GPS/IMU の地形図作成への適用に関する調査研究
Research on Application of GPS/IMU to Topographical Mapping

測図部　中村孝之・下野隆洋・大木章一
Topographic Department　Takayuki NAKAMURA, Takahiro SHIMONO, Shoichi OKI
北陸地方測量部　須崎哲典
Hokuriku Regional Survey Department　Tetsunori SUZAKI

要　旨

航空機搭載型 GPS/IMU の地形図作成、修正への適用可能性について検証を行ったので報告する。

具体的には、GPS/IMU の概要、GPS/IMU 導入による従来工程の変化、三浦半島における GPS/IMU データの精度検証結果などについて報告する。また、国土地理院保有の航空機「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する。

１．はじめに

GPS/IMU は、GPS と IMU（Inertial Measurement Unit：慣性計測装置）を組み合わせることにより、位置及び姿勢を高精度に求めることができる技術/システムである。

GPS/IMU は、航空レーザ測量には不可欠の技術であり既に利用されているが、空中写真測量への適用も進んできている。GPS/IMU を用いることにより、空中写真撮影時のカメラの位置と傾きを直接求めることができ、地形図の作成、修正等を効率的に行う手段として期待される。

今回、GPS/IMU の精度検証並びに直営撮影作業への適用を目指して行った「くにかぜⅡ」への取り付け及びデータ取得実験の結果を報告する。

２．GPS/IMU を用いた空中写真測量

２．１　使用機器

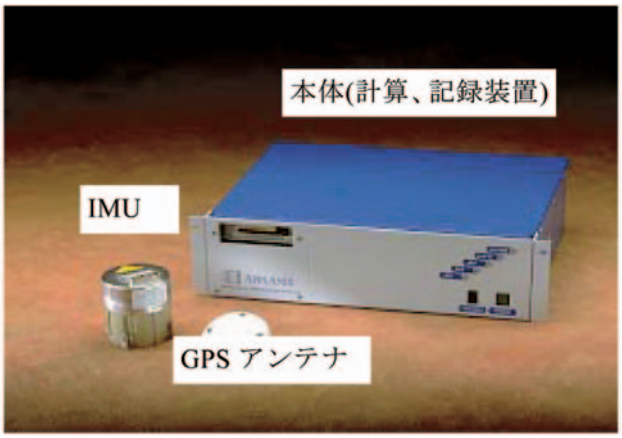
空中写真測量用の GPS/IMU としては、Applanix 社（カナダ）製の POS/AV システムと IGI 社（ドイツ）製の AEROcontrol システムが代表的であり、広く利用されている。

本研究では、POS/AV システムを使用した。POS/AV シリーズには IMU の精度の異なる３種類の製品があるが（表－１）、今回は最も精度の高いモデル 510 を使用した。研究には図－１のものを使用したが、現在では図－２のように小型化されている。

表－１　Applanix 社製 POS/AV の絶対精度（公称）

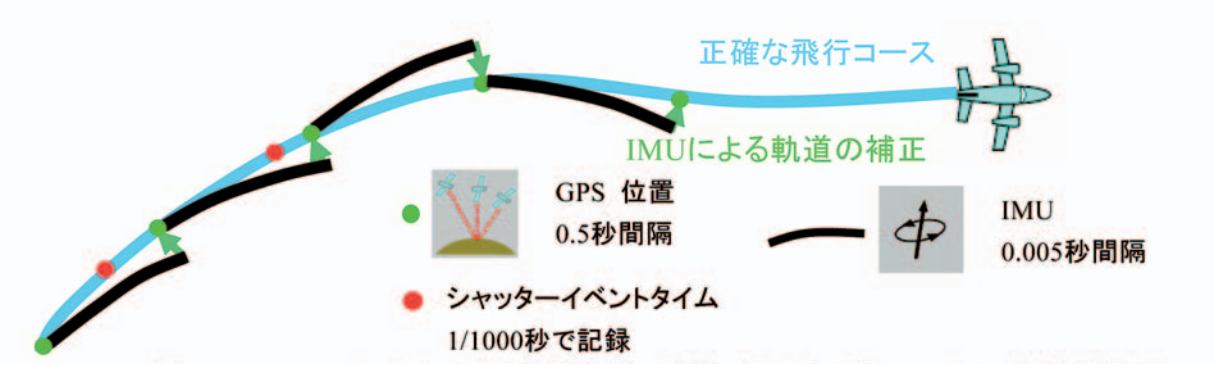
モデル	310	410	510
位置（m）	0.05 － 0.3	0.05 － 0.3	0.05 － 0.3
速度（m/s）	0.075	0.005	0.005
ロール、ピッチ（度）	0.015	0.008	0.005
ヘディング（度）	0.035	0.015	0.008

※表は、後処理キネマティック GPS 解析を行った場合である。DGPS の場合には、１桁程度精度が悪くなる。



図－１　Applanix 社製 POS/AV（研究で使用したもの）
（本体サイズ：34 × 48 × 11(cm)）

図－２　Applanix 社製 POS/AV 最新版
（本体サイズ：28 × 16.5 × 9(cm)）



図－３　GPS/IMU による正確な撮影位置の取得（ライカジオシステムズ社資料より）

２．２ 原理

GPS/IMU では、IMU により、カメラの傾き（ω，φ，κ）を求めるとともに、GPS を補間し正確な位置（X,Y,Z）を求める。

GPS を用いることにより、0.5 秒～１秒間隔での高精度な位置を取得できるが、その間に飛行機は数百m動くことになり、正確な軌跡が分からない。一方、IMU は 1/200 秒間隔でデータ取得ができるが（POS/AV システムの場合)、時間とともに誤差が増大する。そこで両者の長所を組み合わせて、飛行機の正確な軌跡を求め、シャッターを押した時刻の位置を求める（図－3)。

２．３ 工程の変化

GPS/IMU を用いる場合、従来、地上基準点を用いて後方交会法により間接的に求めていた各写真の外部標定要素（Ｘ，Ｙ，Ｚ，ω，φ，κ）を直接求めることができる。

このため、理想的には従来の写真測量工程における対空標識設置、標定点測量、空中三角測量といった作業が不要になり、代わりに GPS/IMU のデータ解析作業を行うことになる。データ解析の時間は状況により異なるが、データ取得が問題なく行われた場合には、通常、30 分～１時間程度で終えることができる。

撮影に当たっては、気象条件以外にも配慮が必要になる。GPS の基線解析により飛行機の位置を計算するため、事前に、地上基準局の準備と GPS 衛星の配置状況の確認を行う必要がある。前者には電子基準点を用いることができる。後者については、通常、PDOP が３以下の時間帯に撮影作業を行う。

また、飛行は表－２のように行う必要がある(POS/AV システムの場合。AEROcontrol システムについても同様と思われる)。5 分間の静止又は直線飛行は GPS の初期化のため、8 の字飛行は IMU の初期化のために行う。8 の字飛行中及び撮影中にバンク角を 20 度以内に保つのは GPS のサイクルスリップを避けるためである。このため、次のコースに入るのが大回りとなり、撮影時間は増加する。

表－２　GPS/IMU データ取得のための飛行方法

飛行場と撮影地区の距離が 30km 以下	飛行場と撮影地区の距離が 30km 以上
電源 ON	
２～５分間静止（システム初期化）	
データロギング開始 －５分間静止状態	
離　陸	
	撮影地区近傍でデータロギング開始 － GPS 地上局上空を撮影時と同高度・同速度で５分間直線飛行
撮影開始前５分以内に "8 の字 " 飛行※バンク角 20 度以内	
撮　影　※バンク角 20 度以内	
撮影終了後５分以内に "8 の字 " 飛行※バンク角 20 度以内	
	GPS 地上局上空を撮影時と同高度・同速度で５分間直線飛行 －データロギング終了
着　陸	
５分間静止状態でデータロギング －データロギング終了	
電源 OFF	

※ 同地区で撮影高度が異なる場合、各撮影高度での撮影前後に "8 の字 " 飛行

３．GPS/IMU の精度検証

GPS/IMU の精度検証として、データ解析結果として得られる各写真の外部標定要素をディジタル図化機にインポートし、広域に分布する 50 点の検証点について、ステレオ計測値と現地 GPS 測量結果を比較した。

３．１　使用データ等

撮影、空中写真画像の仕様を表－３に、標定図を図－４に示す。

表－３　撮影、空中写真画像の仕様等

コース数、枚数	6 コース　48 枚 1 日目：4 コース 29 枚 2 日目：2 コース 19 枚
撮影地域	三浦半島
撮影日	平成 15 年 10 月
撮影縮尺	1/30,000
撮影高度	4690m
カメラ	RC30
GPS/IMU	Applanix POS/AV510
色	カラー
画像の解像度	20 μ m ※写真測量用スキャナを使用

図－４　標定図

検証点の GPS 測量は、電子基準点を与点とし、2 周波 GPS 機器を用いてファストスタティック方式で 1 点につき 30 分間行ったものである（図－5）。

図－５　ファストスタティック GPS 測量

ステレオ計測等は、アジア航測社製ディジタル図化機「図化名人」を使用して行った。

３．２　GPS/IMU のデータ解析の結果

撮影は 2 日に渡って行われ、GPS 基線解析の与点のデータとして、1 日目は電子基準点の 30 秒データを 1 秒データに補間したものを使用した。2 日目は電子基準点の 1 秒データを使用した。

両日とも、GPS と IMU を合成した結果、X,Y,Z それぞれについて標準偏差で 20cm 程度に収まっていた。

３．３　精度検証の結果

GPS/IMU による外部標定要素を用いる場合でも、内部標定は行わなければならない。内部標定を行ったところ、基本図測量作業規程の制限を満たした。

外部標定要素をインポートした後、まず、視差（縦視差）について確認した。若干の視差があるモデルもあったが、ほとんどのモデルが十分拡大を行っても問題無いものであった。

現地 GPS 測量結果と比較した結果を表－４に示す。

表－４　GPS/IMU による外部標定要素を用いてステレオ計測した値と現地 GPS 測量結果の比較

範囲	全体	1 日目	2 日目
検証点数	50	24	26
水平較差 RMS (m)	1.08	0.92	1.21
水平較差 最大値 (m)	1.98	1.81	1.98
鉛直較差 RMS (m)	0.58	0.52	0.63
鉛直較差 最大値 (m)	1.37	1.37	0.91

較差のRMSは水平方向が約1m、鉛直方向が約0.6mであり、最大値は水平方向が2m弱、鉛直方向が1.5m弱であった。誤差が大きかったものについて確認したところ、その多くは視差のあるモデルで計測した検証点であった。前述のとおり、今回、1日目の解析では電子基準点の30秒データを1秒に補間して用いたが、2日目との違いはほとんど見られなかった。

基本図測量作業規程では、2万5千分1地形図（以下、地形図）の要求精度は、平面位置17.5m、標高点3.3m、等高線5m以内と定められている。検証点における較差は、地形図の要求精度と比較して非常に小さく、地形図作成にGPS/IMU技術を適用できる可能性が示された。

３．４　空中三角測量結果との比較

当該地域については、別途、ディジタル図化機の精度検証として、同じ空中写真画像とディジタル図化機を用いて手動で空中三角測量を行い、同じ現地GPS測量結果と比較を行っている。空中三角測量の検証結果は、RMSで水平方向約0.8m、鉛直方向約0.9mであった。

ディジタル図化機の精度検証を行った範囲は、GPS/IMUの精度検証を行った範囲よりも若干狭い。比較のため、共通に使用した検証点34点のみで両者の精度を検証した結果を表－5に示す。

表－５　GPS/IMUと空中三角測量の精度比較

範囲	GPS/IMU	空中三角測量
水平較差 RMS（ｍ）	1.08	0.73
水平較差 最大値（ｍ）	1.98	1.73
鉛直較差 RMS（ｍ）	0.56	0.84
鉛直較差 最大値（ｍ）	1.39	1.72

両者で計測者は異なるが、水平方向については手動で空中三角測量を行った結果の方が良く、鉛直方向についてはGPS/IMUを用いたものの方が良かった。

GPS/IMUを用いることで、従来の地上基準点を用いた標定と同程度又はそれ以上の成果が得られる可能性があることを確認した。

なお、単純に、両者の外部標定要素同士を比較してみたところ、Ｘ，Ｙ，Ｚについては、1ｍ程度の較差であり、ω，φ，κについては、0.015度程度の較差であり、概ね表－１の精度と整合していた。

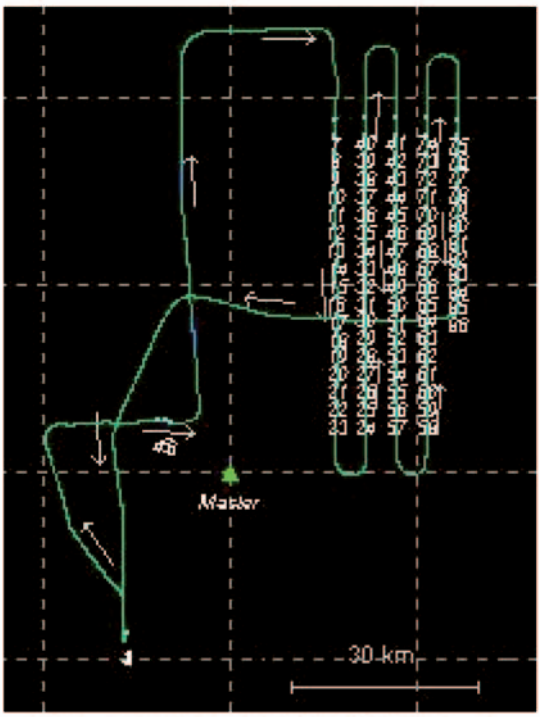
４．くにかぜⅡへの適用実験

GPS/IMUの地形図作成、修正への適用可能性が確認できたため、「くにかぜⅡ」へPOS/AV510を取り付け、正常にデータ取得できるか確認実験を行った。

４．１　データ取得実験１

４．１．１　日時、場所

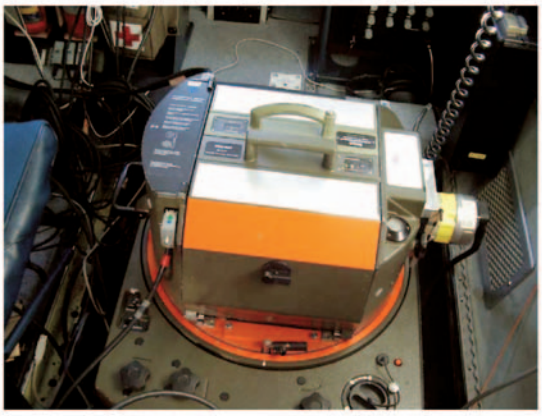
確認実験日時　：平成15年11月18日
確認実験場所　：海上自衛隊下総基地
フライトエリア：つくば・水戸地区（図－6）



図－６　つくば・水戸地区の飛行コース

４．１．２　実施方法及び実施状況

POS/AV専用のGPSアンテナを「くにかぜⅡ」に新たに取り付ける事が望ましいが、地磁気観測用に使用している既存の2周波GPSアンテナを使用することとした。GPSアンテナは低ノイズアンプと専用の変換コネクタを経由してPOS/AVの本体に接続した。IMUは、RC-30のドライブユニットに取り付け済みのものを借用し、ドライブユニットごと交換する方法で設置した（図－7）。



図－７　IMU の取り付け状況

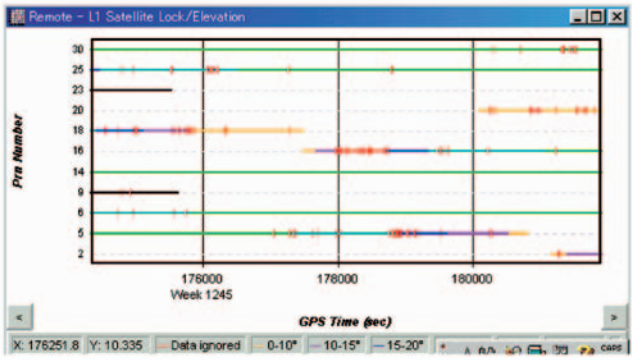
表－２のとおり、GPS/IMU のデータ取得前と取得後に GPS の初期化が必要であるが、データ取得前については､離陸前に５分間停止状態を保つ方法で行った。データ取得後については、飛行中５分間の等速水平飛行を取る方法を試みた。しかし、飛行コースが航空機の過密なエリアであったため、高度を一定に保つことができず実施できなかった。このようなエリアでは、離陸前と同様、着陸後に５分間停止状態を保つ方法を適用する必要がある。

また、IMU の初期化として８の字飛行が必要だが、今回は省略した。バンク角を 20°以内に保つことについては、操縦士への負担を考慮し行わなかった。実験当日は GPS 衛星の配置状況等の条件が悪かったため、GPS 受信時の PDOP 値は悪かった。

４．１．３　実施結果

「くにかぜⅡ」に GPS/IMU を搭載し動作させることが可能であることが確認できた。

データ取得結果は、直進飛行中と思われる時間帯でもサイクルスリップが頻発し（図－８)､解析の結果、ほとんどがフロート解となった。



図－８　サイクルスリップの発生状況
（グラフの縦線がサイクルスリップ）

別の日に、IMU を設置せず、GPS アンテナ、低ノイズアンプ、GPS 受信機の組み合わせで GPS データを取得したが、同様のサイクルスリップが認められた。

サイクルスリップ発生の原因としては、無線交信中のノイズの影響、GPS アンテナ自身の受信感度が低い事、低ノイズアンプの不良などが考えられた。

ただ、今回、撮影方法を簡略化し、かつ、受信状況が悪かったにも関わらず、GPS と IMU のデータの合成解は、X,Y,Z それぞれについて標準偏差が 20cm 以内であった。撮影縮尺 1/30,000 で地形図修正を実施する場合、位置精度を十分に確保できる値と考えられる。

４．２　データ取得実験２

４．２．１　日時、場所

確認実験日時
：平成 16 年５月下旬
確認実験場所　：海上自衛隊徳島基地
フライト：
　徳島石井地区（縮尺 1/4,000）
　徳島板野地区（縮尺 1/8,000）
　姫路地区　（縮尺 1/30,000）
　鳥取地区　（縮尺 1/30,000）

４．２．２　実施方法及び実施状況

4.1 でサイクルスリップが発生した原因について調査したところ、POS/AV 本体から「くにかぜⅡ」設置の GPS アンテナへの供給電圧が足りず（POS/AV 専用アンテナを使用する場合は問題ない)、また、低ノイズアンプが正常動作するための電圧にも達していなかったことが判明した。そこで、通常「くにかぜⅡ」で使用している受信機からアンテナへ電圧を供給し、アンテナで取得したデータを POS/AV 本体に取り込むよう接続を修正した。また、変換コネクタにも接続不良がみられたため、修理した。

これらの改善を行った上で、再度、データ取得実験を行うこととした。

実際に GPS/IMU を使用する場合には、年に一度ボアサイトキャリブレーションを行う必要がある。利用者が最終的に必要なものは空中写真の主点の位置、傾きであるが、GPS は航空機の上に取り付けられ、IMU も３軸が必ずしもカメラの軸とは一致しない。このような、機器の取り付けに係る誤差を除去するために行うのがボアサイトキャリブレーションであり、大縮尺（縮尺 1/4,000 程度）の写真（4 コースで１コース 10 モデル程度）を用いて、空中三角測量を行うこととなる。

今回は、このような作業も見据えた大縮尺での撮影と、通常縮尺での撮影を行い、正常にデータが取得できるか確認を行った。

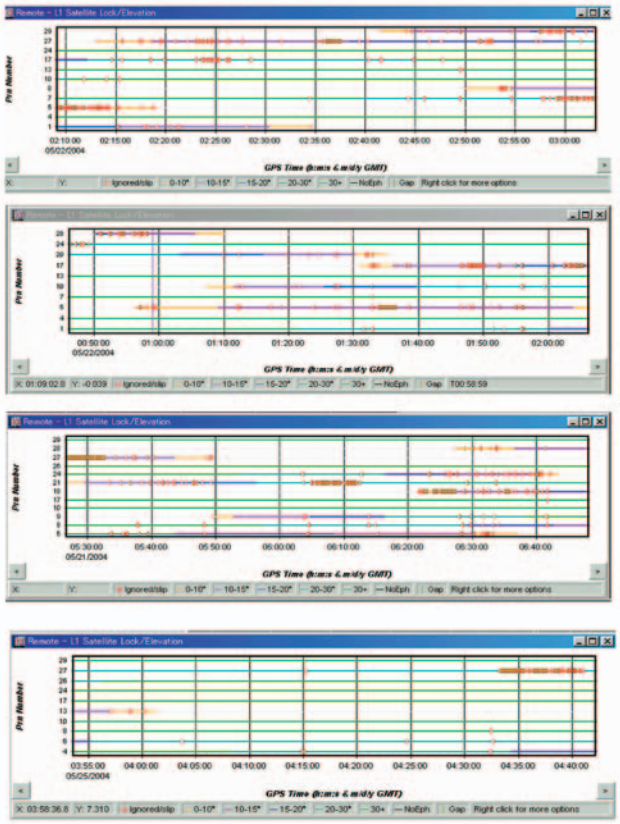
IMU は国土地理院の RC-30 のドライブユニットに取り付けた（図－9)。撮影も 8 の字飛行を行い、かつ、バンク角も 20 度以内に保つなど、本来の方法で行った。GPS 衛星の配置状況も良好であり、PDOP 値も規定の 3 以下であった。

図－9　IMU の取り付け状況

4．2．3　実施結果

4.1 と同様 GPS のサイクルスリップが発生した（図－10)。無線交信中のノイズの影響を調べるため、撮影中に機内の録音を行ったが、サイクルスリップ発生時に交信を行っていないことや逆に交信を行っているときにサイクルスリップが発生していないことがあり、無線の影響は少ないと考えられる。現状では、POS/AV 純正の GPS アンテナを使用していないことがサイクルスリップの原因の有力候補であると考えている。

今回、GPS についてサイクルスリップがあったものの、フィックス解を得られ、また、GPS と IMU のデータの合成解はＸ，Ｙ，Ｚそれぞれについて標準偏差が 5cm 以下と 4.1 よりも更に良好な結果であった（姫路地区のみ 20cm 以下)。



図－10　サイクルスリップの発生状況
（グラフの縦線がサイクルスリップ）
（上から、石井、板野、姫路、鳥取地区）

5．今後の予定

今回の調査で GPS/IMU を地形図作成、修正作業に十分適用できる可能性があることが確認できた。

今後は、「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及び地形図数面分のテストエリアにおける精度検証作業を実施する予定である。

謝　辞

今回検証に使用した空中写真画像等のデータ提供をいただいた共立航空株式会社及び GPS/IMU の設置実験等にご協力いただいたライカジオシステムズ株式会社に感謝いたします。

参　考　文　献

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
中村孝之、渡辺信之、下野隆洋、大木章一、登坂昇、須崎哲典（2004)：ディジタルステレオ図化機の精度検証、国土地理院時報第 105 集
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)
Applanix 社ホームページ：http://www.applanix.com/