飛行実験による慣性基準装置の位置誤差

藤田 光紘*・松崎 文孝**

In-Flight Evaluation of IRS Positioning Errors

Mitsuhiro FUJITA and Fumitaka MATSUZAKI

Abstract

Automatic Dependent Surveillance (ADS) is a new surveillance system using a data link for air traffic services. Basic ADS Block, one of the data blocks in ADS report, includes three-dimensional position, time and Figure Of Merit (FOM). FOM is a newly-adopted performance index represented by 8 levels that notifies the capability of onboard navigation system to air traffic controllers. Each level is defined by 95% probabilities of position determination errors.

We evaluated Inertial Reference System (IRS) positioning errors with reference to GPS-derived positions to validate the correctness of FOM levels by flight tests. We also showed the variation of IRS positioning errors to the flight progress.

1. はじめに

将来の航空機監視システムとして、自動従属監視 (Automatic Dependent Surveillance: ADS) の研究が各国で行われている。国際民間航空機関 (ICAO) の ADS パネル (ADSP) によれば、ADS とは^①、航空機の搭載航法 / 位置確認システムから得られる情報を、データリンクにより自動的に地上の管制機関に送信し、航空機を監視する方式である。この情報には、最低航空機の識別符号と 3 次元の位置情報が含まれ、その他の情報も必要に応じて提供される。地上へ通報する基本的な ADS メッセージには緯度、経度、高度、時間に加え、どのような状況で得られた位置情報および精度であることを示す FOM (Figure Of Merit: 航法性能指標又は航法性能指数) が含まれることとなっている。

ADS で航空機を監視する場合、航空機によって搭載している航法装置および使用状況が異なるときは、その監視方法も航空機ごとに異なる。そのため、この FOM は後に詳しく述べるが、ICAO の ADSP の運用についての手引書では、レベル 0 から 7 まで 8 段階に分ける方法を提案^②している。ここでは ADS の位置情報源として、慣性基準装置 (IRS) の場合、現在提案されている FOM レベルで適切かどうかの検証を行うため、小型機に IRS を搭載し飛行実験を行った。この実験では、飛行時間が 4 時間以内での位置決定精度の評価を、GPS を基準にして飛行経過 30 分ごとに、95% 確率で位置誤差を算出する方法を試みた。また、飛行時間に対して連続的に位置誤差を求めたので、以下に報告する。

2. 実験の概要

2.1 ADS (自動従属監視) メッセージの内容

ICAO の航空移動通信パネルで策定された ADS メッセージの内容は、必ず通報しなければならない基本的なメッセージ項目として、航空機の①位置 (緯度、経度)、②高度、③時間、④FOM が含まれる。その他のメッセージとして速度、ヘッディング、昇降率、次のウェイポイント (飛行経路上の通過点) の位

* 正会員 運輸省電子航法研究所 (〒181 東京都三鷹市新川 6-38-1)

** 非会員 運輸省電子航法研究所 (〒181 東京都三鷹市新川 6-38-1)

置と高度、気象情報などがあるが、これらは地上の管制側からの要求に応じて送信することになっている。

2.2 FOM(航法性能指標)の内容

地上の管制官は、ADSを有効に利用するために航空機のADSメッセージとして、位置の決定方法およびその位置精度なども把握しておく必要がある。ICAOのADSPはその位置精度等の航法性能を示す指標としてFOMをADSの要件の1つとした。FOMの内容は、次のようになっている。

- (1) FOMには航法装置の冗長性、即ち1つの航法装置により得られた位置情報であるか、2つ以上の航法装置によるものであるかを示すこと、
- (2) 航空機の航行指示のために、現に使用されている装置のその時点における位置決定精度(95%確率)が含まれること、
- (3) それらのFOMの情報は機上からのADS情報に付加して送信されること。

このFOMは8ビットからなり、うち1ビットが上記(1)の冗長性を、3ビットが(2)の位置決定精度を8レベルで表し、次の1ビットが衝突予防装置のステータスを表し、残り3ビットは将来における使用のために留保されている。表1は提案されているFOMレベルを示す。

例えば、航法装置としてIRSを使用し2時間以内の洋上飛行をする場合、FOMレベルは4で、そのときの位置決定精度は4NM未満(95%確率)でなければならないとされている。このためIRSによりこのような位置決定精度が、確かに得られるかどうかを飛行実験により評価することにした。

2.3 実験に使用した航法装置

実験では表2に示すIRS(リットン製)を使用した。また、比較のための航法装置としてGPS(トリンプ製)を使用し、それらは当研究所の実験用航空機ビーチクラフトB-99型機に搭載した。

2.3.1 IRS

IRSは航空機の位置決定を行う自立航法装置⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾として主に使用される。その原理は航空機が航行することによって生じる三軸方向の加速度を検出し、それらを積分することで速度が求まり、さらに速度を積分することで移動距離が求まるものである。IRSはこのほか航空機機体の姿勢検出センサーとしても使用されている。実験に用いたIRSはリング・レーザジャイロを使用したストラップダウン方式のものである。この方式は従来の機械的に安定なプラットフォームを使用せず、ジャイロと加速度計を直接機体に取り付け、基準系となる水平面をコンピュータ処理により形成するものである。ADSの位置情報源としてIRSを使用する場合、航空機側における位置決定の精度は時間の経過に伴い悪くなる。従って、IRSの場合のFOMレベルは、他の航法装置でIRSの位置の較正を行う場合を除き、時間の経過とともに変えて表示する必要がある。また、飛行時にIRSを使用するためには、航空機が地上でエンジンを起動する前にIRSのアライメント(現在位置の入力、水平面のレベリング、ヘッディングの補正など)を必要とする。

2.3.2 GPS

GPSは現在、精度を故意に劣化するSA(選択利用性)がかけられており、この状態での測位精度は100

表1 FOMレベルの内容

FOM レベル	位置決定精度 (95%確率)	例(航法装置)
0	航法機能を喪失状態	30NM以内の確度で位置決定不可の場合
1	<30NM	11.5時間の長時間洋上飛行(INS)
2	<15NM	7~7.5時間の洋上飛行(INS)
3	<8NM	3.5~4時間の洋上飛行(INS)
4	<4NM	2時間以下の洋上飛行(INS)
5	<1NM	(DME:複数のDME使用)
6	<0.25NM	(Loran C)
7	<0.05NM	(GPS)

表2 航法機器の主要諸元

要 目	IRS	GPS
型 名	LTN-90-100	TNL 17642-00
メーカ	リットン	トリンプ
測位精度	2 NM/h (95%確率)	100m (2 drms)
データ出力	位置、速度、姿勢角	位置、時間、高度、速度
出力周期	200ms (5Hz)	平均 約1秒
座標系	W G S 72	W G S 84
消費電力	105W (本体)	4W 以下 (受信機)
その他 の特徴	ストラップダウン方式 リング・レーザジャイロ使用 MTBF 5400h エアライン機使用実績608機 B747, A300, B737他	ANT: 平板状マイクロストリップ型 6ch受信機(追尾は8ch) L1:1575.42MHz, C/Aコード受信
重 量	20 kg (本体)	2.4 kg (受信機)

m (水平面、2drms)⁷⁾とされている。GPS の飛行中の精度評価はこれまで国内では航空写真との比較による精度評価⁸⁾、空港周辺では測距装置であるレーザトラッカーとの比較による精度評価⁹⁾などが行われている。さらに、航空路での航空機監視用レーダによる精度評価の例もあるが、そもそもレーダの分解能が0.124NM(約200m)しか得られないので、GPS の測位精度を評価することに限界がある。

今回実験に使用した GPS は、使用環境を設定することで航空、地上及び海上での使用ができる。表3は機上に搭載したものと全く同一型の受信機を使用して、地上で評価試験を行った結果を示す。それらの結果はこれまでに他で発表されている結果¹⁰⁾とほぼ同程度で、前述の測位精度内であった。このことから、GPS の位置を基準に IRS の誤差を評価しても差し支えないものと考えた。

2.4 飛行経路

実験は図1に示す飛行経路を1回につき2~4時間飛行し、これらの飛行を30回行った。飛行累計で約74時間のデータを収集し、不正なデータは一部除いた。また、その内容を表4に示す。特に、この飛行経路は IRS の評価のために選定したのではなく、他の実験に便乗して IRS の評価を行った。

飛行形態は殆どが IFR とよばれる計器飛行で、離陸および着陸時も殆ど一般の航空機と同様な離着陸方式であった。

表4 データ収集の飛行経路

表3 GPS の精度評価
(固定点: 東京・三鷹)

年月日 (測定日)	データ数	測位精度(m)	
		rms	2drms
93/3/1	12573	26.38	52.76
93/6/28	14847	37.93	75.86
93/9/29	10700	29.41	58.82
93/12/13	16072	34.51	69.02

飛行コース	飛行回数	飛行時間 (171413)	飛行時間 小計(H)	飛行の 緯度差	飛行の 経度差	飛行経路
西行 (主に南西方向)	5	2.4~3.5	16	4.0°~8.4°	2.8°~5.4°	仙台→高知、仙台→名古屋、八丈島→宮崎 名古屋→宮崎、宮崎→那覇
東行 (主に東北方向)	5	2.4~2.5	12	6.0°~7.2°	4.6°~7.3°	高知→仙台、那覇→高知
周回	10	1.1~3.4	25	0.1°~4.7°	0.1°~2.7°	仙台→(太子)→(新潟)→(花巻)→仙台、 仙台→(阿見)→仙台、仙台→(太子) →(花巻)→仙台、仙台→(福井)→仙台
その他	10	2.1~3.4	21	0.1°~4.4°	1.0°~6.8°	仙台→八丈島、仙台→那覇、那覇→仙台、
計	30		74			

2.5 データ収集及び処理

データの収集は、航空機が離陸から着陸までの間 GPS の測位時刻を基準に IRS と GPS の各々の位置データを、約1秒毎にパーソナル・コンピュータで行った。使用したデータは航空機が滑走し始めてから速度が50ktに達した時点から着陸して速度が50ktになるまでの間を対象とした。この理由は、GPS の使用において航空機が地上に止まっている状態では SA のため、位置の測定値が最大で約150mも変動する場合もあり、位置が定まらないためである。また、GPS 受信機は、航空機が飛行しはじめると測位計算プログラムに組み込まれている一種のフィルタの動作により、特に衛星の組み合わせが変わらない限り、測位位置が不連続に急に変動することはなく、基準位置として使用しやすいためである。

一方、IRS は飛行前に必ず先に述べたようにアライメントが必要である。このアライメント時、現在位置の緯度、経度を入力する場合、最小分解能が0.1'でしか入力することができない。このため、最初から現在位置の入力値によるバイアス誤差が最大で約185m存在する場合もある。これらのことから、データの処理においては、航空機の速度が離陸時に50ktになった時のGPSの測位位置を基準点として、IRSの位置をオフセットし現在位置の入力によるバイアス誤差等をキャンセルしてから、両者のデータを比較した。測地系はIRSが世界的測地系のWGS72で、GPSがWGS84であったため、IRSをWGS84に変換し、測地系を統一してデータの処理を行った。

図1 飛行経路

3. 実験結果

3.1 平均位置誤差

平均位置誤差は飛行時間経過に対して IRS の連続的な位置誤差の傾向を知るために求めた。

IRS の平均位置誤差の算出方法は、飛行中の位置基準として約 1 秒毎に得られる GPS の位置データ(緯度、経度)を使用し、これと同時刻の IRS の位置データとの各々の差をそれぞれ連続的に求めた。次に、60 秒毎に±30 秒間の各データをまとめ(約 60 個のデータ)、それらのデータから 60 秒毎の緯度、経度の平均誤差を、さらに平均位置誤差を求めた。ここで、1 秒毎のデータの処理も試みたが 60 秒毎の平均と殆どグラフ上での差異はなかった。また、これらは飛行経路によりおおよそ東行、西行、周回飛行の 3 通り(但し、分類できないものは除く)に分類して求めた。

(1) IRS 及び GPS による航跡例

図 2 は IRS と GPS により得られた HC(八丈島)から MZE(宮崎)まで約 4 時間の飛行での航跡例で、+印が GPS により、□印が IRS によりそれぞれ 60 秒毎に得られた位置をプロットしたものである。IRS の位置誤差は目的地である宮崎に到着した時点(プロットは 10 秒毎)では、GPS に対し約 6km の誤差が生じていることがわかる。

図 2 取得データによる航跡例(HC(八丈島)→MZE(宮崎))

(2) 西行飛行の位置誤差の例

図 3 は図 2 の全区間において、GPS の値を基準に比較した IRS の緯度、経度方向の平均誤差及び、平均位置誤差をプロットしたものである。この例では東から西へ飛行した場合で、図より緯度、経度方向の平均誤差は、飛行の時間経過に従って短い周期で振動しながら増加していることがわかる。これまでは比較する航法装置がないため、途中で位置誤差はわからず、目的地に着いてからどのくらいの誤差が生じたかしかわからなかったが、GPS を基準にすることで飛行経過時間に対する誤差の変化がわかる。

(3) 東行飛行の位置誤差の例

図 4 は高知から仙台まで飛行した時の GPS の値を基準に比較した IRS の緯度、経度方向の平均誤差、及び平均位置誤差をプロットしたものである。この場合緯度、経度方向の時間に対する変動の周期が緩やかで、平均位置誤差も飛行を開始して 2 時間までは 1NM と大きくない。

図3 IRS の位置誤差の例1(西行飛行)

図4 IRS の位置誤差の例2(東行飛行)

(4) 周回飛行の位置誤差の例

図5は仙台から大子、山形、花巻上空を経て仙台に戻る周回飛行で得られたGPSの値を基準に比較したIRSの緯度、経度方向の平均誤差、及び平均位置誤差をプロットしたものである。この場合、経度方向の時間に対する変動の周期が急で、緯度方向は殆ど変動していない。また平均位置誤差の周期は殆ど経度方向の周期に依存して変動している。周回飛行では平均位置誤差が極端に小さくなる周期性の傾向が見られる。

(5) 同一飛行経路で同一方向への複数回飛行時の位置誤差

図6~8は西行、東行及び周回飛行のそれぞれに対し複数回飛行で得られた緯度、経度方向の平均誤差、及び平均位置誤差を同じ飛行方向毎に平均して求めた位置誤差である。ここでは、緯度及び経度方向の誤差もその傾向を同じ単位で見ると、距離に換算した。飛行方向毎の位置誤差の傾向はそれぞれの飛行方向とも図3、4、5の場合のそれとほぼ同じである。

図5 IRS の位置誤差の例3(周回飛行)

図6 IRS の平均位置誤差(西行飛行)

図7 IRS の平均位置誤差(東行飛行)

図8 IRS の平均位置誤差(周回飛行)

(6) 全飛行での位置誤差

図9 全飛行回数について、個々に求めた緯度、経度方向の平均誤差、及び平均位置誤差をすべて平均して求めた位置誤差である。図において、飛行時間が3時間経過付近から、グラフがばらついてきているのは、この区間の飛行回数が少なくデータの不足が一因と考えられる。全体的な傾向としては、IRSの特徴である飛行時間に伴い誤差が大きくなっているのがわかる。

3.2 95%確率の位置誤差

95%確率の位置誤差の求め方は、他にも考えられるが、ここでは次のように求めた。位置誤差は測定値から真の位置に対する距離の誤差であり、それらの平均自乗平方根を drms とすると、その2倍、即ち、 $2 \times \text{drms}$ (以下、 2drms と記す) により求めた。実際には、この値の 2drms は95%確率もしくは、それ以上の確率に相当する位置誤差と考えられている⁽⁷⁾。ここで、各飛行毎に30分経過後のポイントデータのみを収集し、その同時刻のGPSの測位位置を真の位置と考え、GPSとIRSとの距離差を求め、それらをもとに全飛行回数に対する 2drms を求めた。図10にその結果を示す。図中の×印は各時刻での各飛行毎の位置誤差を、○印はその時刻の全飛行に対する平均を、△はその時刻の drms 値を、■はその時の 2drms を示す。この結果より、飛行時間が3時間以上では飛行回数が少ないためデータの信頼性に乏しいが、3時間以内では飛行時間に対する位置誤差の傾向が読み取れる。

図9 IRSの平均位置誤差(全飛行)

図10 IRSの位置誤差(2drms)

4. 結果の考察

(1) 過去の実験例との位置誤差の比較

IRSの95%確率の位置誤差の算出方法として、これまでは、航空機が目的地に到着した時のIRSの指示値とその地点の位置との差を求め、それを飛行時間で割り、単位時間当たりの位置誤差を算出し、それらの飛行回数を累積し95%の確率を求める方法がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。今回の実験の場合、データ数が少なく(飛行回数が30回)従来の手法では求められない。文献(4)、(5)によると慣性航法装置(INS)の場合、95%の確率で算出した1時間経過後の位置誤差の平均値として、1.5NMが得られている。今回のIRSの実験では、上記3.2項の手法により1時間経過では1.9NM、3時間経過では4.5NMという結果が得られた。この結果は文献の値に比べて、1時間経過では大きめに、3時間経過では同じであった。今回の手法では、文献の手法に比べて、30分毎にあるいはそれ以下の時間間隔で位置誤差を求めることが可能である。

(2) ADSメッセージのFOMレベルの検証

ADSPでの運用の手引書では、IRSを2時間以内で使用する飛行におけるFOMレベルは4、即ち95%確率の位置決定精度で4NM未満であることとなっているが、今回の結果からみると、2時間後での 2drms (95%以上の確率) は2.9NMで十分にこれらの値を満足していた。また、IRSを使用して3.5時間から4時間以内の飛行を行う場合の位置決定精度は、8NM未満となっているが、今回の結果からの推定で

は約 5.5NM であった。

5. まとめ

小型機を使用した飛行実験により、GPS を基準にして IRS の位置誤差の評価を実施し、次のような結果が得られた。

- (1) 今回の飛行実験により求めた IRS の 2drms での位置誤差は、飛行 1 時間経過で 1.9NM、3 時間経過で 4.5NM であった。
- (2) IRS の位置誤差の平均値は飛行 1 時間経過で 0.8NM、3 時間で 2.1NM であった。
- (3) ADS における FOM のレベルが 4 の場合、即ち、2 時間以内の洋上飛行で 4NM 未満の位置決定精度が妥当性であることが検証できた。
- (4) そのほか、飛行方向による IRS の位置誤差は
 - ① 地球の反自転方向(西方向)への飛行時には緯度、経度成分の変動周期が早く、そのため位置誤差も同様に変動する。
 - ② 自転方向(東方向)への飛行時には、それらの変動周期はゆるやかであった。
 - ③ 周回飛行の場合には、緯度と経度成分の変動周期は相反する場合が多く、位置誤差としては小さく出る傾向を示した。

謝 辞

IRS データの収集にご協力戴いた当所衛星航法部の石出 明氏並びに元衛星航法部の湯川清志氏(東京航空交通管制部)に感謝します。また、データの解析において助言を戴いた当所衛星航法部の奈須英臣氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) ICAO, ADSP/2 会議録, ADS の運用要件, 勧告 2/1: ADS の定義, 平成 4 年 6 月.
- (2) ADS & ATC Data Link Applications Guidance Material ver.4 Appendix C, pp.1/5-C-13, ICAO ADSP/3, May 1994.
- (3) 成田 正: 慣性航法の解説Ⅲ及びⅣ, 航海 96 号及び 98 号, 昭和 63 年 6 月及び 12 月.
- (4) 電子航法システムの設計技術とその展開・例, pp.249~256, 応用技術出版, 昭和 63 年.
- (5) 加藤昭英: 航法システムの変遷と今後の展望①, 航空技術, No.350, 昭和 59 年.
- (6) 航空計器, pp.129~139, 地人書館, 昭和 54 年.
- (7) NAVSTAR/GPS—その展望と利用技術の確立にむけて, pp.25, (株)ジャパン・インダストリアル・パブリッシング, 昭和 62 年.
- (8) 水城南海男: GPS の 3 次元測位精度に関する評価試験について, 電子情報通信学会, SANE88-6, 昭和 63 年.
- (9) 石川はか: ドルニエ機による MLS 等航法系飛行実験について(その 3)—GPS 評価試験結果—, 第 29 回飛行機シンポジウム, 3D4, 平成 3 年 10 月.
- (10) 小野・石川: 実験用航空機ドルニエ機の DGPS について(その 2)—地上固定点における GPS/DGPS 測位評価実験—, 第 30 回飛行機シンポジウム, 3D7, 平成 4 年 9 月.

質 疑 応 答

奥田成幸(海技大学校): (1) IRS の誤差要因を教示願いたい。

(2) IRS の誤差が周期成分を持った現れ方をしているのはなぜか。

藤田光紘: (1) IRS の誤差要因としては文献(上記(3)及び(4))によるとジャイロや加速度計のバイアス誤差、スケールファクタ誤差などがあります。また、初期設定誤差も要因に考えられます。

(2) 文献(上記(3))によると誤差を支配する方程式は非同次単振動型の微分方程式に支配され、その解

は一般にシュレー角周波数($\omega = \sqrt{R/g}$ 、ここで R は地球の半径+高度、 g はその経度による地球の重力)で振動する」とされています。

近村三郎(元日本航空、現シティ・エアリンク株)：

- (1) IRS 実験飛行であることは分かりましたが、同時に GPS の精度はいかがであったでしょうか。
- (2) 図 2 の HC-XA-KE-SUC-MZE 間の飛行の結果が表されていますが、IRS の誤差があったことは理解できましたが、MZE 上空で GPS による位置表示は如何なものであったでしょうか。
- (3) IFR で FLT したとの事です、NDB 又は VOR 局の真上をヒットし、その時の IRS 及び GPS の位置表示確認もされたのでしょうか、或いは DME/DME なども参考にされたのでしょうか。

藤田光紘：(1) GPS の精度は SA のある場合で 100m (2drms) と言われていますが、我々が今回使用した GPS は東京・三鷹の固定点で精度評価した結果約 50m~70m (2drms) でした。

(2) MZE (宮崎) 付近での GPS の位置と陸地との位置照合はしていませんが、航跡については別途入手の航空路監視用レーダのデータと比較した結果、レーダの航跡にほぼ等しく見られましたので、GPS の位置表示はレーダの精度に劣る事なく正しいものと思われます。

(3) NDB/VOR/DME からのデータ収集は行っていないので、位置精度の確認はできませんでした。