマッチングが行われ、このタイポイントを用いて射影変換のパラメータが最小二乗法により求められる。タイポイントは重複領域内に均等に配置できるよう、各重複領域を均等分割し、各々の分割領域内に配置される。この計画点数と最終的に計算に使用された点数の比率が成功率として出力される。さらに、調整計算後の各タイポイントの平均二乗誤差が出力され、これらを用いて複合画像調整の品質を評価する。表. 4に自動タイポイントマッチングの成功率の頻度分布、および表. 5に平均二乗誤差の頻度分布を示す。本検証で使用した画像は966枚であり、重複部は11,592箇所となる。表. 4の成功率90-100は、タイポイントの計画配置数に対し、実際にマッチングが行われ計算に使用された点数が90%より大きく、

100%以下だった重複領域が全重複領域11,592のうち6,118であったことを示す。同様に表.5の平均二乗誤差0.1は計算後のタイポイントの平均二乗誤差が0.1ピクセルだった重複領域が10,998領域あったことを示す。これらの結果から、マッチング成功率が70%以下の重複領域数は全体の約1.7%、平均二乗誤差が0.7ピクセルを超える重複部は全体の0.1%未満にすぎない。ほとんどの重複エリアで高精度の

マッチングが行われ信頼性が高いことが確認できた。さらに、マッチング成功率が70%以下、平均二乗誤差が0.7ピクセルを超える重複部を目視点検した。今回の画像では特に異常が無く、全画像を用いて後続の処理を実施した。

なお、複合後の画像出力の際には8ビットあるいは16ビットの解像度が選択できる。本件においては8ビットを選択した。

表.4 自動タイポイントマッチング成功率頻度分布

成功率(%)	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 80	80 - 90	90 - 100
重複領域数	0	1	5	5	16	46	121	717	4527	6118

表.5 自動タイポイントマッチング平均二乗誤差頻度分布

平均二乗誤差(ピクセル)	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	0.7 - 0.8	0.8 - 0.9	0.9 - 1.0	1 <
重複領域数	10998	388	104	37	14	3	2	3	2	0	5

3.3 自動タイポイント生成

複合画像調整によって作成された高解像度パンクロマティック画像を用いて、ブロック調整を実施するためのタイポイントの生成を行った。タイポイント生成にはLEICA社のLPSのAPM機能を用いた。LPSのAPMでは画像ピラミッドによる多段階法によりマッチングが行われる。多段階法における初期の検索ウィンドウサイズ、相互相関法および最小二乗マッチングのためのウィンドウサイズ等をパラメータとして与える。直接定位システムによる高精度の外部標定要素を近似値として与えることも可能であり、これによりマッチングの効率を高めることが可能である。バンドル調整機能と異常値検索機能も備えている。なお、本検証ではマッチング機能のみを用いている。タイポイント配置は1画像に対して飛行方向、飛行直角方向ともに撮影幅の10%、20%、20%、20%、10%の位置に5×5の格子状となるよう設定した。一般的な5点法のタイポイント配置の場合、1画像に対す

るタイポイントは画像両端と中央部の3列となる(5×3の格子)が、今回の設定では両端部と中央部の間にさらに1列ずつタイポイントが配置され、約1.7倍のタイポイント数となる。処理時間は3.2GHzのデュアルCPUに3Gbのメモリを搭載したPCで約4時間である。バンドル調整はGIP社のBINGOを用いている。BINGOではタイポイントの残差点検、Baardaによるデータスヌーピング、分散推定等により解の良否が統計的に評価され、異常値が検出される。検出された異常値をマニュアルで点検し棄却することも、内部的なパラメータで自動的に異常値の除去を行うことも可能である。今回の作業では自動除去機能を用いた。タイポイントのマニュアル追加観測は一切行っていない。基準点・検証点は連続する4枚の画像上をマニュアル(モノスコピック)で観測している。図.6に主点位置と生成されたタイポイントの状況を示す。なお、タイポイントは最終的に計算に使用されたものである。

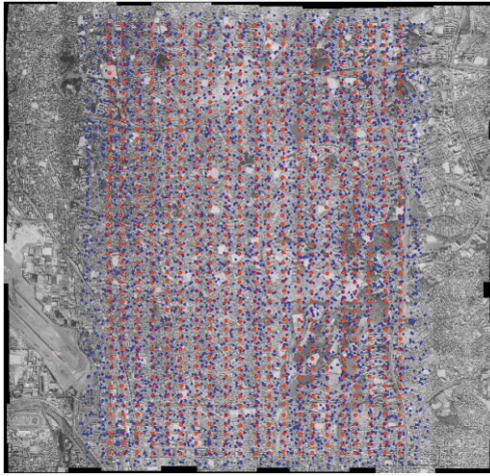


図.6 主点位置（赤）と生成されたタイポイント（青）

4. 結果と考察

生成されたタイポイントおよび基準点・検証点を用いて設定を変えて調整計算を試みた。表.6に検証点残差の平均二乗誤差、標準偏差、最大値、 σ_0 を、それぞれのケースの検証点残差図を図.7から11に示す。今回の調整計算に使用したタイポイントは3,963点で観測数は55,426である。本ブロックはオーバー

およびサイドラップを80%とした高重複度ブロックであり、同一コース上でも計算上で5重に撮影される。さらにコース間の重複があるので、単純計算で同一点が15枚の画像上で観測可能となる。観測数とタイポイント数の単純計算から1点あたり14観測近く行われていることになり、ほぼ計算上の数値と一致する。高密なタイポイントはブロック強度の向上とオクルージョン領域の軽減に寄与すると考えられる。異常値として棄却された点数は1,221点で約2.2%に相当し、自動タイポイント生成の効率及び精度が高いことが確認できた。

はじめにタイポイントを使用せず直接定位による外部標定要素のみを用いて検証点の残差を検証した。(図.7)さらに直接定位の外部標定要素とタイポイントの同時調整を基準点なし(図.8)基準点4点固定(図.10)1点固定(図.11)で実施した。また、画像のみのブロック強度を検証するため、直接定位による外部標定要素を使用せず、4点固定の調整計算を行った。(図.12)

表.6 主点位置（赤）と生成されたタイポイント（青）

		検証点残差(m)				交会残差(μ m)		σ(μ m)	検証点数	
		X	Y	XY	Z	x	y			
直接定位	平均二乗誤差	0.08	0.10	0.13	0.18	0.7	0.8	1.1	406	
	標準偏差値	0.07	0.09	0.05	0.17					
	最大値	-0.26	-0.25	0.29	0.59	3.9	4.7			
基準点なし	平均二乗誤差	0.06	0.06	0.09	0.10	2.5	2.2	2.5	406	写真枚数 966枚 タイポイント数 3963点 写真観測数 55426点 棄却観測数
	標準偏差値	0.05	0.04	0.04	0.09					
	最大値	-0.21	-0.18	0.26	0.29	11.1	10.3			
4 点固定	平均二乗誤差	0.05	0.04	0.06	0.09	2.5	2.2	2.5	402	写真観測数 55426点 棄却観測数
	標準偏差値	0.05	0.04	0.03	0.09					
	最大値	-0.19	0.14	0.22	-0.25	11.2	10.3			
1 点固定	平均二乗誤差	0.05	0.04	0.06	0.11	2.5	2.2	2.5	405	1221点 棄却率 2.2%
	標準偏差値	0.05	0.04	0.03	0.09					
	最大値	-0.15	0.14	0.19	-0.32	11.1	10.3			
直接定位デ ータなし 4 点固定	平均二乗誤差	0.05	0.07	0.09	2.78	2.4	2.1	2.4	405	
	標準偏差値	0.05	0.06	0.04	1.16					
	最大値	0.15	0.20	0.20	-4.44	11.4	10.6			

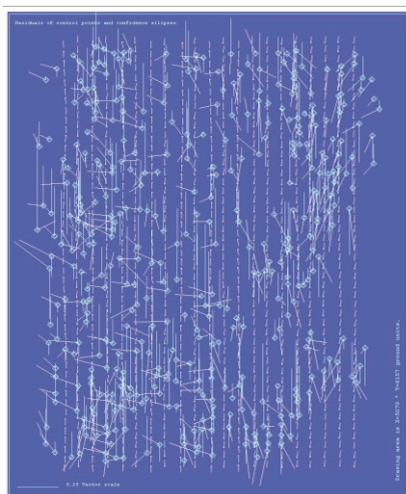


表. 6 検証結果表

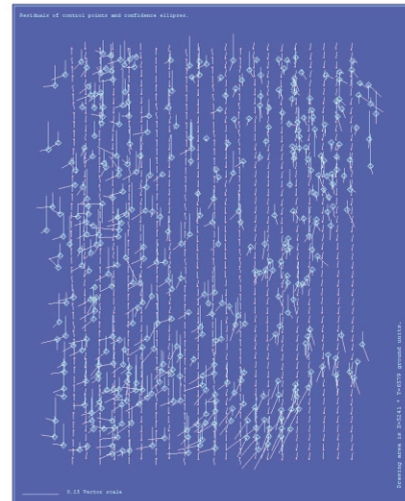


図. 7 直接定位 図. 8 基準点なし

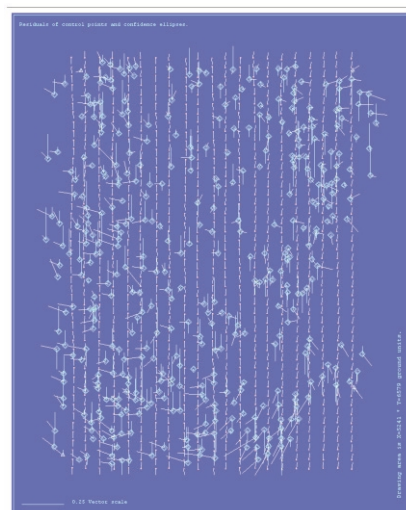


図. 9 4点固定

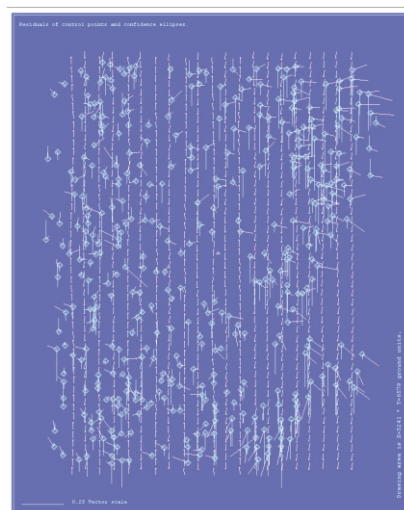


図. 10 1点固定

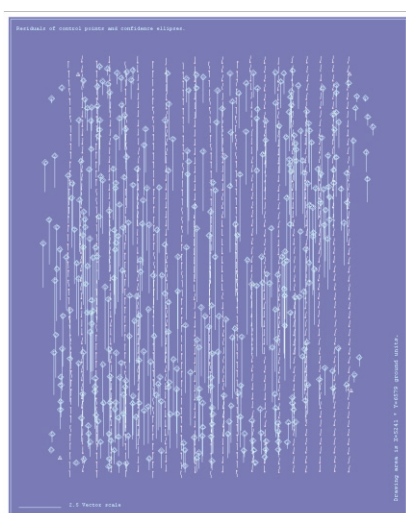


図. 11 直接定位なし、4点固定

まず、全体を通して σ_0 の値がセンサーのピクセルサイズの1/3 ($3\mu\text{m}$) より小さい結果となっており、2.2%の棄却率と合せて、デジタル画像を用いた自動マッチングの精度および有効性が高いことが確認できた。直接定位のみの場合は高さ方向に定誤差の傾向が見られた。ただし、この状態でも地図情報レベル500すなわち、平面および高さの要求精度0.25mに対応できる良好な結果が得られている。タイポイントを加え同時調整することにより、高さ方向の精度が向上していることがわかる。基準点なしの場合と4点固定、1点

固定の場合については、何れも非常に良好な結果であり、大きな差は見られなかった。結果は、いずれも地図情報レベル500の要求精度を完全に満たすものである。また、4点固定、1点固定では定誤差の検出を実施したが、顕著な値は検出されなかった。撮影が3日間にわたったため、撮影日毎に直接定位の結果に差異を生じる可能性があったが、この影響による大きな系統誤差が無かったことが要因であると考えられる。

高密なタイポイント配置の効果によるブロック強度を検証するため直接定位による外部標定要素を用いずに調整を行った結果、平面方向は大差が無いものの、高さ方向の劣化が著しいことが確認できた。

5. おわりに

本検証により複合型デジタルエリアセンサーUCDの複合画像による自動タイポイント生成、直接定位システムによる外部標定要素との同時調整により地図情報レベル500の図化作業が可能であることが検証できた。今回の検証では、直接定位のみでも上記のレベルを満たしている。しかしながら、GPSの状況等によっては直接定位のみで常時精度を満たすことができない可能性もあり、精度保証という意味でも同時調整法は有効である。この際、地上基準点は最低限の点数と配置で実施することが可能である。また、ブロック調整後の σ_0 の値が1/3ピクセル以下に達しており、デジタルセンサー画像による自動マッチングの精度が高いことも確認できた。高密なラップと写真接続により写真ブロックの強度が向上することが想像できたが、今回の検証では高さ方向の精度劣化が検出された。原因として写真ブロックの幾何的な要因、カメラの系統誤差等が考えられるが、特定はできない。これらについては更に検証が必要であ

る。また、ソフトウェアが多重ラップ撮影に最適化される必要もある。多重ラップ撮影時のタイポイントマッチングではマッチングの組み合わせが膨大となる。冗長性の高いタイポイントを高速に抽出することが求められる。さらに調整計算時には大量の観測値から効率よく異常値を検出する機能が必須となる。調整計算後には最終的な写真結合の状況等を確認する必要がある。作業仕様、精度管理手法等を検討する必要がある。森林部や海岸部では樹冠や水面のテクスチャーの関係でマッチングの成功率が低下する可能性があり、比高差が大きい地域でのマッチングは共通点の探索領域を広く取る必要があることから処理時間が増大する可能性がある。自動マッチングにおける対象地域の特性による影響を把握することも重要である。また、地上解像度の違いによるマッチングの精度の検証等も重要な課題である。今回の検証では8ビット画像を用いた。16ビット画像の場合どの程度精度向上あるいは判読性の向上が図れるかの検証も有意義であると考えられる。

本検証を行うに際し、豊中市殿より基準点の成果を交付いただいた。ここに感謝の意を記す。

(発表日2005年6月22日)

参考文献

- 1) 加藤 三卓、橘 菊生 他：GPS/IMU直接座標参照システムの精度検証、日本写真測量学会平成13年度年次学術講演会、2001
- 2) 笹川 正、橘 菊生：直接定位と自動空三による大縮尺図化精度検証、日本写真測量学会平成14年度秋季学術講演会、2002
- 3) 橘 菊生、笹川 正：直接定位同時調整法の精度実証試験、日本写真測量学会平

成16年度年次学術講演会、2004

発表者紹介

橘 菊生（たちばな きくお）

所属：株式会社パスコ GIS総合研究所
ジオマティクス課

株式会社パスコにおいて航空機センサー等
の導入を担当。

E-mail : kikuo_tachibana@pasco.co.jp

共著

笹川 正（工博）：株式会社パスコ GIS
総合研究所 所長

E-mail : tadashi_sasagawa@pasco.co.jp