

GPS/IMUのボアサイトキャリブレーション及び精度検証について Boresight calibration and accuracy assessment of GPS/IMU

測図部 中村孝之・下野隆洋・笹川 啓

Topographic Department

Takayuki NAKAMURA, Takahiro SHIMONO and Akira SASAGAWA

要 旨

国土地理院保有の航空機「くにかぜⅡ」に設置したGPS/IMU（慣性計測装置）のボアサイトキャリブレーション及びテストエリアにおける精度検証結果について報告する。

1. はじめに

国土地理院時報（以下、「時報」という。）第105集で、GPS/IMUの2万5千分1地形図（以下、「地形図」という。）修正への適用に関する調査研究結果として、GPS/IMUの概要、三浦半島地区のGPS/IMUデータ（民間航測会社貸与）の精度検証結果について報告した。また、直営撮影作業への適用を想定し行った「くにかぜⅡ」へのGPS/IMUの取り付け及びデータ取得実験について報告した。

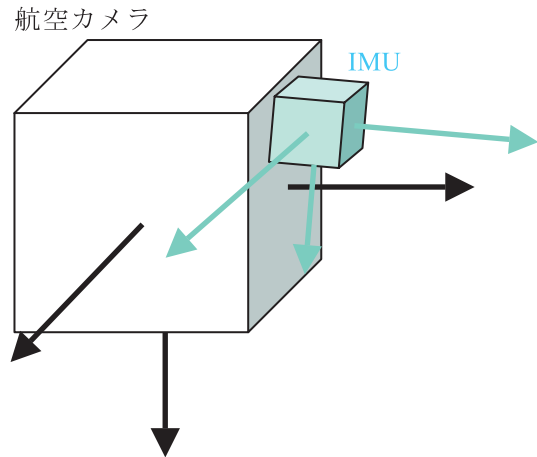
今回は、前回「くにかぜⅡ」で取得したGPS/IMUデータの精度検証結果について報告する。具体的には、徳島地区の撮影縮尺1/4,000及び1/8,000の空中写真を用いたGPS/IMUのボアサイトキャリブレーションについて報告する。そして、その結果を踏まえて行った、姫路地区及び鳥取地区の撮影縮尺1/30,000の空中写真を用いたGPS/IMUデータの精度検証結果について報告する。

2. ボアサイトキャリブレーション

2.1 ボアサイトキャリブレーションとは

GPS/IMUを用いることにより、空中写真撮影時の航空カメラの位置及び傾き（外部標定要素X, Y, Z, ω , ϕ , κ ）を直接取得することができる。

そのためには、IMUの三軸と航空カメラの三軸の差（ミスアライメント角）を求める作業が必要となる（図－1）。この作業は、ボアサイトキャリブレーション（又はボアサイト）と呼ばれ、通常、縮尺1/4,000で撮影した空中写真（4コース、各コース10モデル程度）を用いて空中三角測量を行うことにより行う。ボアサイトキャリブレーションは、カメラからIMUを取り外した場合の他、定期的に（半年～1年に一度程度）行う必要がある。



図－1 航空カメラとIMUの三軸のずれ

2.2 ボアサイトキャリブレーションのサイト

徳島石井地区及び徳島板野地区の撮影結果を利用し、「くにかぜⅡ」に設置したGPS/IMUのボアサイトキャリブレーションを行うこととした。撮影の諸元を表－1に、標定図を図－2、図－3、飛行経路を図－4、図－5に示す。両地区とも平坦で高低差のほとんど無い地域である。

表－1 徳島石井地区及び徳島板野地区の撮影諸元

撮影地域	徳島石井地区	徳島板野地区
撮影日	平成16年5月22日	
撮影縮尺	1/4,000	1/8,000
撮影高度	615m	1,230m
コース数、枚数	4コース、52枚（48モデル）	
カメラ	RC30	
GPS/IMU	Applanix 社製 POS/AV510	
色	モノクロ	

前述のとおり、ボアサイトキャリブレーションは、縮尺1/4,000の空中写真撮影により行うことが標準であり、本来、徳島石井地区のみで実施すれば十分である。しかし、「くにかぜⅡ」は飛行速度が速く、縮尺1/4,000の空中写真撮影を定常的に行うことには困難が伴う。また、1/10,000以上の大縮尺の撮影を行うことはほとんどない。このため、縮尺1/8,000の空中写真を用いても十分な精度が得られることを期待して、徳島板野地

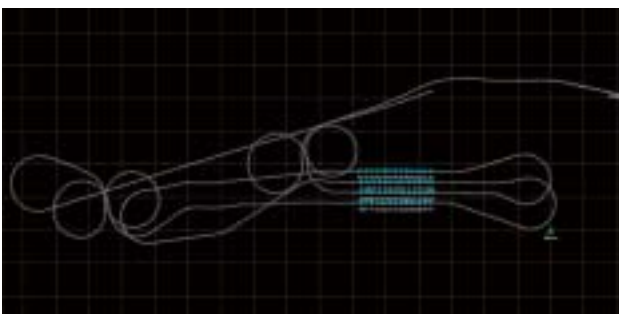
区でもボアサイトキャリブレーションを行い，両者の精度を比較することとした。



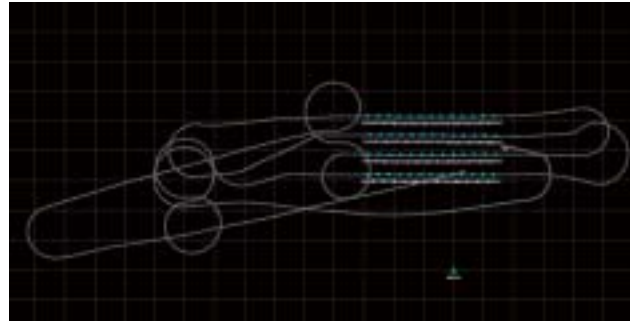
図－2 徳島石井地区標定図



図－3 徳島板野地区標定図



図－4 徳島石井地区撮影の飛行経路
(C4, C2, C1, C3の順に撮影)



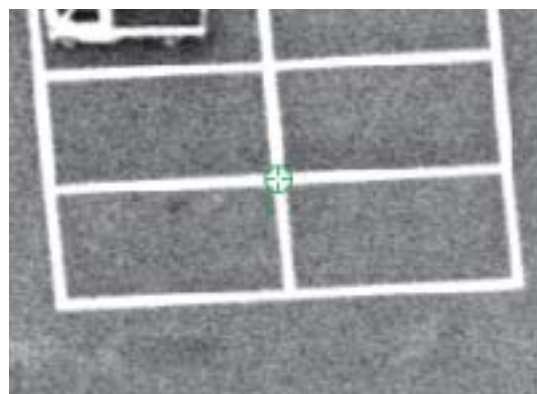
図－5 徳島板野地区撮影の飛行経路
(C4, C2, C1, C3の順に撮影)

2.3 空中三角測量

徳島石井，徳島板野両地区について，ライカジオシステムズ社製デジタル図化機LPS（Leica Photogrammetry Suite）を用いて空中三角測量を行った。空中写真は，写真測量用スキャナLeica DSW600を用いて $20\mu\text{m}/\text{pixel}$ で数値化したものを用いた。

標定点は，両地区ともブロックに均等に配置した9点を使用した。標定点として写真上に明瞭に写っている駐車場の白線の交点等を選点し（図－6），ブロック近傍の複数の電子基準点を与点とした後処理キネマティックGPS方式により測量を行った。パスポイント及びタイポイントの設定は，徳島石井地区については，手動で設定した。徳島板野地区については，ボアサイトキャリブレーション前の外部標定要素を用いて自動発生させ，そこから大誤差を持つものを手動又は自動で除去し，設定した。ブロック調整計算はバンドル法を用いて行った。

両地区とも内部標定，調整計算後の基準点残差，交会残差ともすべて基本図測量作業規程（以下，「作業規程」という。）の制限を満たす良好な結果であった。



図－6 標定点の例（徳島石井地区）

2.4 ボアサイトキャリブレーションの実施

POSPac Ver4.1 (POS/AVシステム用のGPS/IMU解析処理ソフト) (図-7) を用いてボアサイトキャリブレーションを行った。

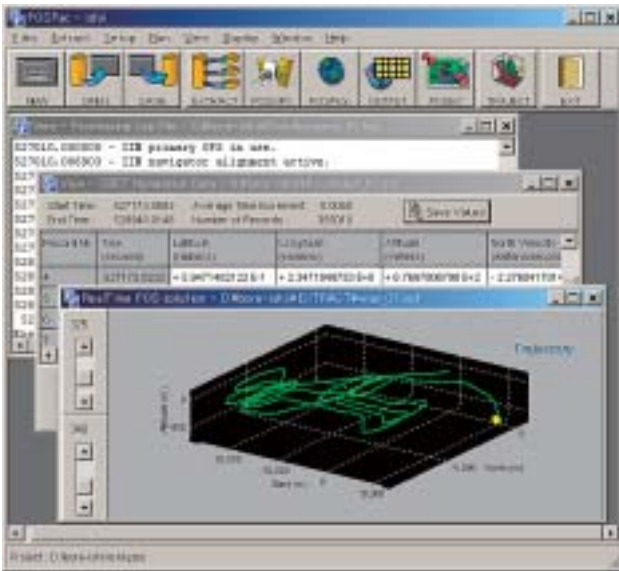


図-7 POSPacソフトウェア

POSPacを用いたGPS/IMUデータ解析処理は、

- ①プロジェクトファイル作成 (NEW)
- ②RAWデータ解凍 (EXTRACT)
- ③GPS解析 (POSGPS)
- ④GPS解析結果とIMUの合成 (POSProc)
- ⑤ミスアライメント角算出 (POSEO内のPOSCAL)
- ⑥外部標定要素算出 (POSEO)

の順で行われる。ボアサイトキャリブレーションを既に行っている場合には⑤を行う必要はない。

③では、キネマティックGPS解析を行うに当たり、地上基準局1点を用いるほか、複数の地上基準局を用いて解析することも可能である。時報第105集で報告したとおり、サイクルスリップが頻発するなど、GPSデータの取得状況が悪かったため、今回は、複数の地上基準局を用いた解析も試みた (図-8, 図-9)。品質の高い順に、黄緑、緑、青、紫、ピンク、赤)。GPS解析は時間経過方向と逆方向の両方向で行い、最終的に両者が合成される。両者の較差がGPS解析の精度の1つの指標となるが、特に徳島石井地区では鉛直方向に1m程度の較差が続くなど (地上基準局1点では1.5m程度)、良好ではなかった。

④は、③の結果が悪かった場合、処理が途中で止まってしまう。特に徳島石井地区では処理時間、使用衛星、エレベーションマスクを始めとする各種設定を変えて試行錯誤を行った。

⑤は、空中三角測量を行った際の基準点、パスポイント及びタイポイントの画像座標、基準点の地上座標を入力し、計算を行う。

ミスアライメント角を算出した結果を表-2に示す。両地区とも図-8, 図-9のとおり、C4のGPS解析結果が悪かったため、C1~C3のみを使用した算出も行った (徳島石井地区はC4を使用すると算出できなかった)。RMSは、例えば、表-2のiiでは ω : 0.3235, ϕ : 0.1552, κ : 0.4025, viでは ω : 0.5472, ϕ : 0.2439, κ : 1.0265であり (単位: arcmin), その他の場合でも徳島板野地区より徳島石井地区の値が小さかった。しかし、iiとviのミスアライメント角の違いは、撮影縮尺1/30,000の空中写真を使用する場合、地上換算で数10cm~1m程度の差となると見積もられ、地形図修正を行う上で問題とはならないと想定される。

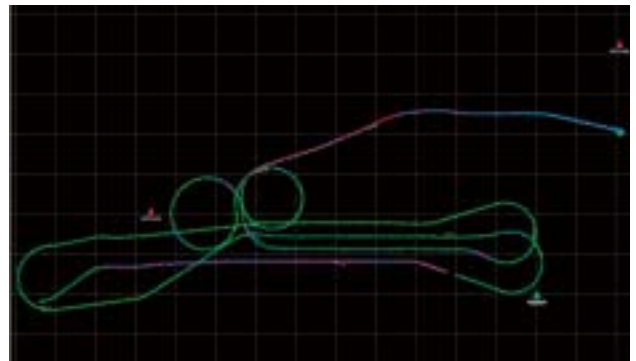


図-8 徳島石井地区のGPS解析結果

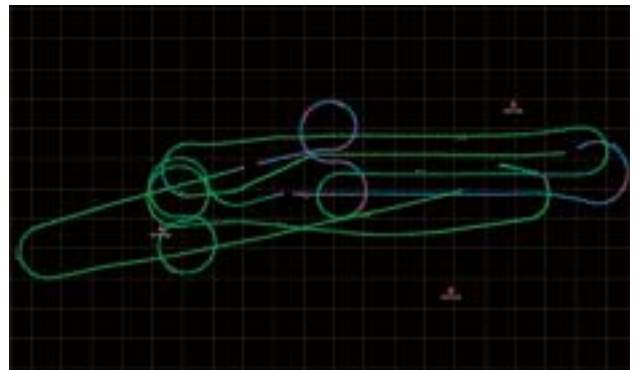


図-9 徳島板野地区のGPS解析結果

表-2 算出したミスアライメント角の例

	サイト	基準局数	使用コース	ミスアライメント角 (arcmin)		
				ω	ϕ	κ
i	徳島石井	1点	C1~3	36.338	-17.627	-5.771
ii	徳島石井	3点	C1~3	36.334	-17.666	-5.679
iii	徳島板野	1点	C1~4	36.349	-17.542	-4.627
iv	徳島板野	1点	C1~3	36.109	-17.682	-5.071
v	徳島板野	3点	C1~4	36.772	-17.461	-4.729
vi	徳島板野	3点	C1~3	36.419	-17.583	-5.223

3. GPS/IMUの精度検証

姫路地区及び鳥取地区の撮影結果を利用し、「くにかぜⅡ」に設置したGPS/IMUの精度検証を行った。撮影の諸元を表-3に、標定図を図-10、図-11、飛行経路を図-12、図-13に示す。

表-3 姫路地区及び鳥取地区の撮影諸元

撮影地域	姫路地区	鳥取地区
撮影日	平成 16 年 5 月 21 日	平成 16 年 5 月 24 日
撮影縮尺	1/30,000	
撮影高度	4,700m	
コース数, 枚数	4 コース, 52 枚 (48 モデル)	3 コース, 46 枚 (43 モデル)
カメラ	RC30	
GPS/IMU	Applanix 社製 POS/AV510	
色	モノクロ	



図-10 姫路地区標定図

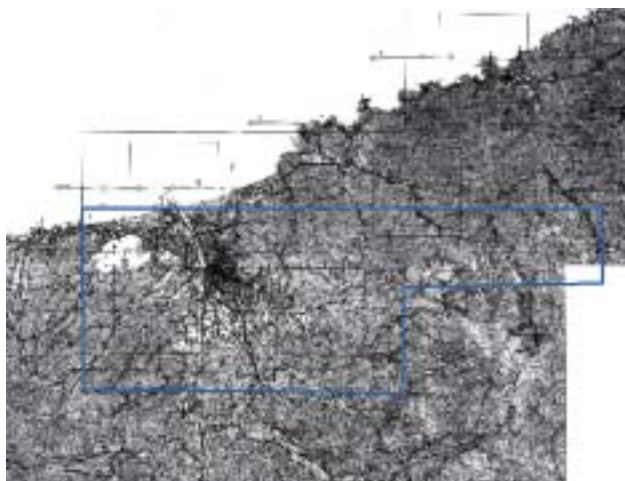


図-11 鳥取地区標定図（検証エリア：青枠）

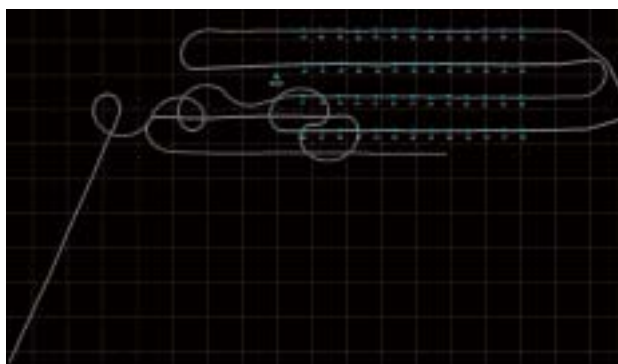


図-12 姫路地区撮影の飛行経路
(C3, C2, C1, C4の順に撮影)



図-13 鳥取地区撮影の飛行経路
(C5, C6, C4の順に撮影)

3.1 検証方法

2.の結果得られたミスアライメント角を利用して算出した外部標定要素をLPSにインポートし、各検証点について、画像計測値と現地GPS測量結果を比較することにより精度検証を行った。

3.2 検証点

検証点の測量は、2.3の標定点測量と同様に行った。検証エリア全体に均等に配置するように、姫路地区は40箇所、鳥取地区は43箇所の測量を行った（図-14）。



図-14 現地検証点測量（鳥取地区）

3.3 GPS/IMUデータ解析

時報第105集で報告したとおり、姫路地区、鳥取地区についてもGPSデータの取得状況が悪かった。両地区では、地上基準局1点を用いてGPS解析を行った(図-15、図-16)。姫路地域は、徳島石井地区と同様、各種設定を変えてGPS解析を繰り返し行うことで最終的にGPSとIMUの解の合成を行うことができたが、C3(撮影開始コース)の先頭から8枚分の写真については外部標定要素を算出することができなかった。

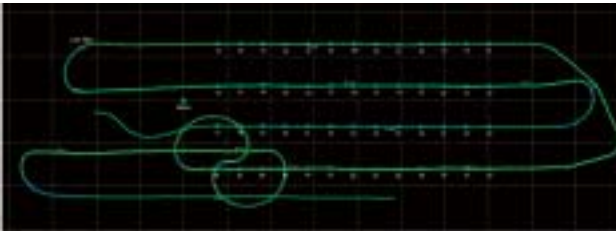


図-15 姫路地区のGPS解析結果

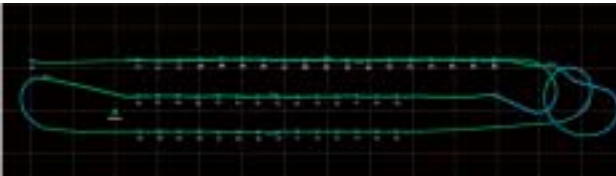


図-16 鳥取地区のGPS解析結果

3.4 精度検証結果

GPS/IMUによる外部標定要素を用いて検証点を計測する場合にも、内部標定を行う必要がある。2.3と同様に、数値化した空中写真の内部標定を行ったところ、作業規程の制限を満たした。

徳島石井地区は表-2のii、徳島板野地区はviのミスアライメント角を採用することとし、それらを元に算出した外部標定要素をLPSにインポートし、各検証点について画像計測を行い、現地GPS測量結果と比較した。あわせて、徳島石井、徳島板野地区についても標定点を検証点として使用し、同様の比較を行った。それらの結果をまとめて表-4に示す。また、姫路地区、鳥取地区の検証点における較差のグラフを図-17、図-18に示す。

検証点数は、姫路地区が33点、鳥取地区が34点、徳島石井地区が7点、徳島板野地区が9点である。検証点数が現地測量の点数より少ない理由は、姫路地区及び徳島石井地区については、前述のとおり、それぞれC3の一部、C4の全部が解析できなかったためである。鳥取地区については、3.5(後述)の検証のために北東に延びた部分を除外し、検証エリアを長方形にしたためである。

表-4 未補正の外部標定要素による検証点較差

地区	Cal.	X 較差		Y 較差		水平較差		Z 較差	
		RMS	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS	最大
姫	石	1.50	-2.73	0.38	1.08	1.55	2.79	1.77	2.82
姫	板	1.31	-2.24	0.42	1.09	1.37	2.27	1.79	3.07
鳥	石	1.16	-2.07	0.64	-2.19	1.32	2.28	1.82	3.05
鳥	板	1.10	2.32	0.66	-2.16	1.28	2.41	1.84	3.08
石	石	0.14	-0.22	0.08	0.13	0.16	0.24	0.14	0.29
石	板	0.11	-0.16	0.08	0.14	0.13	0.20	0.14	0.29
板	石	0.52	-0.87	0.76	-1.01	0.92	1.34	1.21	1.84
板	板	0.49	-0.81	0.75	-0.98	0.90	1.27	1.21	1.83

(単位:m)

※Cal.: ボアサイトキャリブレーションのサイト

※Xは東西方向, Yは南北方向, Zは鉛直方向。

※姫: 姫路, 鳥: 鳥取, 石: 徳島石井, 板: 徳島板野

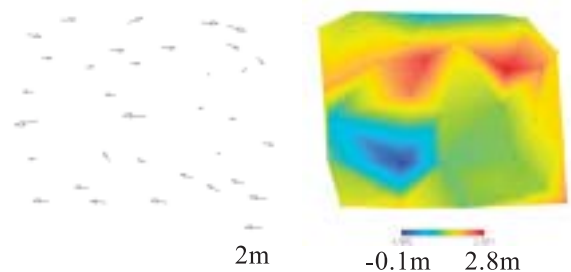


図-17 姫路地区の較差グラフ(左: 水平, 右: 鉛直)

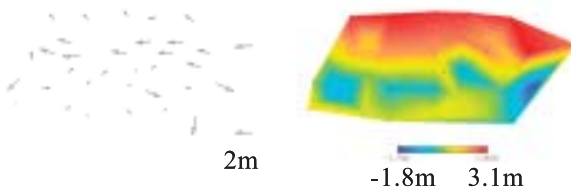


図-18 鳥取地区の較差グラフ(左: 水平, 右: 鉛直)

※図-17, 図-18とも、ボアサイトキャリブレーションを徳島石井地区で実施したもの。

姫路、鳥取地区ともに、Y方向よりもX方向に較差が大きく見られた。Z方向の較差も大きかった。同様にGPS/IMUを用いて縮尺1/30,000で撮影した三浦半島地区の検証結果(時報第105集で報告)と比較すると特にZ方向の精度が悪かった。

しかし、今回の検証点における較差は、地形図の要求精度(RMSで平面位置17.5m, 標高点3.3m, 等高線5m以内)を満たしており、地形図修正作業への適用可能性が十分にあることが確認できた。

特に、迅速性が重視される災害対応時の正射写真図作成などには、標定点不使用で精度確保が可能となるGPS/IMUは有効であると考えられる。

徳島石井、徳島板野地区については、検証点の数が少ないが、撮影縮尺の差を考慮しても徳島石井地区の方が精度が良いと考えられる。しかし、2.4で想定したとおり、両地区で算出されたミスアライメント角の較差は、最終的に地上の検証点における大きな較差としては現われなかった。このため、地形図修正のための縮尺1/30,000の撮影には、縮尺1/8,000の空中写真を用いたボアサイトキャリブレーションで十分対応可能であると言える。

3.5 外部評定要素の修正

姫路、鳥取地区について、精度向上のため、数点の検証点を標定点として用いてブロックの再調整計算を行い、残りの検証点について3.4と同様に精度検証を行った。

パスポイント及びタイポイントは、姫路地区は自動取得した後、目視で修正し、鳥取地区は手動で設定した。標定点として1点（ブロックの中央）、4点（ブロックの四隅）、5点（ブロックの四隅＋中央）を用いた場合の検証結果を表－5にまとめる。

標定点1点のみでは逆に精度が低下することもあるが、4点又は5点使用することで精度を向上することができた。標定点数が4点と5点の場合の精度の違いはあまり見られなかった。

4. まとめと今後

今回、「くにかぜⅡ」に設置したGPS/IMUの精度検証を行った。結果は、他で実施された精度検証結果やカタログ仕様に示された精度に達するものではなかった。これはGPSの受信状況が悪かったためと考えられる。一因として、時報第105集で述べたとおり、純正

品でない既存のアンテナの流用が考えられる。しかし、それでも地形図修正に適用可能なレベルの精度を得ることができた。

今後、実際に地形図修正作業にGPS/IMUを適用するためには、作業要領等を作成する必要がある。今回、カタログ仕様に届かない事例が得られたことは検討上有益であると考えられる。今後も事例を積み重ね、精度確保方法等について更に検証を進める必要がある。

表－5 補正後の外部標定要素による検証点較差

地区	Cat.	点	X 較差		Y 較差		水平較差		Z 較差	
			RMS	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS	最大
姫	石	0	1.50	-2.73	0.38	1.08	1.55	2.79	1.77	2.82
姫	石	1	1.39	-2.65	1.31	2.66	1.91	3.50	2.20	3.97
姫	石	4	0.44	1.09	0.57	1.36	0.72	1.37	1.11	1.83
姫	石	5	0.49	1.24	0.62	1.40	0.79	1.51	1.16	1.99
姫	板	0	1.31	-2.24	0.42	1.09	1.37	2.27	1.79	3.07
姫	板	1	1.23	-2.30	1.06	2.28	1.63	2.99	2.27	3.85
姫	板	4	0.49	1.33	0.59	1.37	0.77	1.66	1.43	2.45
姫	板	5	0.53	1.45	0.65	1.40	0.83	1.75	1.41	2.38
鳥	石	0	1.16	-2.07	0.64	-2.19	1.32	2.28	1.82	3.05
鳥	石	1	0.73	-2.18	1.04	-4.05	1.27	4.24	1.37	2.91
鳥	石	4	0.55	1.71	0.38	-1.26	0.67	1.76	1.01	2.21
鳥	石	5	0.48	1.55	0.38	-1.25	0.62	1.61	0.79	1.91
鳥	板	0	1.10	2.32	0.66	-2.16	1.28	2.41	1.84	3.08
鳥	板	1	0.63	-1.86	0.82	-3.45	1.04	3.51	1.42	3.19
鳥	板	4	0.54	1.69	0.37	-1.32	0.66	1.73	0.98	2.14
鳥	板	5	0.48	1.54	0.36	-1.31	0.60	1.58	0.83	2.29

※点数：使用した標定点の数

(単位:m)

参 考 文 献

- 中村孝之，下野隆洋，大木章一，須崎哲典（2004）：GPS/IMUの地形図作成への適用に関する調査研究，国土地理院時報第105集，p17-22.
- 須崎哲典，大木章一，山本嘉武，中野正広（2004）：GPS/IMUに関する調査研究，国土地理院調査研究年報（平成15年度），p49-52.
- 笹川 正，橘 菊生（2002）：空中写真直接定位システム（GPS/IMU）の現状と課題，（財）日本測量調査技術協会APA No.82-14，p92-97.
- 内田 修，織田和夫，真屋 学，土居原健（2003）：POS撮影精度管理法，（財）日本測量調査技術協会APA No.85-3，p23-45.
- Christian Heipke, Karsten Jacobsen, Helge Wegmann（編）（2002）：Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings, OEEPE Official Publication No.43.
- ライカジオシステムズ株式会社のGPS/IMUに関する各種資料.
- Applanix社ホームページ：http://www.applanix.com（accessed 15th Nov. 2004）.