GPS/IMU の最新動向

Leading-edge Trend of GPS/IMU

熊谷 秀夫*

Hideo KUMAGAI

Abstract : A GPS/IMU hybrid Inertial Navigation System is applied in wide range field to determine the position, attitude and heading. This paper introduces the various GPS/INS Systems and its Leading-edge Trend.

1. はじめに

移動体の姿勢・方位・位置を知る要求は、航空機・車両・ロボットを初めとした多くの運動体制御に必要であるばかりではなく、移動体を用いた測位・測量においても極めて重要になって来た。それらの場合、慣性センサ（ジャイロ・加速度計）を用いた慣性計測装置を使うこと（航空機の場合は、慣性航法装置）が一般的であるが、それらが加速度・角速度を用いた積分による計測である為に、得られた情報（姿勢・方位・位置）の誤差が時間と共に増大することが避けられず、その克服の為に GPS などの外部情報を有効に活用する GPS（Global Positioning System）/IMU（Inertial Measurement Unit）と言う商品が広く出回っている。これは、GPS の位置データが長時間に亘り安定していると言う長所を生かし、一方でそれ自身では姿勢・方位が検出できない（ある程度の領域意があれば可能な商品もある）、データ更新が遅い、電波状況に影響を受けるなどの短所を元々外部に依存しない性質の IMU により補強することで、お互いの長所のみを引き出す“Naturally Married”な Hybrid システムである。

2. GPS/IMU（複合慣性計測装置）

GPS/IMU は運動体の姿勢・方位・位置を検出するものであるが、その用途によっては GPS の使い方、

IMU の種類、アルゴリズムなど様々な方式が存在する。安全性を最重要視する航空機搭載の装置と、リアルタイム性を必要とせず最高精度を必要とする写真測量用の装置（最近は価格要求も重要な要因）、価格最重視な建機用計測装置など様々であるが、慣性センサ信号と GPS 信号とを最適に処理・演算するという基本構成は殆ど同じである。

2.1 システム構成

一般的な GPS/IMU のシステムは、3 軸角速度、3 軸加速度、GPS（単独測位、Differential 測位、搬送波測位）測位情報を入力し、コンピュータを用いて、慣性演算、カルマンフィルタ演算などを行い、姿勢・方位・速度・位置結果を出力するものである。リアルタイムに行う場合と、記録されたデータを使ってオフラインで行う場合があり、精度を必要とする測量装置などでは、オフライン処理が多用されている。

2.2 アルゴリズム

加速度計と角速度計を用いた慣性演算のアルゴリズムを Fig.1 に示す。この 6 自由度の慣性データを用いてストラップダウン演算により姿勢・方位を計算し、座標変換により極地水平面での速度を計算、さらにそれらを地球座標に変換し、地球上での姿勢・方位・速度・位置の出力を行うものである。

ここで紹介する計算座標は所謂 Wander-Azimuth（自由方位座標）と言われるもので、地球上の位置変化により、初期方位を補正して行くものである。

*多摩川精機株式会社

Tamagawa Seiki Co., Ltd.

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO.5, 2010

Fig. 1 慣性演算アルゴリズム

Fig. 1 のような慣性演算アルゴリズムでは出力されるデータが積分系である為に、常に誤差の変化（ドリフト）と言う問題を抱えており、それらを改善する為に状態推定フィルター（カルマンフィルタ）を用いる場合が多いが、大別して2種類の方式が用いられている。

2.2.1 Loose Coupling

これは、慣性装置を主として位置・姿勢情報を連続的に計算し、GPS から出力される位置・速度情報により慣性装置誤差を補正する方法である。この場合 GPS はリファレンスとして機能し、万一 GPS が遮断された場合は、慣性装置の信号のみで計測を行うが、直前までの慣性センサの補正が有効に機能し、慣性装置単独の場合と比較して、補正によりそれ等が相当な高精度センサとして機能することが出来る。また地上用途の場合は、GPS 遮断時に車両速度をリファレンスとするなどのアルゴリズムも用いることが出来る。これらは多くの装置で用いられているアルゴリズムであり、またオフラインでは、これらの演算を Forward と Backward で行って、更に精度を高める装置も存在している。

一般的な Loose Coupling のアルゴリズムを Fig. 2 に示す。図中の※ 1, 2, 3 は Fig. 1 からの引用である。

2.2.2 Tight Coupling

慣性装置、GPS どちらにも補正を行う方式であり、Loose Coupling に比較して精度の向上と GPS の最大限の活用（例えば測位衛星数が不足しても推定を行うことが可能になる）が見込めるが、アルゴリズムは複雑になるので、あまり一般的ではない。

2.3 カルマンフィルタ

GPS/IMU で用いられる代表的なカルマンフィルタ

Fig. 2 Loose Coupling アルゴリズム

Table 1 GPS/IMU の状態変数

位置誤差（緯度・経度・高度）
速度誤差（北向き速度・東向き速度・下向き速度）
姿勢（ロール角・ピッチ角）誤差・方位角誤差
3 軸ジャイロバイアス
3 軸加速度計バイアス
車両速度スケールファクタ誤差
車両速度バイアス

における状態変数を Table 1 に示す。地上用では、車両速度に関する誤差情報も用いられる。これらの得られた推定値をストラップダウン演算に補正量としてフィードバックするクローズループ型と得られた推定値で出力値を補正するオープンループ型があるが、一般的にはクローズループ型が多い。

3. 用途別 GPS/IMU の紹介

GPS/IMUの機能・構成はそれ程変わらないが、用途により複合航法の機能が大きく異なっている。信頼性を重視する航空機用では、データの Integrity (確実性) を確保する為に、慣性装置を主体的にして、GPS が使える条件を厳しく制限しているが、測量用などでは逆に GPS の出力間隔を慣性装置で補間する為に、GPS を積極的に用いるシステムとなっている。また地上用では、車両速度を有効的に使って、精度向上を図っている。現在、価格的には IMU が大きな比重を占めるので、用途に応じて IMU の精度・コスト・信頼性を考慮したシステム構成となっている。

3.1 大型民間航空機用 GPS/INS (Inertial Navigation System)

大型民間航空機の代表である B787 と A380 に用いられる慣性航法装置について紹介する。航空機運用であり装置の信頼性が最重要としながらも、それぞれ特徴のあるシステムである。

3.2 Boeing 787

このシステムは、IMUとして小型RLG（Ring Laser Gyro）とサーボ加速度計を用いており、従来からの高精度IMUである。GPS複合航法を行うが、GPS装置としてのFAA認定を得ているもので、基本はIMUの純慣性精度（2 nm/h：nmは1852m）である。Fig. 3にそれらの構成を示す。

3.3 Airbus 380

このシステムはIMUとしてFOG（Fiber Optic Gyro）とMEMS加速度計（共振型）を用いており、IMUの精度不足をGPS信号のIntegrityを向上させることで航空機用としての運用を可能としている。Fig. 4にそれらの構成を示す。

3.4 小型民間航空機用 GPS/INS

このシステムはIMUとしてMEMS ジャイロ、MEMS 加速度計を用いており、それにより姿勢・方位

を出力し、位置速度信号はGPS信号をそのまま用いている。精度向上にはGPS/IMUの複合化が必要であるが、カルマンフィルタなどの複雑なソフトウェアの航空機用認証(DO-178B)取得の難しさから、単独での運用を行っている。複合航法を使用する代わりに大気速度、気圧高度を用いたダンピング機能で姿勢角精度を維持し、磁気方位センサとのダンピングで方位信号のドリフトを除去している。Fig. 5にそれらの構成を示す。

3.5 測量用 GPS/IMU

慣性計測装置は航空機用途から開発され、それらのハードウェアをベースに航空測量用システムが開発されて来ているが、この分野は信頼性よりも精度や価格重視であり、その概念は大きく異なっている。また、後処理でも問題が無い為に、低価格なIMUを如何にGPS信号で高精度化するかが鍵となっており、その為にGPSは測量と言う観点で搬送波の受信機が多く使用されて来た。

Fig. 3 B787用 GPS/IMU

Fig. 4 A380用 GPS/IMU

FAA CERTIFIED

外形	4.66"x4.53"x4.863"
重量	3.5LBS
姿勢・方位	Att. 1.0 deg Head 2.0 deg
FAA	DO-160、D-178B
TSO	C4c,C6d
Interface	RS-232

Fig. 5 小型民間機用 GPS/IMU

3.5.1 Applanix 社

測量用高精度 GPS/IMU では最も有名であり、POSLV, POSAV, POSMV というシリーズでの複合システムがあり、長年の経験によりいろいろな複合形態と運用における異常データの適切な処理に強みを持っている。Table 2 にそれぞれのシステムの複合形態を示す。

このシステムは後処理で使われることが多く、GPS 搬送波処理の後 Loose Coupling による複合アルゴリズムにより、姿勢角精度、方位角精度も向上する。特に POSAV は航空写真測量などに使われ、カメラの位置、角度を正確に計測することが出来る為、地上の評定点無しに空三処理を行うことが出来る。また

Table 2 Applanix 社 GPS/IMU 複合形態

名称	IMU	複合形態	精度(Real)	精度(Post)
POSLV	Miniature RLG FOG MEMS	搬送波 DGPS DMI (車両速度)	20~30cm	3.5~5 cm
POSAV		搬送波 DGPS	0.5~2.0m	5~30cm
POSMV		搬送波 DGPS	2~10cm	—

※詳細は WEB 参照

POSLV は地上の地形計測を行う最に良く使用され、GPS のマルチパスや受信感度低下などによる誤差をスムーズに補正する機能を持っている。それぞれの製品を Fig. 6 に示す。

3.5.2 iMAR 社

防衛・航空分野で使われている慣性計測装置を測量用として PR している。主に Real Time 処理であるが、GPS への IMU 情報入力により再捕捉時の追尾時間短縮、測位計算支援、マルチパスの検出に役立てる他、IMU の種類により精度が異なっている。IMU としては、MEMS, FOG, RLG があるが、Fig. 7 に FOG タイプと RLG タイプの GPS/IMU を示す。

3.5.3 Novatel 社

測量用高精度 GPS/IMU を扱っており、Real Time 処理は一般的な GPS/IMU 複合航法であるが、Post 処理に Inertial Explore と言われる搬送波 GPS 解析と複合航法処理ソフトウェアを持っているのが特徴である。これは、Applanix 社の処理ソフト POSPac と酷似しており、複合航法アルゴリズムとしては解析能力、GUI (Graphic User Interface) と同じである。Inertial Explore による処理と各種 IMU との性能比較を Table 3 に示し、Novatel 社の GPS/IMU を Fig. 8 に示す。

3.5.4 三菱電機株

同社が開発した MMS (Mobile Mapping System)

FOG

RLG

Fig. 7 iMAR 社 GPS/IMU

POSLV

POSAV

POSMV

Fig. 6 Applanix 社の POS シリーズ

Table 3 Inertial Explore による各種 IMU での性能比較

IMU	MFG	位置精度(m)		姿勢精度 (deg)	方位精度 (deg)
		水平	垂直		
LN200	Northrop	0.01	0.015	0.005	0.008
AG58	Honeywell	0.01	0.015	0.007	0.010
iMAR(RLG)	iMAR	0.01	0.015	0.008	0.012
AG62	Honeywell	0.01	0.015	0.015	0.035
SPAN-CPT	Novatel	0.01	0.015	0.030	0.055

外形	6.00"x6.60"x3.5"
重量	4.3LBS
姿勢・方位	Att.0.015 deg Head 0.05 deg
Interface	RS-232/CAN

Fig. 8 Novatel 社の GPS/IMU

に搭載されている GPS/IMU/オドメトリ複合航法装置であり、GPS の擬似距離を用いた Tight Coupling 航法を特徴としている。Fig. 9 にそのアルゴリズムを示す。また、この GPS/IMU を用いたシステムとしての位置精度は、GPS 可視区域において平均で 5 mm、標準偏差で 9.5mm である。

3.5.5 多摩川精機㈱

民間航空機用に JAXA と共同開発した MSAS-

Fig. 9 三菱電機 GPS/IMU/オドメトリ複合アルゴリズム

GAIA 並びに測量用として Inertial Explore で処理できるシステム、また MEMS を用いた Micro-GAIA などがある。それぞれの構成並びに特徴を Fig. 10 に示す。

MSAS-GAIA

(MTSAT Satellite-based Augmentation System GPS Aided Inertial-navigation Avionics)

GPS 搬送波による擬似距離と慣性装置を複合化した Tight Coupling 型複合航法装置であり、GPS 情報の他 MSAS 信号、中波ビーコンによる補正を可能にした、小型・軽量の GPS/IMU である。複合航法ソフトウェアは JAXA からのライセンスである。

Inertial Explore を用いた測量用 GPS/IMU

この GPS/IMU は、Novatel 社と同様に RLG 又は FOG を用いた IMU と GPS のデータを同期させて取得し、Inertial Explore で複合処理が可能になるようなシステムである。海外製のこれらの装置は、IMU が故障した際などの輸出入に時間が掛かるので、国産品での対応を考慮した商品である。

外形	10.23"x5.90"x6.3"
重量	13.2LBS
姿勢・方位	Att. 0.03 deg Head 0.2 deg
位置精度	水平 1m 垂直 2m
Interface	MIL-STD-1553B

外形	2.75"x3.54"x3.35"
重量	1.2LBS
姿勢・方位	Att. 0.1 deg Head 2 deg
位置精度	GPS 遮断後 1 分間の水平位置 22m(1σ)
Interface	RS-232C

Fig. 10 多摩川精機の GPS/IMU

Micro-GAIA

価格・性能とも小型航空機に搭載可能な慣性航法装置として MEMS ジャイロ・MEMS 加速度計・小型 GPS 受信機を用いた GPS/IMU である。内蔵するソフトウェアは JAXA にて開発された MSAS-GAIA を改造したものであるが、慣性センサの誤差の特徴を正確に把握し、ジャイロ・加速度計のバイアスを高精度に推定することで、移動体の真方位を検出することが出来るだけでなく、GPS 信号遮断時には純慣性で位置を計測することが出来るのが特徴である。最近では、Z 軸のジャイロを FOG にした方位精度向上版も開発されている。

3.6 MEMS Based GPS/IMU

MEMS 慣性センサ（ジャイロ・加速度計）が数多く開発されていることもあり、それらを用いた GPS/IMU も多数商品化されている。しかし、それぞれのセンサの性能、また複合化する GPS の性能、更に内蔵されるアルゴリズムにより GPS/IMU としての価格・性能は様々であり、運用に当たっては十分な調査が必要であるが、測量用途としては、3 次元測位用車両に搭載した事例が存在する。また以下の URL には、500g 以下の GPS/IMU のリストがあるので参考にして頂きたい。

<http://damien.douxchamps.net/research/imu/>

4. 今後の技術動向

測量用途に着目した今後の技術トレンドについて概説する。

4.1 慣性センサのトレンド

ジャイロのトレンドとしては、高精度版は IFOG (Interferometric FOG) が主流となり、普及版として MEMS ジャイロが広く使用されると思われる。また加速度計は既に多くの MEMS タイプが高精度版の領域（共振型と言われるタイプ）でも使用され始めており、普及型では益々使用されると思われる。特に従来 RLG を用いて高精度計測して来た分野が FOG、FOG の分野が MEMS という段階に入っていく。また GPS/IMU という領域では、如何に慣性センサのノイズ特性を同定し、複合航法演算に組み入れるかが需要であり、その意味ではノイズの再現性に優れた慣性センサが有効である。

4.2 GPS 測位のトレンド

測量では搬送波を用いた KGPS や基線解析が一般的であるが、昨今ではマルチ GNSS (Global Navigation Satellite System) と言う、複数の測位システム (GPS, GLONASS, Galileo) を使うことでリアルタイム精度を向上させる技術が進んでいる。最近 NavCom 社は StarFire という技術で、GPS+GLONASS システムでリアルタイム 10cm 精度を実現できるシステムを開発している。

4.3 複合化のトレンド

上記慣性センサのトレンドと GPS 測位のトレンドにより、今後の GPS/IMU の複合化は、慣性センサの特性を正確に同定し、リアルタイムで観測値としての高精度 GPS 測位データを使うことにより、従来オフラインでしか達成し得なかった高精度姿勢・方位・位置計測システムがリアルタイムで可能になり、航空写真測量や地上の 3 次元計測などに更に容易に運用できるようになる可能性がある。また、この複合化は本年打ち上げが予定されている準天頂衛星により得られる GPS 測位精度と同等であり、そちら側の運用にも期待できるところである。

参考文献

- (1) 滝口純一，橋詰 匠，2010，モバイルマッピングシステムにおける GPS/IMU/オドメトリ複合航法のデータ処理と精度管理，Vol. 32，March，日本信賴性学会誌「信賴性」。
- (2) 富田博史，張替正敏，小久江幸二，塩澤良明，GPS 補強型慣性航法装置 (GAIA) インフライトアライメント機能の飛行実証，第 43 回飛行機シンポジウム講演集，2005，pp.320-324。
- (3) 藤原 健，富田博史，張替正敏，小型航空機に適した航法システムの開発と飛行評価～MEMS GPS/INS 航法システム“Micro-GAIA”～，第 43 回飛行機シンポジウム講演集，2005，pp.631-637。
- (4) IP-S2 Lite, Mobile Mapping System
http://www.topcon.co.jp/positioning/pdf/ip_s2lite.pdf
- (5) 多摩川精機(株)編：ジャイロ活用技術入門，工業調査会，2002。