

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1312

トラッキング・レーダ改修後の機能確認
およびDGPS測位を用いた較正試験

井之口浜木・稲垣 敏治・矢澤 健司
小野 孝次・稲葉 基之

1996年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	2
2. 単位, 略語および記号	3
3. トラッキング・レーダの概要	4
4. トラッキング・レーダの概要	4
4.1 格納シェルタの更新	4
4.2 データ処理計算機の更新	5
4.3 データ伝送機能の追加	5
4.4 ボアサイト・カメラの交換	5
5. 較正試験	5
5.1 地上レーダ・アンテナの設置	6
5.2 固定標的を用いた電波軸と光軸との合致	6
5.3 光軸の絶対角度較正	7
5.4 飛行試験による精密較正	7
6. 試験結果	10
6.1 機能確認	10
6.2 較正結果	10
7. まとめ	12
参考文献	12

トラッキング・レーダ改修後の機能確認および DGPS測位を用いた較正試験

井之口 浜 木*¹・稲 垣 敏 治*¹・矢 澤 健 司*¹

小 野 孝 次*¹・稲 葉 基 之*¹

Performance of a Tracking Radar after Improvement and Correction using DGPS positioning

Hamaki INOKUCH *¹ Toshiharu INAGAKI *¹ Kenji YAZAWA *¹
Takatsugu ONO *¹ Motoyuki INABA *²

ABSTRACT

An existing tracking radar was improved for use as a real-time flight path monitor for Automatic Landing FLight EXperiment (ALFLEX). The operational difficulty of the tracking radar was decreased and a data transfer function was added. Its function and performance were confirmed by flight testing, and the devices that were exchanged or added worked normally.

Absolute position correction of the tracking radar was required to measure the flight path of an aircraft. Calibration data using DGPS positioning during flight testing were gathered easily and precisely. The bias component of calibration data is installed in the radar device and real-time positioning data were corrected.

Keywords: tracking radar, position measurement, flight testing, DGPS, ALFLEX

概 要

小型自動着陸実験機 (ALFLEX) の実時間飛行経路監視に使用するために現有トラッキング・レーダの改修を行い、操作性の向上、データ伝送機能の追加をした。改修後の機能・性能及び、交換・追加した装置の正常動作を飛行試験により確認した。

一般に航空機の飛行経路を計測する場合、トラッキング・レーダの絶対位置較正を行う必要があるが、DGPS測位を利用した飛行試験における較正を行った結果、比較的容易に精密な較正データが得られた。較正データのうちバイアス分はレーダ装置に入力され、実時間計測に反映される。

1. まえがき

航空宇宙技術研究所のトラッキング・レーダ (明星電気製 MPR-7) は、昭和55年に製作され、航空機の飛行

位置の測定、レーダ・ガイダンスの研究¹⁾等に利用されてきた。本トラッキング・レーダは9.8GHz帯のマイクロ波を利用した航空機追跡用の地上レーダで、飛行中の航空機を自動追尾して、測角 (方位角, 仰角) および測距により、その三次元絶対位置を実時間で測定することが

* 平成8年9月30日受付 (received 30 September 1996)

* 1 飛行実験部

* 2 宇宙開発事業団

できる装置である。通常の運用では機体側にレーダ・トランスポンダを搭載し、応答波の発信源を明確にすることにより、単なる電波反射による捕捉と比較して追尾性能および計測精度を向上させている。なお、トラッキング・レーダの概要については第3章で述べる。

今回、本トラッキング・レーダを小型自動着陸実験機(ALFLEX)²の飛行経路監視用に利用するために、データ処理装置等周辺機器を含むレーダ装置全体をオーバーホールし、老朽化した部品の交換、陳腐化したデータ処理装置の更新、操作性の向上、外部とのデータ伝送機能の追加を行った。

ALFLEXは無人の滑空機で、外部から操縦するのではなく、航法装置の信号を頼りに機内の計算機が操舵を制御し、自動的に滑走路に着陸する実験機である。そのため、何らかの不具合により予定外の領域に飛来し、周辺に被害を及ぼすことを防ぐために、ドラッグ・シュートを搭載しており、非常時には外部からの無線コマンドにより機体を実験区域内に落下させることが出来るようになってきている。このとき、ALFLEXが予定の飛行経路から一定量以上逸脱しているか否かを実時間で判断するために、トラッキング・レーダが利用される。したがって、その判断のためには機体の絶対位置の測定精度が重要となる。ALFLEXの位置測定に要求される絶対位置精度は、トラッキング・レーダ設置点からの距離5kmで10mであり、これを角度に換算すると0.11度に相当する。この要求を満足させるためには、トラッキング・レーダによる測角、測距の精密な較正が必要である。

トラッキング・レーダの測角較正を行うには、一般に、地上の出来るだけ高いところに固定標的としてトランスポンダを設置し、それをトラッキング・レーダで捕捉することにより行う単体較正が採られる。しかし、この方法による単体較正のみでは、地面や建造物による電波のマルチパスの影響が避け難いため、較正值に誤差が生じ、ALFLEX実験での精度要求を満足させることは困難である。ここで、もし航空機の真の飛行位置を精密に測定できる手段がある場合、飛行試験によりトラッキング・レーダの精密な測角較正が可能となる。飛行試験では、地上のトラッキング・レーダ側から見て十分な仰角が取れ、トランスポンダを設置するための建造物もないため、マルチパスの影響が少なく、確実な測位が可能である。さらに飛行試験の場合、広範囲かつ連続的な多数の点での較正となるため、較正の信頼性が向上し、加えてレーダ・アンテナの角度計測センサの直線性を確認出来る。

測距の較正に関しては、トランスポンダごとに応答特性が異なり、給電線の長さも直接測距値に影響するため、実際に追尾する実験機を使って較正しなければならない。このとき、レーダ・アンテナの指向性は非常に強く、し

かも最短時間の応答波を計測するため、測距に関しては、アンテナを遮るような障害物がない限り、電波のマルチパスの影響が少ない。したがって実験機を地上に置いたままでもトランシット等の測量値との比較により、測距較正を行うことが出来る。ただしALFLEXの懸吊試験のように、実際に追尾する実験機を使用して実運用に先立ち飛行試験が出来る場合には、測角と同様広範囲かつ多点での較正が可能となるため、地上点のみでの較正と比較して較正の信頼性は向上する。

飛行試験による精密な較正後も、追尾の必要な実験の直前に地上の実験機について測距し、必要に応じて距離偏差量をレーダ装置に入力することにより、トランスポンダの特性が経時変化した場合でも、常時精密な測距を行うことが出来る。

したがって、ALFLEXの飛行経路監視用にトラッキング・レーダを利用するためには、トランスポンダを搭載したALFLEXでの較正が最も直接的である。しかし、較正の基準となるALFLEXの飛行位置を、正しく得るためのレーザ・トラッカ³が開発中であったため、今回はレーザ・トラッカを使用せずに飛行位置が計測できる実験用航空機(ドルニエ式Do228型)を用いて、ALFLEXの国内実験場である名古屋において飛行試験を行った。航空機の真の飛行位置を精密に測定する手段としては、航空写真による方法⁴が既に報告されているが、この方法で較正するには地上目標点の確認、効果的な飛行プランの立案等、相当な準備が必要なうえ、飛行後も撮影したフィルム面の測定作業や解析計算に手間がかかる。このため、較正データを得るのに長期間必要である。加えて、写真を撮影した点のみでの較正となるため、多数の点での較正は困難である。このため、今回は近年発展のめざましいキネマティック方式のDGPS測位⁵による事後処理位置データを基準として、較正する方法を試みた。DGPS測位によるデータはWGS84座標系にて供給されるため、この測位データをレーダ中心極座標系に変換するプログラムを開発して較正したが、データ源に依存せずWGS84座標系で与えられれば、同じ方法で較正が可能である。この方法では、実験後数時間で較正データを得ることが可能である。DGPSを利用した航空機の測位は研究途上であり、急激な運動に対する精度については不明確であるが、較正試験で必要なのは安定した飛行状態なので、充分使用可能であると考えられる。

較正データのうち仰角(EL)および方位角(AZ)のバイアス分は、レーダ装置に入力することによって、以後の名古屋におけるALFLEX実験での実時間計測データに反映させることが出来る。ただしトラッキング・レーダを移設した場合には、再び較正試験を行う必要がある。ALFLEX実験は、国内では分離を行わない懸吊飛行試験

に限られ、実際の自動着陸実験は、今後豪州実験場で行う予定であるため、今回の飛行試験による精密較正は、手法の確立が主な目的である。

ALFLEX 実験では飛行経路評価用として、トラッキング・レーダよりも高精度な測位ができるレーザ・トラッカの運用も同時に行われる。したがって豪州での ALFLEX 実験では、基準となる測位データとして、DGPS の代わりにレーザ・トラッカによるデータが使用される予定である。

このレーザ・トラッカは高精度が期待されている反面、光波を用いて追尾するため、ALFLEX 実験機前方に装備される逆反射鏡が隠れるような状況、例えば実験機が後ろ向きの場合、あるいは雲の影に入る場合、では捕捉が出来ないので、一時的に追尾が外れ、再捕捉に手間取る可能性がある。トラッキング・レーダの場合、電波を使用するため、大気の状態の影響を受け難く、さらに実験機本体による回折、反射があるため、追尾を外す可能性は少ない。このため ALFLEX 実験では、トラッキング・レーダにより計測した実験機の位置データを常時レーザ・トラッカに伝送し、レーザ・トラッカ側では、そのデータを利用してスレーブ機能により再捕捉が容易に行える構成を取っている。もしトラッキング・レーダが追尾を外した場合には、外部からスレーブ・データを受信することにより、再捕捉を行う。このスレーブ・データを得るために、従来から小型の捕捉レーダがレーダ装置の周辺機器として整備されているが、ALFLEX 実験に際して、実験機の航法データをテレメータで受信して、利用する機能を追加した。

本報告では、ALFLEX 実験に使用するための現有トラッキング・レーダ改修後の機能確認、および DGPS 測位を用いた飛行試験での精密較正の手法と試験結果について述べる。較正データについては、名古屋における ALFLEX の国内懸吊飛行試験において実際の測位データに反映される。

2. 単位、略語および記号

本報告書では原則的には SI 単位系に準拠して表記してあるが、角度表示に関しては SI 単位系でのラジアン(rad)が測量の分野で現実に使われることはあまりなく、一般的でないため、度(deg)を基本とし、必要に応じて秒を使用した。秒は測量においてしばしば使用され、小さな角度の表現に適している。単位の換算は以下の通りである。

$$1 \text{ deg} = 3600 \text{ 秒} = 0.01745 \text{ rad}$$

本文中で共通して使用される略語および記号について以下に記述する。

ALFLEX	: Automatic Landing FLight EXperiment
DGPS	: Differential GPS
DMA	: Direct Memory Access
ECEF	: Earth Centered, Earth Fixed
GPS	: Global Positioning System
HOPE	: H- II Orbit Plane Experiment
LAN	: Local Area Network
UTC	: Coordinated Universal Time
WGS84	: World Geodetic System 1984
VME	: Versa Module Eurocard
VTR	: Video Tape Recorder

データ処理に使用した座標系の定義を図 2.1 に示す。

AZ	: レーダ極座標の方位角 (真北が 0 度)
EL	: レーダ極座標の仰角 (WGS84 座標系での高度方向が 90 度)
SR	: レーダ・アンテナ回転軸中心からトランスポンダ・アンテナまでの距離
dAZ	: AZ のデルタ成分
dEL	: EL のデルタ成分
dSR	: SR のデルタ成分
ϕ	: WGS84 座標系での緯度
λ	: WGS84 座標系での経度

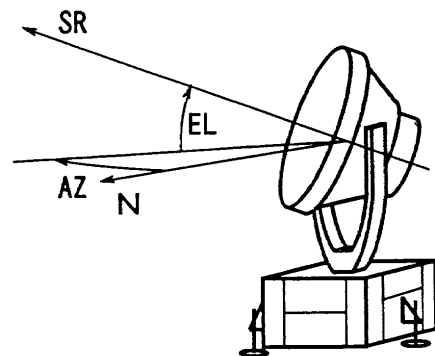
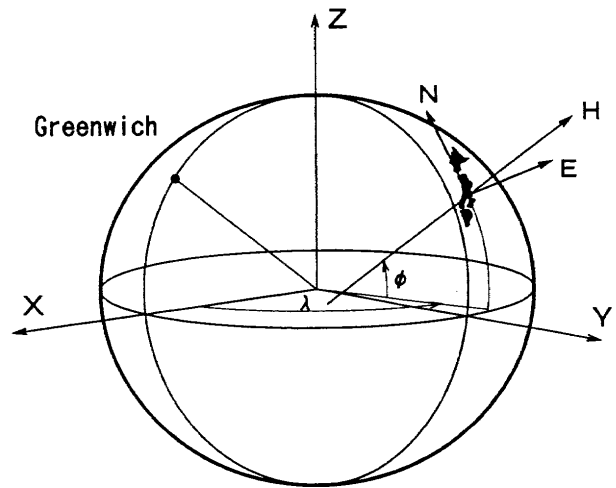


図 2.1 座標系の定義

H	: WGS84 座標系での高度
X	: ECEF 座標系での X 方向位置
Y	: ECEF 座標系での Y 方向位置
Z	: ECEF 座標系での Z 方向位置
N	: レーダ設置位置を基準とした局所水平座標系での真北方向位置
E	: レーダ設置位置を基準とした局所水平座標系での真東方向位置
h	: レーダ設置位置を基準とした局所水平座標系での高度方向位置

添字

0	: レーダ・アンテナ設置位置
m	: 計測生データ
G	: DGPS データ

3. トラッキング・レーダの概要

航技研トラッキング・レーダは、9.8GHz 帯 (Xバンド) のマイクロ波を利用した航空機追跡用の地上レーダで、飛行中の航空機を自動追尾して、その位置を実時間で測定することができる。トラッキング・レーダの外観を図 3.1 に示す。

地上レーダのカセグレン型パラボラ・アンテナからビーム幅 1.4 度のペンシル・ビーム状に発射された質問波

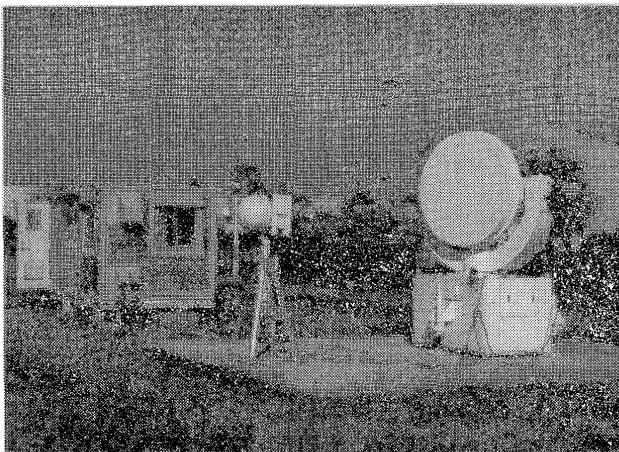


図 3.1 トラッキング・レーダの概観

表 3.1 主要性能

空中線電力	10 kW
送信周波数	9.825GHz
測距精度	5 m
測角精度	0.01 度
分解能	
測距機	1 m
測角機	0.005 度

は、機上のトランスポンダで受信され、約 30 μ 秒後に応答波として地上レーダに送信される。地上レーダでは応答波の来る方向へ自動的にアンテナが向くようになっているため、飛行中の機体の方位角および仰角を地上側で測定することができる。また機上および地上のアンテナ間を電波が往復する時間および装置遅延時間から、距離を求めることができる。

地上レーダ・アンテナのボアサイトには、TV カメラが取り付けられており、視程に左右されるものの 10 km 程度以内の斜距離では、追尾中の機影を常時確認することが出来る。この TV カメラは手動追尾による初期捕捉を容易にするだけでなく、誤って電波ビームのサイドロブで捕捉してしまった場合の状況判断を容易にしている。

機体側にトランスポンダを積んでいない場合では、機体表面で反射する電波を地上レーダで受信して、同じく機体の位置を求めることができる。ただしこの場合、トランスポンダを使用する場合と比較して追尾性能および精度が劣化する。表面反射を利用した追尾で近距離の標的の場合、送信してから受信するまでの時間が非常に短い。そこで強力な送信波が直接受信機に回り込み、受信機を破壊することを防ぐため、送信してから受信するまで一定時間のゲートを設定してある。この時間は精測モードの場合、約 450 m に相当するため、450 m 以内の標的を捕捉することは出来ない。

記録されたデータにはデータを取得した時点のレーダの状態 (ステータス信号) が同時に記録され、電波の受信強度、モードの設定、追尾状態等をデータの信頼性判定に用いることができる。

静止したトランスポンダを補足した場合の、トラッキング・レーダの主要性能を表 3.1 に示す。

4. トラッキング・レーダ改修の概要

今回の改修では、トラッキング・レーダ全体のオーバーホール以外に以下の改修を行った。改修部分を中心としたトラッキング・レーダ全体の構成を図 4.1 に示す。

4.1 格納シェルタの更新

従来はトラッキング・レーダを収納する筐体として箱形トレーラを用いていた。このトレーラには発動発電器およびエンジン駆動クーラが付属していた。トレーラは錆により雨漏りが生じており修理困難であったため、新規にアルミ製の格納シェルタを製作した。この格納シェルタはトラックで容易に輸送できる仕様にした。発動発電器およびエンジン駆動クーラは、使用頻度が低く、定期的なメンテナンスが必要なことから、今回は付属させなかった。

4.2 データ処理計算機の更新

データ処理計算機を高性能なものに更新し、実時間で飛行経路の三次元表示が行えるようにした。この結果データ収録項目を増加させた上に、長時間のデータが固定ディスク上に記録できるようになった。従来はMTに最長3時間分の記録であったが、更新後は納入時の固定ディスク残量から計算して、約10時間分の収録が可能となった。さらに計算機側からトラッキング・レーダを操作できるように操作盤を追加した。この操作盤ではジョイ・スティックを使用して、地上レーダ・アンテナのアンテナ角および斜距離設定値を手動で操作することが出来る。その他通常の追尾操作に必要なスイッチも備えている。本計算機はLANの接続により、レーダ・シェルタ外での端末による三次元監視も行えるが、この監視用端末はさらに必要なだけ拡張が可能である。

4.3 データ伝送機能の追加

トラッキング・レーダで取得したデータのうち斜距離(SR)、仰角(EL)、方位角(AZ)、ステータス信号はモデムを使って他の装置に50 Hzで送信することが出来る機能を追加した。ALFLEX実験では、そのデータが飛行経路監視用およびレーザ・トラックの初期捕捉のためのスレーブ用に、それぞれ平行して送信される。

トラッキング・レーダ自身が実験中捕捉を外した場合のスレーブ用としては、従来からビーム幅の広い捕捉レ

ーダが整備されているが、さらにスレーブ信号として、外部データをモデムで受信することが出来る機能を追加した。ALFLEX実験の場合は、実験機からのテレメータによる航法用位置データを、飛行管制装置によりトラッキング・レーダ中心極座標の斜距離、仰角、方位角データに変換して、10 Hzのサンプリングでトラッキング・レーダに送信する。

4.4 ボアサイト・カメラの交換

従来のボアサイト・カメラは画質が悪かったため、遠距離での追尾状態の監視は困難であった。これを高画質なものに交換し、TVモニタにタイトル表示器および時刻表示器を接続した。さらに十字線を描画し、光軸を明確にした。このTVモニタ画像は8mmVTRに記録することが出来る。そしてALFLEX実験の場合、この画像を飛行管制室に送ることが出来る。

5. 較正試験

今回の較正試験はALFLEX実験の一環として、愛知県弥富町の川崎重工業名古屋第一工場内にトラッキング・レーダを含むALFLEX地上設備を設置して行われた。実験場内の各設備の配置を図5.1に示す。ドルニエ機による飛行試験は、トラッキング・レーダの較正およびレーザ・トラックの性能評価、その他の試験を兼ねて行われた。

トラッキング・レーダの較正は以下の手順で行った。

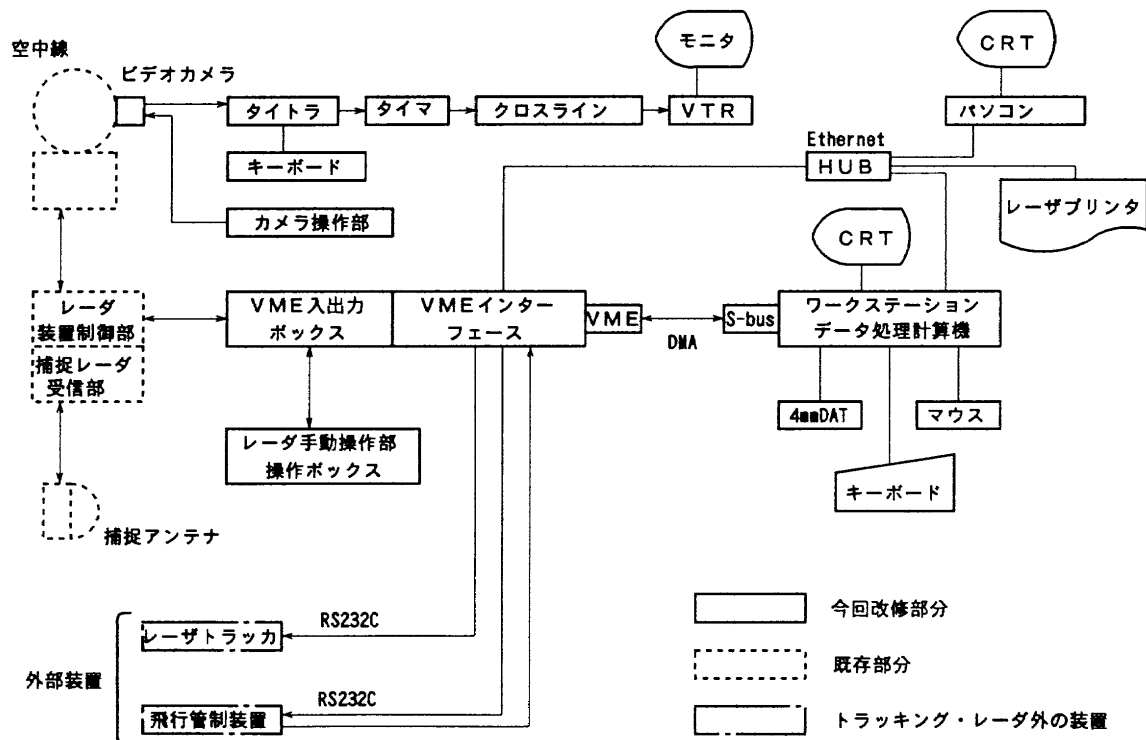


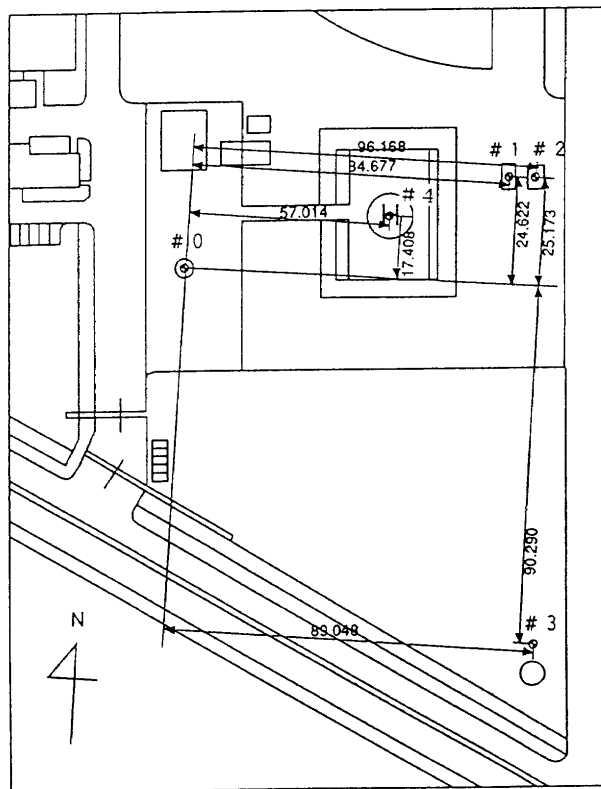
図4.1 トラッキング・レーダ構成図

- 1) 地上レーダ・アンテナの設置
- 2) 固定標的を用いた電波軸と光軸との合致
- 3) 光軸の絶対角度較正
- 4) 飛行試験による精密較正

飛行試験による精密較正に先だって(1×2×3)の単体較正を実施しておけば、ポアサイトのTVカメラで機影が確認できるので、較正飛行試験実施時に追尾が容易になるばかりでなく、固定標的を利用して装置全体の動作確認が随時行える。このため今回は、まず最初に固定標的を用いた単体較正を行った。

5.1 地上レーダ・アンテナの設置

地上レーダ・アンテナはコンクリートの基礎の上に設置されたが、その設置位置は、予めスタティック方式のDGPSを用いて測量した。この測量により、地上アンテナのWGS84座標系での絶対位置およびALFLEX駐機点、レ



単位 [m]

- # 0 : ALFLEX駐機点
- # 1 : レーザ・トラッカ設置場所
- # 2 : トラッキング・レーダ設置場所
- # 3 : DGPS受信アンテナ設置場所
- # 4 : ヘリポート中心位置

図5.1 実験場配置図

表5.1 トラッキング・レーダ設置位置

緯度	北緯 35度 02分 12.37569秒
経度	東経 136度 47分 36.66672秒
高度	42.1063 m

ーザ・トラッカとの相対位置が求められた。DGPS測量によるトラッキング・レーダの設置位置は、表5.1の通りである。DGPSによる測量は、既に実用化されており公称精度は、 $(5\text{ mm} + 1\text{ ppm} \times \text{基線長})$ である⁶⁾。しかし不具合あるいは使用ミスによる誤差の増大の可能性を取り除くために、DGPSで測量した実験場内の2点について、その間隔を光波トランシットによって再確認した。光波トランシットの公称精度は $(2\text{ mm} + 2\text{ ppm} \times \text{基線長})$ である。

DGPSによる測量値 59.612 m

トランシットによる測量値 59.608 m

両者の差は4 mmであり、どちらの方がより正確であるかの判断は、この結果からは分からない。しかし、それぞれの機器の原理は全く異なるため、偶然値が一致する可能性は少なく、どちらも4 mm程度以下の誤差に収まっていることが推定できる。

地上レーダ・アンテナを基礎に設置する際の水準は、アンテナ内蔵の電気式水準器を用いて約10秒の精度で合わせた。この較正は試験中随時行われたが、水準器で検出可能な基礎の傾きは観測されなかった。

このとき水準器で得られる局所重力軸と、WGS84座標系で定義される回転楕円体の接平面に対する法線とは必ずしも一致しない。もし地表下の浅い位置に過剰な質量の物体が埋まっていると、図5.2に示すように、その上で等重力ポテンシャル面は盛り上がり、鉛直線偏差はその周辺で大きくなる。今回実験を行った名古屋地区での鉛直線偏差は日本測地系で約10秒⁷⁾であり、これに日本測地系とWGS84座標系の緯度の差が加わるが、アンテナ設置時にはこれを無視した。設置時の角度誤差は、その他の誤差と総合されて最終的には飛行試験により判明し、較正值が求まることになる。

5.2 固定標的を用いた電波軸と光軸との合致

地上アンテナのポアサイトにはTVカメラが取り付けられており、追尾中の機影はレーダ操作員が監視できるようになっている。TVカメラの光軸は、標的の直視により精密な角度計測が容易である。したがってTVカメラの光軸を地上アンテナの電波軸に平行に合わせておけば、光軸を較正することにより同時に電波軸が較正されることになる。

固定標的として、建物の屋上にトランスポンダ・アンテナを取り付け、トラッキング・レーダで自動追尾した。この結果、電波軸はトランスポンダ・アンテナの方向を向くため、この方向に、TVカメラの取り付け位置により生ずる視差を考慮して、TVカメラの光軸を合わせた。ただし地上に設置した固定標的では、電波のマルチパスによる誤差が避け難いため、電波軸が正確に合わせられず、完全に電波軸と光軸とを合致させることは出来ないので、

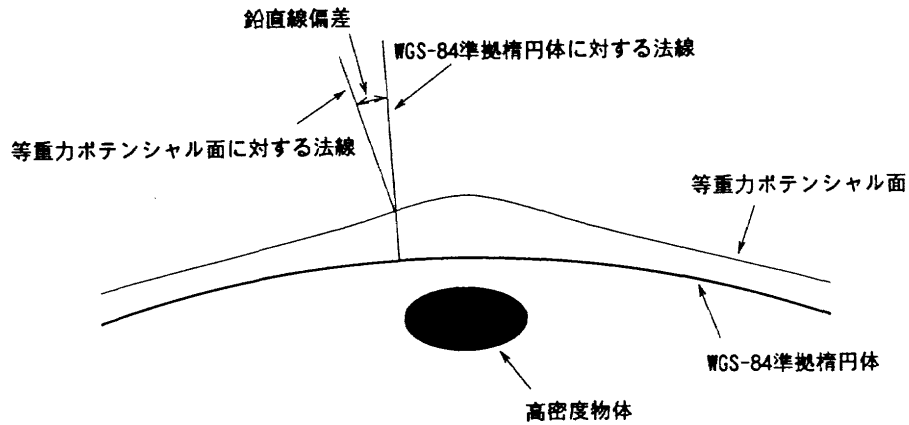


図 5.2 重力の鉛直線偏差

後に飛行試験により再較正をした。

5.3 光軸の絶対角度較正

もし前述の固定標的の絶対位置が既知の場合、必ずしも光軸を使わなくても、電波軸の較正はできる。しかし、一般には固定標的は高所に設置され、その位置の測量が困難なため、直接電波軸の較正を行う方法は採られない。

光軸の絶対角度較正は、トラッキング・レーダ単体でも天体測量等により実施可能であるが、移動する天体を手動で捕捉するため、容易な作業ではない。今回は隣接するレーザ・トラックにおいて、精密な天体較正を行ったため、絶対角度に関しては、レーザ・トラックに合わせることにした。レーザ・トラックでは画像トラックにより、天体を自動追尾することが出来、天体較正を行うためのソフトウェアが装備されているので、これを利用した。絶対角度の較正手順を以下に示す。

固定標的による光軸合わせの際、トランスポンダ・アンテナの近くに、レーザ・トラック用逆反射鏡を設置した。この逆反射鏡をトラッキング・レーダのボアサイト・カメラおよびレーザ・トラックで直視することにより、レーダ・アンテナ基準の極座標における絶対角度較正を、視差を考慮して行った。ボアサイト・カメラのズームを望遠端にした場合、モニタテレビの画面上では約 1 mm が 0.015 度に相当するため、この方法では 0.03 度程度の較正が可能であると考えられる。基準としたレーザ・トラックの絶対角度較正は、天体観測により 0.004 度程度の精度で精密に行われたため、基準としては十分である。

通常はこれらの単体較正終了後に、実験ごとの距離較正を行う。しかし今回の試験では、ドルニエ機をレーダの設置してある川崎重工業名古屋第一工場から見通せる位置に着陸させることが不可能であったため、この較正が出来なかった。加えて、実験機搭載のトランスポンダおよび固定標的の較正用トランスポンダの遅延量並びに給電線長さ等、装置一式が異なっているため、固定標的

でも正確な較正が出来なかった。したがって今回は装置遅延の理論値を用いて概略の距離データを取得し、その後飛行試験により精密な較正を行った。

5.4 飛行試験による精密較正

今回の較正は ALFLEX の飛行経路監視に使用することを前提として行われたもので、実時間で計測する絶対位置の精度が最も重要である。トラッキング・レーダにはバイアス分を予め設定して出力値を実時間で補正する機能があるが、この機能は複雑な補正式には対応していない。そのため較正試験では較正曲線が得られたものの、計測値のバイアス分を較正值として求めるにとどめ、補正式は求めている。トラッキング・レーダの精度から考えても補正式による補正の効果はあまり重要ではないと思われる。なお ALFLEX 実験では、事後処理で使用される位置の計測値は、トラッキング・レーダより精度の高いレーザ・トラックのデータが用いられる。今回はトラッキング・レーダ較正のための飛行試験方法およびデータ処理方法を以下の如く確立した。

1) 飛行試験方法

飛行試験は平成 7 年 10 月 2 日～5 日に愛知県弥富町の川崎重工業名古屋第一工場周辺で行われた。飛行試験のためにトランスポンダを搭載したドルニエ Do228 は、名古屋空港を基地として同工场上空に飛来した。

飛行パターンを図 5.3 に示す。ORBIT-1, 2 は、実験場内のヘリポートを中心とした左右 1 周づつの周回飛行である。LEVEL-1, 2 はヘリポートからの往復水平飛行である。なお今回の飛行試験は、トラッキング・レーダの較正およびレーザ・トラックの性能評価、両方を兼ねている。トラッキング・レーダの測位較正には、周回飛行のデータを用い、DGPS との時刻合わせには往復水平飛行のデータを利用した。

2) DGPS による基準位置の座標変換

機上および地上それぞれに GPS 受信機を設置し、搬送

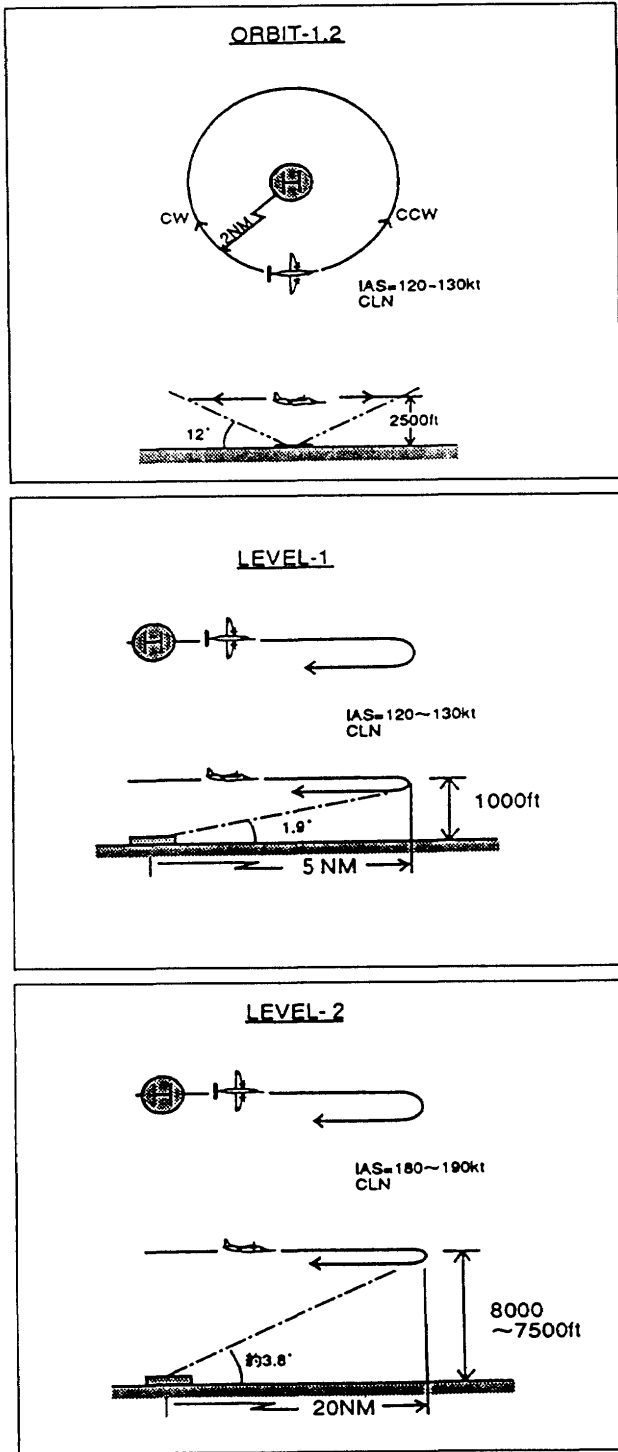


図 5.3 飛行パターン

波の位相を利用したキネマティック方式の DGPS により実験機の飛行中の位置を事後処理で求めた⁵⁾。この方式では数 10 cm 程度の精度で実験機の位置を測定でき、較正の基準として十分であると判断できる。DGPS による位置は、WGS84 座標系で求められるものであるが、ここでは地球中心地球固定 (ECEF) 座標系に変換して利用した。基準位置データの変換手順を図 5.4 に示す。

DGPS による位置データを以下の式により ECEF 座標系からレーダ位置での局所水平座標系に変換した。このとき DGPS による位置データは、GPS 受信アンテナ位置であり、レーダによる位置データは、トランスポンダ・アンテナ位置である。それぞれのアンテナ位置が異なることによる補正は、機体の姿勢角を使用して DGPS による位置データをトランスポンダ・アンテナ位置に変換して行った。

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi \cos\lambda & -\sin\phi \sin\lambda & \cos\phi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\phi \cos\lambda & \cos\phi \sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

これを以下の式により、地上レーダ・アンテナ基準の極座標系に変換した。

$$\begin{aligned} SR_G &= \sqrt{N^2 + E^2 + h^2} \\ EL_G &= \tan^{-1}(h / \sqrt{N^2 + E^2}) \\ AZ_G &= \tan^{-1}(E/N) \\ h_G &= H - H_0 \end{aligned}$$

3) トラッキング・レーダによる位置計測データ

地上レーダ・アンテナが実際に向いている角度はポテンショ・メータにより測定され記録される。さらに自動追尾を行うにあたり、アンテナの方向と電波中心との偏差をアンテナ角の制御信号として用いている。この偏差角はデルタ成分として独立に記録される。したがってアンテナ角度にデルタ成分を加算したものは、サーボの遅れを取り除くことができるため、より精度の高い測定値となる。距離についても同様である。以後の解析では計

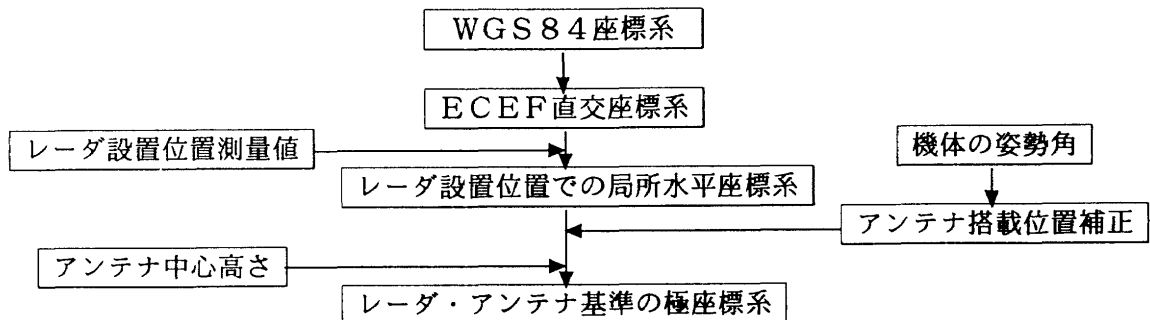


図 5.4 基準位置データの変換手順

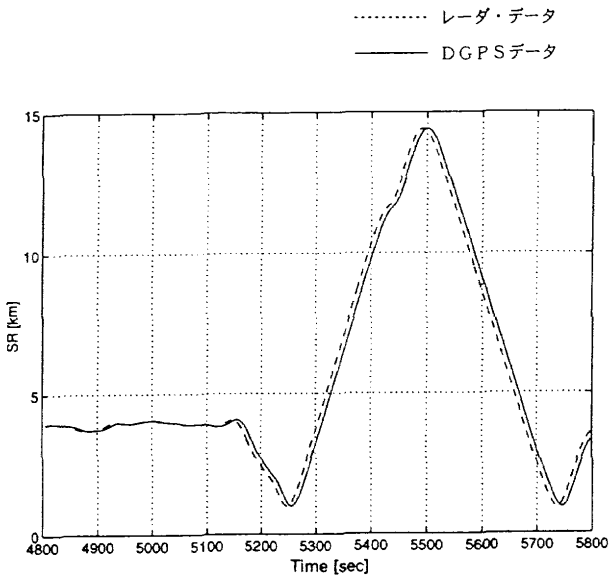


図 5.5(a) 時刻のずれ

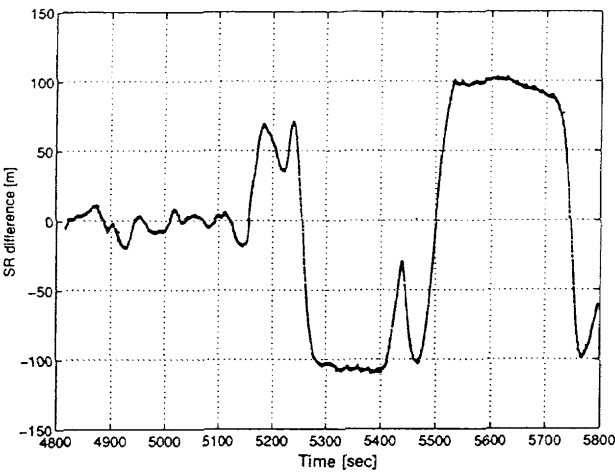


図 5.5(b) 時刻のずれ

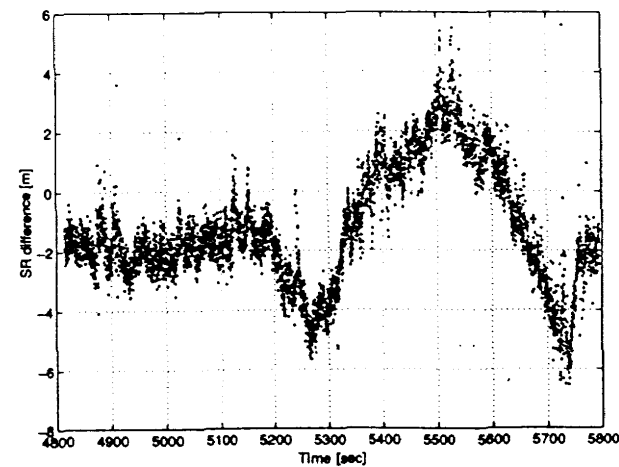


図 5.5(c) 時刻のずれ

$$EL = ELm + dEL$$

$$AZ = AZm + dAZ$$

4) DGPS データおよびトラッキング・レーダ・データの時刻合わせ

DGPS およびトラッキング・レーダの各装置で取得したデータを比較するためには、各の装置のデータ取得時刻を統一する必要がある。DGPS データには正確な時刻信号が含まれているが、レーダ単体では通常、腕時計を見ながら合わせられた処理計算機固有の時刻が付加されるだけである。

ALFLEX の飛行実験では、レーダで取得したデータは、飛行管制室へモデムにより送られ、他の計測信号とともに GPS の時刻タグが付加される。しかし今回の試験では飛行管制室の設備が完成していなかったため、以下の手法により時刻合わせを行った。

今回の飛行パターンの中でレーダに対して往復する経路があるが、時刻のずれによる SR の誤差は往路と復路とで逆に生ずると考えられる。そこで SR に注目して時刻合わせを行った。

まず DGPS による位置データを、レーダ位置基準の SR に変換した。この SR およびレーダで得られた SR の時歴を重ね書きすると、図 5.5(a) に示すとおりレーダの時刻が約 10 秒早かったことがわかる。

次にレーダ・データの時刻を 10 秒遅らせ、レーダの SR から DGPS による SR を差し引き、時歴をプロットした。図 5.5(b) に示すとおり時刻のずれが存在することによる矩形波が見られる。矩形波の振幅は約 100 m であるが、この試験ケースの場合、実験機の場合は 60 ~ 65 m/s であったため、100 m の誤差を相殺するために、レーダ時刻を現状から 1.6 秒早め、結果として 8.4 秒の遅れとし、図 5.5(c) に示すように再び同様の時歴をプロットした。SR データは時刻のずれに起因する誤差だけではないので、この段階では明瞭な矩形が見られず、矩形波の振幅からこれ以上に精度の高い時刻合わせは困難である。しかし、SR に依存する誤差は前出の SR の時歴データと同様な変化をすることを考えられるため、SR の誤差および SR の時歴が同じような形になるように、特にピークが 5500 秒付近に現れるように時刻を調節し、結果として 8.39 秒のずれを求めた。

5) 距離および角度の較正

今回ドルニエ機に搭載したトランスポンダの応答遅延時間は、単体検査によると 26.8 μs で、これを電波の伝搬速度から片道の距離に換算すると約 4020 m となる。トランスポンダ・アンテナの給電線長は約 10 m であり、これらを加算して、トランスポンダの遅延によるオフセット量の理論値として 4030 m を求めた。この値を較正前の初期値として地上レーダ側で設定した。

測データとして、次式に示すようにデルタ成分を加算した値を使用する。

$$SR = SRm + dSR$$

飛行試験では DGPS による計測値と比較して以下の式により距離および角度の精密な較正データを取得した。

$$\Delta SR = SR - SR_G$$

$$\Delta EL = EL - EL_G$$

$$\Delta AZ = AZ - AZ_G$$

距離および角度のバイアス分は、補正值としてトラッキング・レーダに入力して実時間データに反映する。標準偏差は較正データの精度の妥当性を調べるために求めた。

6. 試験結果

6.1 機能確認

トラッキング・レーダを飛行試験で運用した結果、レーダ自体の追尾機能は改修前と同様に正常に動作した。アンテナの手動操作はジョイスティックで出来るようになったため、従来のダイヤル式と比較して操作性が向上し、初期捕捉が容易になった。

データ処理計算機の更新により、飛行経路の三次元表示が可能となり、途中で追尾できなくなった場合でも、過去の飛行経路から現在位置を予測することが可能のため、再び捕捉するための初期捕捉が容易になった。また、計測データの固定ディスクへの収録も予定通り行われ、飛行後のデータ解析に使用できた。

データ伝送機能の追加により、トラッキング・レーダで捕捉した標的の位置データを送信することが出来るため、レーザ・トラッカの初期捕捉が容易に行えるようになり、有効な手段であることが確認できた。また、外部から機体の位置データを入力することにより、トラッキング・レーダの初期捕捉も容易になった。

6.2 較正結果

今回の飛行試験では、トラッキング・レーダおよび DGPS それぞれのデータの連続性が比較的良好な、10月3日午後の飛行試験について処理した。トラッキング・レーダ取得データによる飛行パターンを図6.1に示す。飛行パターンは周回飛行および往復飛行に分けられる。

飛行試験全体にわたるトラッキング・レーダおよび DGPS による SR, EL, AZ の時歴を図6.2に、その偏差の時歴を図6.3に示す。図中偏差の大きい部分は、旋回によりアンテナが隠れたか、低高度で障害物やマルチパスの影響があるなど、電波環境が不良な状態である。

6.2.1 架台の傾き

周回飛行にてアンテナ架台の傾きを確認するために、図6.4に AZ に対する EL 偏差を示す。この図から明瞭な架台の傾きは見られない。

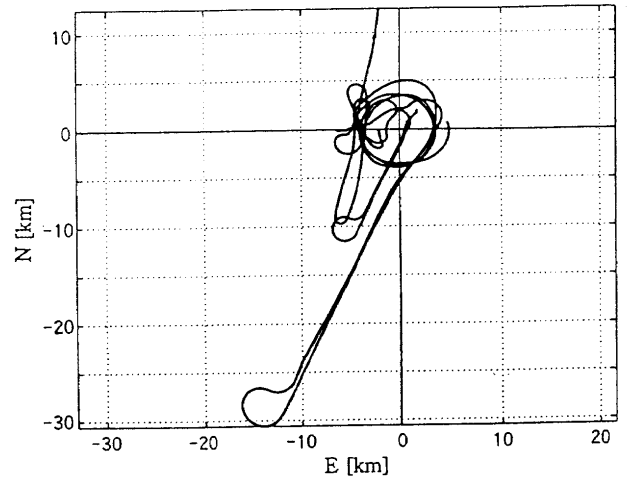


図6.1 レーダ・データによる飛行パターン

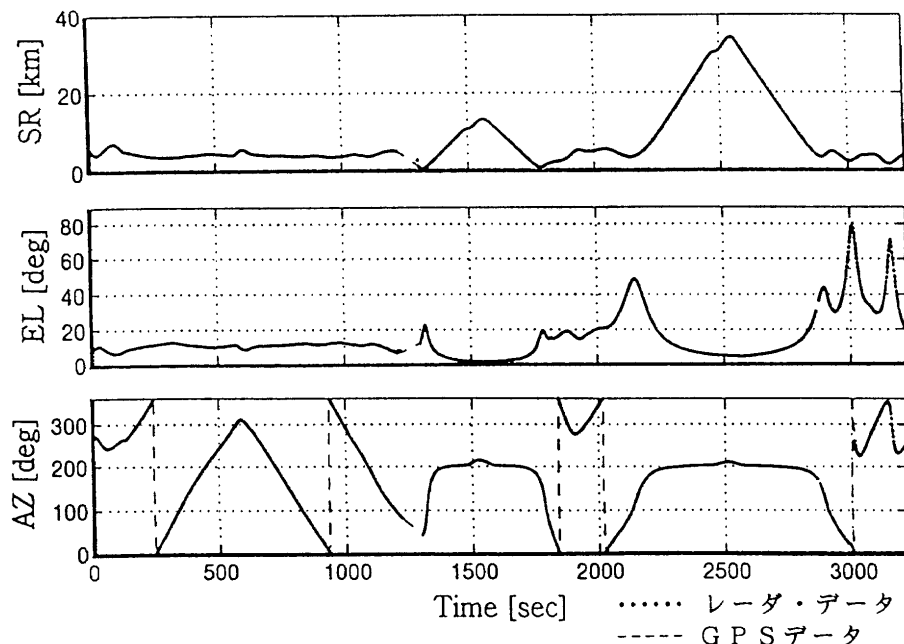


図6.2 レーダ・データおよびGPSデータ

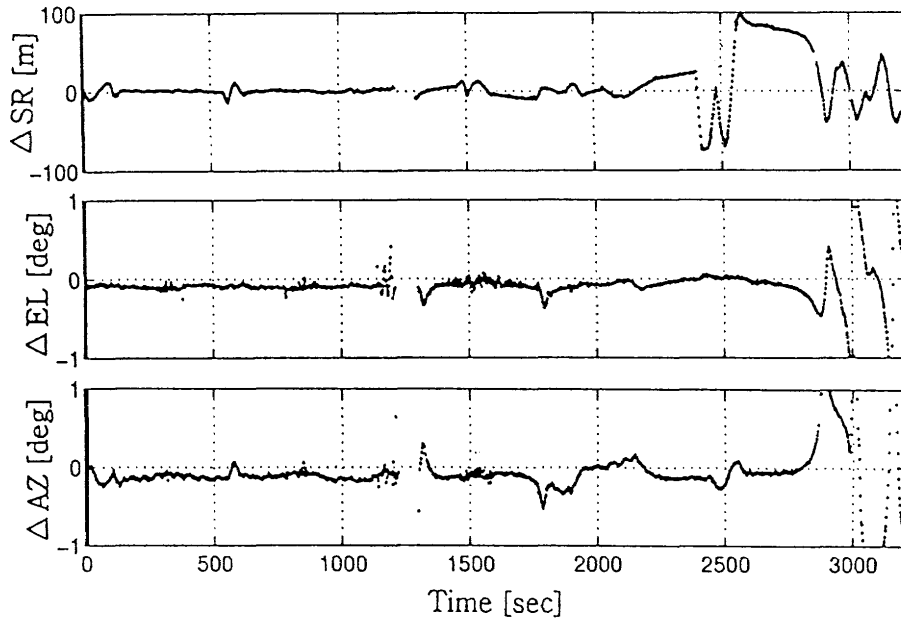


図6.3 レーダ・データとGPSデータとの差

表6.1 航空写真による校正結果

	バイアス	標準偏差
SR(m)	12.5	4.8
EL(deg)	-0.33	0.023
AZ(deg)	-1.14	0.049

表6.2 較正值

	バイアス	標準偏差
SR(m)	1.37	0.99
EL(deg)	-0.093	0.023
AZ(deg)	-0.124	0.026

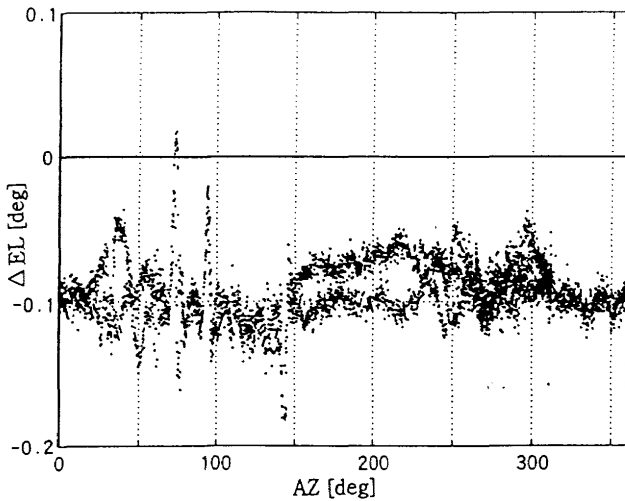


図6.4 ELの特性

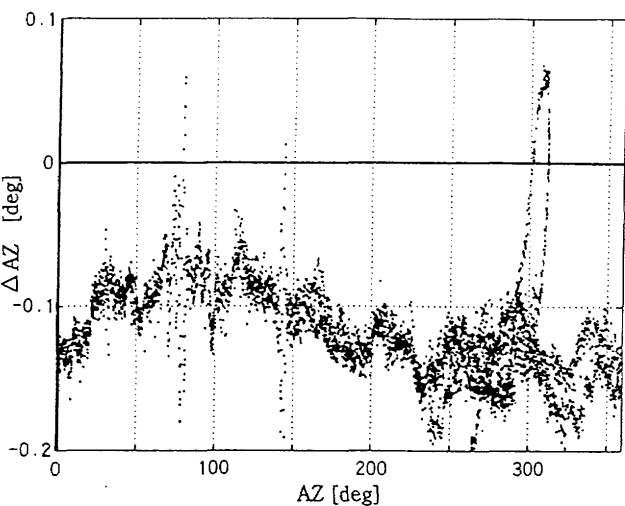


図6.5 AZの特性

6.2.2 AZの特性

AZの特性を確認するために図6.5にAZに対するAZ偏差を示す。レーダの静止精度が0.01度であることから考えて、バイアス分のみの補正で充分であると考えられる。

6.2.3 較正值

表3.1に示した性能は静止精度であるため、航空機のような動体の場合、一般的には精度はこれより劣化するとと思われる。したがって較正值の精度は、静止精度を基準にすれば充分であると判断した。

改修前の性能として文献3の結果を表6.1に示す。この結果は航空写真を利用して較正したものである。バイアス値に関しては、前述した通り単体較正の精度に依存するため直接性能とは関係が無い。

今回の飛行試験から得られた較正值を表6.2に示す。この結果から、改修後も従来の性能が維持できたと考えられる。このうちバイアス分は、レーダ装置に入力して、

以降の実時間計測データに反映される。

表 6.2 の標準偏差は、較正データを得る目的で、最も追尾が安定している領域のみを抽出して、算出した値である。飛行試験での追尾の全飛行時間を通した場合は、一般的にはこれより偏差は大きくなると考えられる。しかしながら、その度合いは飛行条件によって大きく異なり、機体の姿勢によっては追尾自体が出来なくなることもある。したがってトラッキング・レーダの総合的な測位精度を単一の値で表現することは困難である。ただし実際に航空機を追尾している状態をボアサイト・カメラにより監視した結果、トランスポンダ・アンテナを中心に捉えている状態のほか、主翼あるいは尾翼等の突起物の先端を不規則に捉えていることが判明した。したがって、主翼あるいは尾翼等によるマルチパスの影響は、機体の大きさに限られ、測位精度としては、十分な受信強度が保持できる限り、機体の大きさに上記のような条件が良い場合の標準偏差を加えたものとして表現できると考えられる。

7. まとめ

今回の改修後の飛行実験によって、以下のことが明らかになった。

- 1) 交換・追加した装置は、正常に動作した。
- 2) ジョイスティックによるアンテナの操作および経路の三次元表示の利用によって、手動による初期捕捉が容易になった。
- 3) データ伝送機能の追加により、レーザ・トラッカの初期捕捉が容易に行えるようになった。また、外部から機体の位置データを入力することにより、トラッキング・レーダの初期捕捉も容易になった。

4) DGPS 測位を利用した飛行試験における較正の手法を確立したため、短時間で較正データが得られるようになった。この手法は DGPS 以外による基準位置データが供給された場合にも適用できる。

5) 飛行試験により ALFLEX 国内試験のレーダ設置位置での較正值としてバイアス分が得られた。

今回の飛行実験を行うに当たり、川崎重工業株式会社には実験場として名古屋第一工場の使用を快諾していただいた。明星電気株式会社にはトラッキング・レーダの操作を援助していただいた。設置場所の測量解析および基準として使用したキネマティック GPS による位置データの取得は、制御部張替正敏主任研究官および同部辻井利昭技官が担当した。

参考文献

1. 矢澤健司他：HUD によるレーダガイダンスについて、第 23 回飛行機シンポジウム講演集 (1985)
2. 永安正彦他：小型自動着陸実験 (ALFLEX) 計画、第 32 回飛行機シンポジウム講演集 (1994)
3. 日立製作所：レーザ追尾システム取扱説明書 (1995)
4. 矢澤健司他：航空写真による航空機地上追跡用レーダの較正、航空宇宙技術研究所報告 TR-861 (1985)
5. 張替正敏他：自動着陸のための GPS 航法システム、第 33 回飛行機シンポジウム講演集 (1995)
6. 日本機械学会：交通・物流における GPS 利用、講習会教材 No.930-84 (1993)
7. 友田好文ほか編：地球観測ハンドブック、東京大学出版会 (1985)

正誤表 (TR-1312)

	誤	正
目次 4行目	4. トラッキング・レーダの概要	4. トラッキング・レーダ改修の概要

航空宇宙技術研究所報告1312号

平成8年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.