



デジタル航空カメラ開発の試み

横山 巖¹ 下川 光治¹ 大城 一郎¹

1. 研究の目的

デジタル航空画像を直接取得するために、デジタルセンサが搭載されたデジタル航空カメラが開発されて数年が経過した。デジタル航空カメラのセンサは、ラインセンサ型とエリアセンサ型（フレームセンサ）に大別されるが、本稿でいう「デジタル航空カメラ」とはエリアセンサ型の機材を指すものとする。

デジタル航空カメラは、世界的にはDIMAC System社のDiMACやAPPLANIX社のDSSなど数種類が商品化されているが、現時点、日本において導入報告がされているのはインターグラフ社（旧ZI-Imaging社）のDMC（Digital Mapping Camera）と、ベクセル社のUCD（Ultracam D）など、複合型デジタルエリアセンサと呼ばれる機材だと思われる。

複合型デジタルエリアセンサは、1シーンあたりの画素数が大きく、広範囲の撮影ができるが、その導入にあたって最大の課題となるのは、周辺機器まで含めると一式数億円にもなる導入費用と、年間数千万円と想像される維持コストであろう。デジタル航空カメラのメンテナンスに関しては、専用のキャリブレーション・サイトの問題もある。また、航空機内の占有スペースや消費電力が大きく、設置調整が不可欠な精密機器であることから、運用上、簡単には機材の換装ができないため、デジタル航空カメラ専用の航空機が必要となる。これらの状況により、現状では国内のデジタル航空カメラの導入状況が必ずし

も充分とは言えず、災害時などの緊急時にデジタル航空画像が必要とされたとき、遅滞なく全国をカバーする撮影体制が整うのか危惧される場所である。

本研究では、デジタル航空カメラ導入にあたっての課題を解決するために、シンプルな構成ながら、高性能なデジタル光学機器と画像処理技術を用い、導入・維持コストの低減を図ったデジタル航空カメラ「TDC」（写真1、写真2）の開発を試みるとともに、その撮影画像の検証を行うものである。



写真1 デジタル航空カメラ「TDC」



写真2 航空機に搭載されたTDC

¹ 大成ジオテック株

2. 研究の特色

2.1 デジタル航空カメラの諸元

日本に導入実績があるエリアセンサ型デジタル航空カメラのうち、インターグラフ社のDMC、ベクセル社のUCDについて、既報の

報告（引用文献¹⁾、参考文献²⁾³⁾）などをもとに諸元をまとめた。また、今回製作したデジタル航空カメラ「TDC」の諸元についても併せて示す。（表1）

表1 デジタル航空カメラの諸元

項目	インターグラフ社DMC	ベクセル社UCD	デジタル航空カメラTDC(試作機)
カラー画像の生成方式	RGBの3光学系から得られた3つのマルチスペクトル画像に、4光学系から得られた空間分解能の高い4つのパンクロセンサ画像を重ね合わせ、パンシャープン画像を生成。	RGBの3光学系から得られた3つのマルチスペクトル画像に、4光学系からシントビック撮影で得られた空間分解能の高い9つのパンクロセンサ画像を重ね合わせ、パンシャープン画像を生成。	1つの光学系を通し、RGB原色フィルタを用いた単板型のエリアセンサから画像を生成。 1度に撮影する範囲を広げるため、3つの光学系により、同時に3画像を撮影。
センサ画素数 R,G,B,NIR パンクロ	CCD 3,000×2,000(各1枚) 7,000×4,000(×4枚)	CCD 4,008×2,672(各1枚) 4,008×2,672(×4枚)	CMOS 4,992×3,328 (単板RGB原色フィルタ)
画素間隔	12 μm	9 μm	7.21 μm
センサ階調	12 bit (4096階調)	12 bit (4096階調)	12 bit (4096階調)
合成画像(画素)	13,824×7,680	11,500×7,500	10,000×5,000(予定)
レンズ焦点距離 R,G,B,NIR パンクロ	25mm×4本 120mm×4本	28mm×4本 100mm×4本	50mm×3本 または 85mm×3本
撮影範囲 飛行方向直角 飛行方向	74度 44度	55度 37度	(50mm) (85mm) 75度 45度 40度 24度
絞り	F4～F22	F5.6	F1.4～F22
シャッター速度	1/50～1/300秒	1/60～1/500秒	1/50～1/2,500秒
最短シャッター間隔	2秒	1秒	2秒
FMC(前進ぶれ補正)	TDI制御	TDI制御	高速シャッターにより特別な機構は不要
記録枚数	約2,000枚	1,850枚(非圧縮)	特に制限なし 約600枚(可逆圧縮)でCFカード交換
データ容量	840GB	1000GB	同上
撮影範囲 地上分解能10cm	1,380m×768m	1,150m×750m	1,000×500m

2.2 デジタル航空カメラの画像生成の仕組み

DMCやUCDなどの複合型デジタルエリアセンサは、RGBのマルチスペクトル画像を取得するため、3組のレンズおよびエリアセンサ(以下、光学系と呼ぶ)を用いる。また、高空間分解能のパンクロ画像取得のため4組の光学系を用いている。パンクロ画像は、

DMCで4枚、UCDで9枚に空間分割されて取得される。(図1)

空間分割して複数枚取得されたパンクロ画像は、貼合せ調整により1枚のパンクロ画像となる。RGBのマルチスペクトル3画像を色の3原色として合成し、これに高空間分解能のパンクロ画像を重ね合わせてコントラスト差で細分化し、パンシャープン画像とする。こ

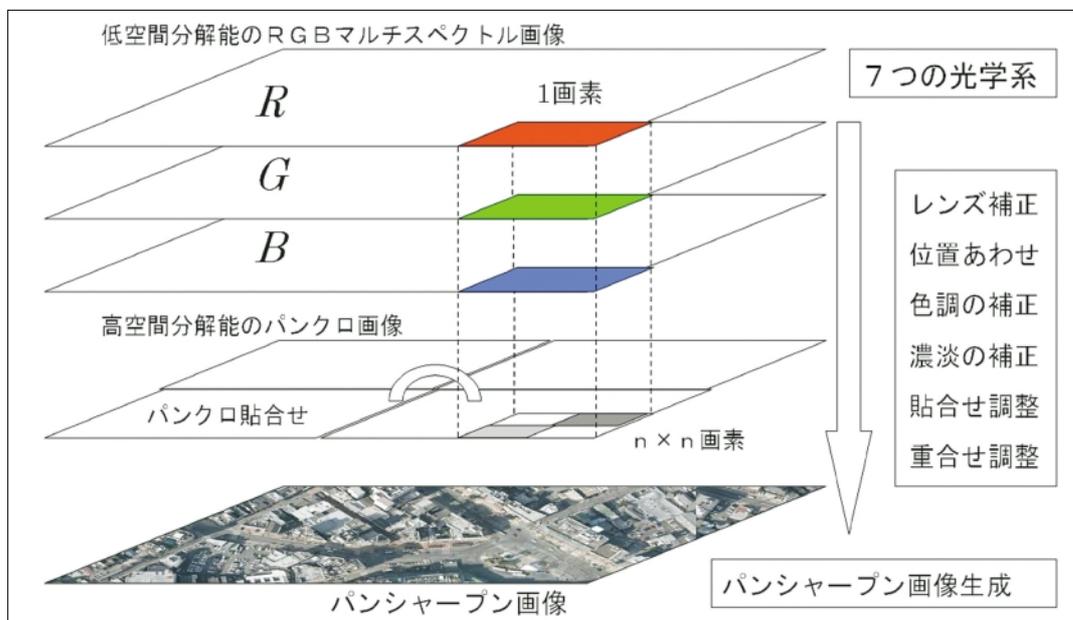


図1 DMC・UCDでのパンシャープン画像生成の仕組み

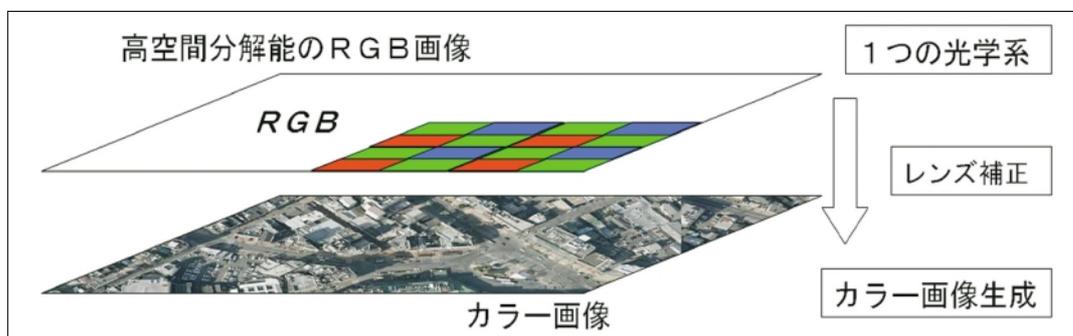


図2 デジタル航空カメラ「TDC」でのカラー画像生成の仕組み

れには、複雑で高精度な機構が必要であるため、導入・維持には高コストを要する。

一方、今回製作したデジタル航空カメラは、1つの光学系から1つのカラー画像を生成するシンプルな仕組みのため、導入・維持コストを低減化することができる。(図2)

3. 研究の実施方法

3.1 デジタル航空カメラの構成要素ごとの検討

(1) レンズ

一般にレンズでは、物体の1点から出た光が理想的な像点に集まらず、その近傍に散らばって結像する。この理想点からのズレ量を収差といい、光の波長(色)に関係しない5

つの収差(ザイデルの5収差)と、色に関係する2つの収差(色収差)に分類される。

収差の無いレンズは存在せず、レンズの種類が異なればもちろんのこと、同じ種類のレンズでも若干の相違が生じる。レンズ収差の影響を小さくするため、次の仕組みとした。

- ・1組のレンズ・エリアセンサから1つのカラー画像を生成する
- ・レンズ収差の補正、内部標定要素の取得ができること

これにより、機器調整や画像補正にかかる手間とコストを省きながらも、位置のズレや色のズレが小さく色調の整ったカラー画像を得ることができる。

なお、今回製作したデジタル航空カメラで

は、撮影範囲を広げるために3組のレンズ・エリアセンサを用いている。

(2) エリアセンサ

画像を取得するCCDなどのエリアセンサは、空間分解能を高めるためには画素数が多いほど良いが、センサ感度を高めるためには1画素のサイズが大きい方が良いため、大きなエリアセンサが必要となる。ただし、半導体と同様な工程で作成されるエリアセンサの大きさには製作限界があり、1つのエリアセンサで航空フィルムを代替するのは未だ困難な状況である。

しかしながら、最近のデジタル光学機器の発達により、RGB各12ビット階調のフルカラーでありながら、1,670万画素で構成されるCMOS型エリアセンサが利用できるようになった。CMOS型エリアセンサはCCDに比べ消費電力が非常に少なく、航空機に搭載するデジタル航空カメラにとって大きなメリットである。

CCDと比較した場合のCMOSセンサのメリットを次に示す。

- ・消費電力が少ない(発熱量が少なく、熱による歪みも小さい)
- ・単一の低電圧で駆動できる(CCDでは数種類の電圧が必要)
- ・構造がシンプルのため集積度を高くできる
- ・信号の読み出し速度が高速
- ・CCD特有の欠点であるスミア(縞状の強い輝線)やブルーミング(光がにじむような現象)の発生がない

(3) 色再現

エリアセンサから得られる生(なま)のRGB画像は、人間が自然に感じる色調となるように色再現(色合成)をしなければならない。色再現では、天候や地表の状況に応じたホワイトバランス補正(色温度による補正)

を行うなど、効果的でフレキシブルな設定が行えるものとした。特に、空中写真撮影で問題となる空中の青い散乱光(ヘーズ)の影響についても、ホワイトバランス補正での低減が期待される。

(4) シャッター間隔

空中写真撮影では、撮影基線長と航空機のスピードによってシャッター間隔が決定される。5,000×3,300画素のエリアセンサの長辺方向に飛行コースをとり、地上分解能10cmで、70%オーバーラップ撮影すると基線長が150mとなる。飛行速度を200km/hとすると、シャッター間隔は約2.7秒である。このため、連続撮影ができる最短シャッター間隔を約2秒となるようにした。

(5) シャッター速度と前進ぶれ補正

高感度のCMOS型エリアセンサと、明るいレンズ(F1.4)を用いたため、シャッター速度を1/2,500秒まで高速化することができた。

空中写真撮影では、一般に低空での撮影に際して前進ぶれ補正(FMC)が必要とされており、DMCやUCDでもTDI制御による前進ぶれ補正が行える。TDI制御は、エリアセンサによる画像読み込みの露出時間中に、機体が前進するのに合わせて、センサ上の各ライン(飛行直角方向)のデータを逐次後方のラインにシフトさせる処理としている。¹⁾

しかしながら、TDCではシャッター速度が高速なため、シャッター速度を1/1,000秒としても、地上分解能10cmの撮影ができる高度700mにおいて飛行速度200km/hとすると、その間の対地移動量は5cm、センサ上では1/2画素にしかならない。このため、ライン単位(画素単位)にシフトさせるような前進ぶれ補正機構は必要ない。

(6) データ転送、データ格納

シャッター間隔が短くなり、また、エリアセンサから得られるデータ量が大きくなれ

ば、それに応じてデータ転送・格納には高速性、安定性などの高い性能が要求される。また、航空機内ではデータ格納装置の大きさと、消費電力を極力抑えられることも求められる。

このため、高速にデータ格納ができ、低温低気圧でも安定的に作動し、故障の恐れが少なく、かつ消費電力が極めて少ないコンパクトフラッシュカード（CFカード）を用いることとした。現時点で、CFカードは容量8GBまで商品化されており、エリアセンサから転送された可逆的圧縮画像を600枚程度記録することができる。これは地上分解能10cm、オーバーラップ60%となる基線長200m撮影の場合、総延長120kmの撮影が可能となる容量であり、途中でCFカードを交換すれば実用的には問題ないと判断した。

（7）筐体、マウント、電源

航空機へのデジタル航空カメラの搭載に際しては、広く普及しているアナログ航空カメラRC30のカメラマウントPAV20等に装着できるよう、飛行時の安全性・安定性にも十分配慮した筐体を設計、製作した。このため、機体やマウントの改造は不要であった。

また、PAV20等の回転機構とナビゲーション機構をそのまま利用するため、偏流角を補正した撮影でも、アナログ航空カメラと同じ要領で撮影できるメリットもある。

電源は、航空機からの電力供給に頼らず、低電圧の小型バッテリーで駆動させる。

3.2 レンズの収差の検討

レンズの収差とは、理想像点と実際の結像点のズレ量を示し、色に関係する2つの色収差と、色（波長）に関係しない5つの収差（ザイデルの5収差）とに分類される。

- ・色収差(屈折率が異なることによる結像のズレ)
 - ・軸上色収差 光軸上で色による焦点のズレ

- ・倍率色収差 色によって像の倍率が異なる
- ・色に関係しない収差
 - ・歪曲収差 像が歪む(ディストーション)
 - ・球面収差 光軸上で焦点が合わない
 - ・非点収差 光軸外で焦点が合わない
 - ・コマ収差 光軸外で彗星のような尾を引く
 - ・像面湾曲 結像が平面上に集まらない

（1）色収差

色収差のうち倍率色収差は、同じ点から出た光でも、波長の違いにより同じ点に結像しないことを示す。例えば、多くの波長光が重合している白色光では、倍率色収差により色ズレが発生することになる。色ズレは、一般に焦点距離の長いレンズで影響が大きくなり、画像周辺部において像が色の縁取りをもち、鮮鋭度が損なわれることがある。色収差は、色収差が生じにくいレンズ（色消し）を用いれば小さくできる上、今回は焦点距離が短いレンズを採用したため、ほとんど影響がないと考えた。

（2）歪曲収差

色に関係しないザイデルの5収差の内、「歪曲収差」は像の形状の再現性の欠陥を示す収差であり、他の収差は像の解像力に関係する収差である。歪曲収差は、本来は正方形に写るべき像が、タル型や糸巻き型、あるいはこれらが複合された形状に歪曲してしまう現象であり、写真測量においては最も重視すべき収差である。（図3、図4）

レンズでは、1つの収差を取り除こうとすると他の収差が大きくなるなど、それぞれの収差は背反した性格を持つ。また、一般にレンズ設計では、光軸近傍の収差を最小化することを基本にしている。このため、レンズ光軸から離れるほど、つまり画像の周辺部になるほど歪曲、解像力、色ズレなどの収差が大きくなる。

これらの収差の大きさは、結像面における

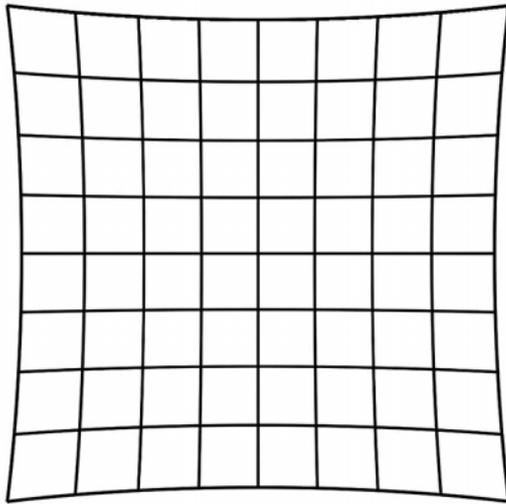


図3 歪曲収差（糸巻き型）

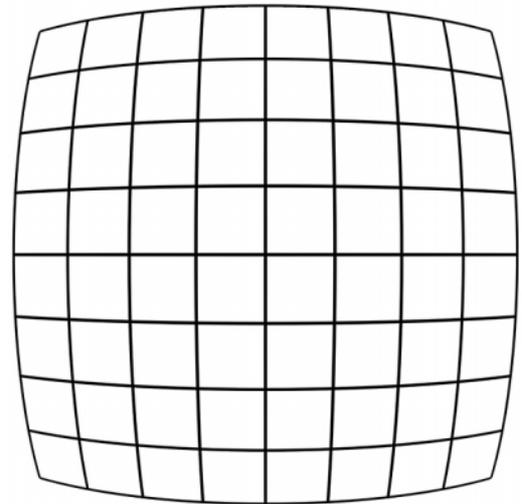


図4 歪曲収差（タル型）

表2 歪曲収差の補正精度

歪曲収差の補正	補正後
	上段：画素数 下段：結像面上
標準偏差	0.25画素 1.80 μm
最大残差	0.50画素 3.61 μm

レンズ光軸からのオフセットだけでなく、被写体までの撮影距離、レンズ絞り口径、入射光の波長をパラメータとし、個々のレンズ特性によって導き出される極めて複雑なものとなる。

(3) 歪曲収差の補正と精度の検証

写真測量において、レンズの歪曲収差を小さくすることは最も重要な事項の1つである。アナログ航空カメラでは、画像が直接フィルムに記録されるため、レンズそのものの歪曲収差を小さくする方法がとられた。アナログ航空カメラのレンズは、23×23cmのフィルム面上で5 μm 程度の歪曲収差があるとされている。

一方、デジタル航空カメラでは、品質の高いレンズを用いるのはもちろんだが、デジタル画像を直接取得できる特性を活かし、画像処理によって歪曲収差を補正する方法をとる

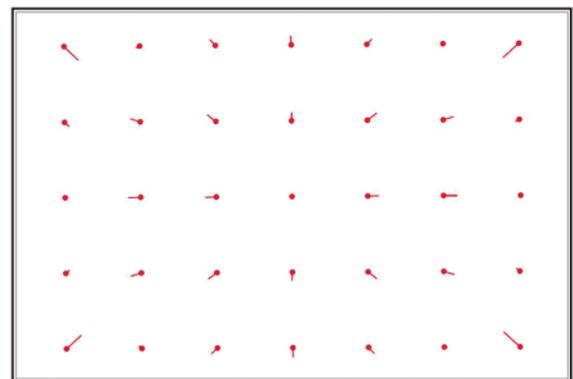


図5 歪曲補正前・後の変位状況

ことが出来る。これは、キャリブレーション・ターゲットを繰り返し撮影し、内部標定要素の他、必要なレンズ特性を取得することにより、レンズの収差補正を行うものである。本研究では、この方式を採用し、歪曲収差の補正を行うこととし、その精度を検証した。

歪曲収差の補正精度を検証するために、解析図化機等の校正に用いられるガラス格子板の格子上に35点の検証点を設け、その画像を撮影した。検証点の格子上の理論的な座標と、画像から読み取った検証点の計測座標との射影変換式を最小二乗法によって求め、理論値と計測値の残差を画素単位で求めた。その結果、標準偏差が0.25画素、最大残差が0.5画素となり、歪曲収差の補正精度が極めて高いことが検証された。(表2、図5)

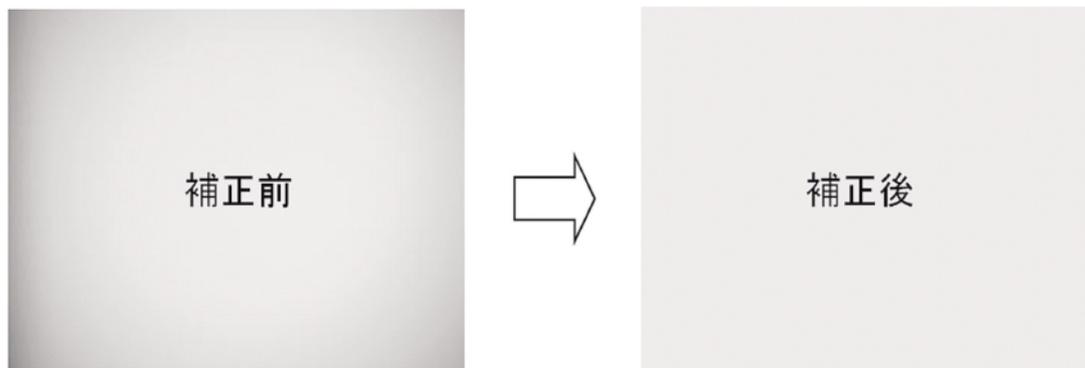


図6 周辺減光補正のイメージ

3.3 周辺減光の補正

レンズでは、一般に画像の中心部よりも周辺部の方が暗くなる（周辺減光）。特に絞りを広く開けたときや広角レンズを用いたとき顕著となる。周辺減光は、モザイクやオルソ画像の画質に大きな影響を及ぼす。この問題に対し、アナログ航空カメラでは、フィルタにより中心部の明るさを押さえて対処している。

本研究では、画像処理により周辺減光の補正を試みた。周辺減光は、レンズに固有な特性と、撮影時の絞りに影響される。また、エリアセンサの露光特性は光量に対して非線形的であるため、これも考慮しなければならない。周辺減光の補正も、補正に必要なレンズ・センサの特性を取得することにより行うものとした。

4 . 撮影画像の検証

4.1 相互標定の残存縦視差

デジタル航空カメラ（TDC）を用い、地上分解能10cmの画像を取得するため、高度700m、70%オーバーラップで撮影を行った。この画像の歪曲収差などを補正し、デジタル図化機に読み込み、画像のオーバーラップ部分で相互標定を行ったところ、残存縦視差の標準偏差が0.1画素、最大残差でも0.2画素（地上2cm相当）となった。公共測量作業規程で

は、残存縦視差の許容量をフィルム上0.02mmとしているが、これは1/5,000撮影で地上10cmに相当し、TDC撮影による相互標定の精度はこれを十分に満たす。

4.2 空中三角測量による精度検証

先に述べた撮影により、1コース3モデルの空中三角測量を行った。既存の地上基準点を4点利用し、検証点を12点設けて検証した。その結果、標準偏差は水平方向で0.12m、高さ方向で0.14m、最大値は水平方向で0.24m、高さ方向で0.24mとなった。公共測量作業規程では、水平・高さ方向の精度制限について、標準偏差が撮影高度の0.02%以内の0.14m、最大値が撮影高度の0.04%以内の0.28mとされている。TDC撮影による空中三角測量の精度は、この制限値を満たしている。

4.3 画質の検証

画質を検証するため、12月17日の13時に、撮影高度700mで地上分解能10cmとなる撮影を行った。冬至は12月22日であるから、撮影日は1年で最も太陽高度が低い時期となり、影が長く、光量が少ないという撮影条件が悪い中での画像が得られたこととなる。この様な撮影条件にもかかわらず、写真3では、様々な色の車や屋根、カラー舗装が鮮やかに写っており、色再現性の高いことが分かる。



写真3 色再現性の検証（冬至の頃に撮影）



写真4 細部および陰影部の判読性の検証（冬至の頃に撮影）

写真4は、写真3の一部を拡大表示したものだ
が、歩道のカラータイルの状況や、道路上
の白線、高架鉄道の線路・枕木が明瞭に写っ

ている。また、センサ階調が12bitと階調幅が
広い
ため、陰影部についても高い判読性が得
られていることが見て取れる。

4.4 検証結果のまとめ

以上、TDCで撮影された画像の検証結果をまとめると次のようになる。

- ・相互標定では、非常に良好なステレオ・モデルを構成できた
- ・空中三角測量による精度検証では、公共測量作業規程の制限値を満足した
- ・撮影画像の画質では、色再現性、細部および陰影部の判読性が良好であった

これより、本研究で製作したデジタル航空カメラ（TDC）は、空中写真測量に利用できるうる性能を有することが示された。

5. まとめ

デジタル航空カメラとして導入されている複合型デジタルエリアセンサは、複数の光学系から得られた画像を貼り合わせ、重ね合わせるため、精密で複雑な仕組みが必要である。このため、機材の導入や維持管理が高コストとなり、幅広い普及のネックとなっていた。

本研究では、デジタル航空カメラの導入・維持コストを低減化するため、1つの光学系から1つのカラー画像を取得する方式を提案し、これを実現するための構成要素を検討して試作機（TDC）を製作した。また、ホワイトバランス・歪曲収差・周辺減光の補正など、空中写真測量に適用するために必要な画像処理の仕組みを構築し、実用化に耐えうる精度・性能を得た。本研究で期待される効果をまとめると、次の通りである。

- ・デジタル航空カメラに汎用的な光学機材を用いるため、導入コストが低減
- ・複雑なキャリブレーションが必要ないため、維持管理に手間がかからない
- ・シンプルな機構で、HDDなどの駆動部品も無いため、故障が少ないと予想される
- ・アナログ航空撮影で用いた航空機、マウ

ントを利用できる

- ・設置スペースをとらず、特別な電力供給は不要
- ・3組の光学系を用いることで広い撮影範囲となった
- ・高速シャッターにより、前進ぶれ補正機構を付けることなく画質が向上
- ・天候や地表状況に応じてホワイトバランスを補正することで高画質化が図れる
- ・周辺減光の補正により、モザイクやオルソフォトの品質向上が期待される

また、今後の課題として、ダイレクト・ジオ・リファレンスに対応するため、GPS / IMUシステム（写真5）の組み込みを検討している。

（発表日2006年7月7日）

引用文献

- 1) 津留 宏介、橘 菊生、村木 広和ほか、デジタル航空カメラの最前線、写真測量とリモートセンシング、Vol.44、No.5、2005

参考文献

- 1) 小田 三千夫：フルデジタル写真測量の確立に向けて、APA No.87-3、2004.9
- 2) 笹川 正、橘 菊生、福澤 由美子：航空機搭載型デジタルエリアセンサとラインセンサの比較、APA No.87-7、2004.9
- 3) 石垣 智明：デジタル航空カメラ（DMC）の導入と運用、APA No.87-4、2004.9
- 4) スペーシャリストの会 編集、村井俊治 監修：空間情報分野の技術提案事例集、（社）日本測量協会、2006
- 5) 村井 俊治、近津 博文 監修：デジタル写真測量の理論と実践、（社）日本写真測量学会 編集、（社）日本測量協会 発行、2004



写真5 GPS/IMUシステム

- 6) Toni Schenk著、村井 俊治、近津 博文 監修：デジタル写真測量、(社)日本写真測量学会 編集、(社)日本測量協会 発行、2002
- 7) 村井 俊治 監修：解析写真測量、(社)日本写真測量学会
- 8) 保谷 忠男：写真測量、(社)日本測量協会
- 9) 秋山 実：写真測量、山海堂、2001
- 10) 岸川 利郎：ユーザエンジニアのための光学入門、オプトニクス社、2002
- 11) 吉田 正太郎：写真レンズの科学、地人書館、1997
- 12) 三宅 洋一：デジタルカラー画像の解析・評価、東京大学出版会、2000

所属：大成ジオテック株式会社 空間情報部

発表者紹介

横山 巖(よこやま いわお)

所属：大成ジオテック株式会社 空間情報
総括監理技術者

共著者紹介

下川 光治(しもかわ みつはる)

大城 一郎(おおしろ いちろう)