

DME - DME 進入援助方式

水 町 守 志・本 山 澄 夫

1. はじめに

航空機が安全に目的地に航行できるためには、(1) 現在位置、(2) 正しい経路をたどるために必要な操縦の修正量を常に知る必要がある。これを可能にするのが航法装置であり、航空機に搭載する航法装置の負担をできるだけ軽くすることを目的として地上の航行援助施設が開発されてきた。近距離航行援助方式には航空機に対して地上援助施設からの方位角情報 (θ) と、距離情報 (ρ) を与えるものがある。第1表にその種類を示す。方位角情報を与える方式は送信アンテナパターンに基づいて方位角信号を作成するもので、測角精度はあまり良くない。VOR の場合システム誤差は2.5度と言われている。さらに我国のように地上局の立地条件にめぐまれていない場合は山岳の電波の反射などで誤差は10度に達することもある。距離情報は航空機と地上局間の電波の往復時間を測定するもので、測距精度は比較的良い。航空機側では得た情報と既知である援助施設の位置情報を組合せ現在位置の決定を行うが、その組合せとして次の三種類がある。

- (1) $\theta - \theta$ 二地上局
- (2) $\rho - \theta$ 同一地点に設置すれば一地上局
- (3) $\rho - \rho$ 同一直線にない三地上局

現在では $\rho - \theta$ 航法が主流であり、そのための航行援助施設として VOR - TAC, VOR - DME がある。最近普及したエリアナビゲーション方式 (R - NAV) も情報源として $\rho - \theta$ を用いているが、 θ 情報の精度の悪さから航法の誤差は大きい。特に空港周辺では航空機の飛行高度が低いので進入経路からはずれることは騒音被害を増すことにつながるので精度の良い進入方式が望まれる。一方 ρ 情報は精度が良いのであるが、原理的に三情報ないと位置が決定できない欠点があるので今まで用いられて来なかった。ここでは DME 装置の改良と使用方法をかえることにより、新しい精度の良い方式を考案しようとするものである。

1.1 DME システムの構成

DME は航空機に DME 地上局からの距離情報を提供するものであり、航空機が搭載している機上装置 (Interrogator) と地上装置 (Transponder) とから構成される一種の二次レーダ方式であり、距離測定はパルス信号が二点間を往復する時間を測定することにより行われる。

機上装置の発射した 1 GHz 帯の電波による質問パルスは地上装置により受信される。地上装置はこの受信質問パルスを復号し、システム遅延 50 μ s を設定し再び符号化し、質問パルス周波数と 63 MHz 離れた周波数で送信する。地上局は質問パルスの無いときも約

第1表 航行援助施設の種類

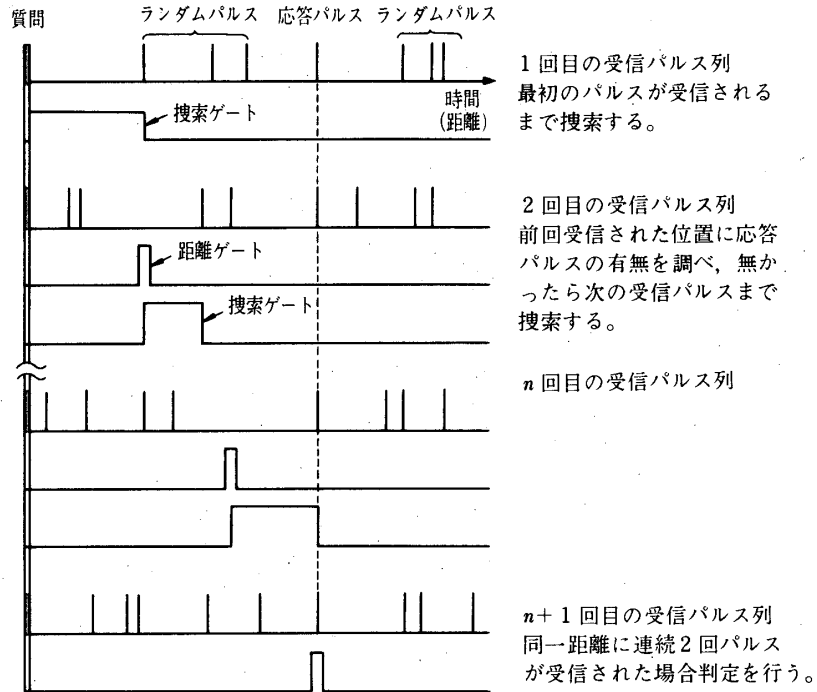
情報の種類	施設名	動作原理
方位角(θ)	VOR	磁北を示す基準信号と受信方位によってかわる可変位相信号の位相差から測角する。
	NDB	機上の方向探知機(ADF)で地上局の方位を測角する。
	TACAN	軍用。方位基準パルスと受信方位によってかわる受信パルスの振幅変化から測角する。
距離(ρ)	DME TACAN	TACAN測距部と同原理。チャンネルも共用できる。機上より質問パルスを発射し地上局で受信応答する。 機上で電波の往復時間から測距する。

1000 pps でランダムパルスを送信しているが、質問の増加とともに送信パルス数も増大し、最大約2700 pps (応答パルス, 局識別パルス, ランダムパルス) のパルスを送信する。ランダムパルスはスキッタパルスとも呼び、その周期は受信機熱雑音に基く不規則なものである。質問パルスが到来すると、スキッタパルスはその分だけ応答パルスにおきかえられて、その総数が約1000 pps から2700 pps に保持されるようになっている。応答パルスを送信後60 μ s は他の質問に回答できない。

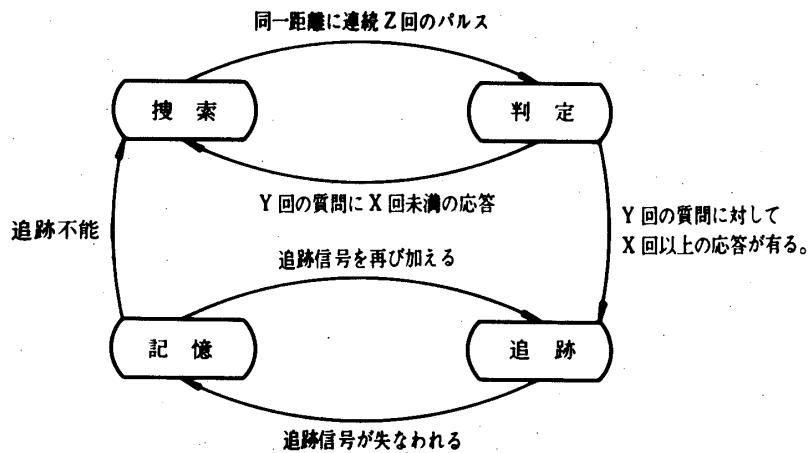
機上装置において質問パルスはジッタコーデットパルス(時間間隔が不規則であり、各航空機が独自の系列を持つ)をもとに変調される。つぎに受信したパルス列の中から自機の質問パルスに同期した応答パルス列を検出する。自己固有のパルス列が検出されることにより自己の応答パルスと判定し、追跡状態に入り距離を求める。質問パルスは搜索状態で130~150 pps, 追跡状態で20~30 pps であり、搜索機5機, 追跡機95機が一つの地上局に質問したとすれば約3200の応答パルスが必要であるが、機上装置は質問の70%に対する応答が得られれば確実に動作するように設計されている。距離精度の規格は0.2 NM である。

1.2 高速搜索方式

DME 機上装置では各航空機独自の時系列を持つ質問パルスを送信し、地上局の応答を得る。受信パルス列(自機に対する応答, 他機に対する応答, ランダムスキッタパルス)の中から自己固有の質問パルスに同期した応答パルスを搜索する操作を行わなければならない。そのため受信信号を記憶装置に記憶し、質問パルス列と相関を取る方法が用いられていたが、記憶装置(磁気ドラム等)の容積, 重量が大きく、搜索時間が長いので、現在はデジタル回路による高速搜索方式が用いられている。質問を開始してから距離測定が行われるまでの搜索時間に関する考察のため、高速搜索方式について述べる。この搜索方式では各質問パルス間の受信信号を質問パルスに同期した距離ゲートを動かしながら第1図に示すように搜索してゆく。第1回目の質問では送信時点から最初のパルスが受信されるまでを搜索する。第2回目では前回受信された位置に距離ゲートを開き、受信パルスの有無を調べる。無かったら次の受信パルスが得られるまで搜索し、次の距離ゲートの位置とする。前回と同位置の距離ゲートに続けてZ個の受信パルスが入ると、引き続きY個の質問に対して同位置にX個以上受信されるかどうかを調べる。X個以下の場合、再び次の受信パルスが得られるまで搜

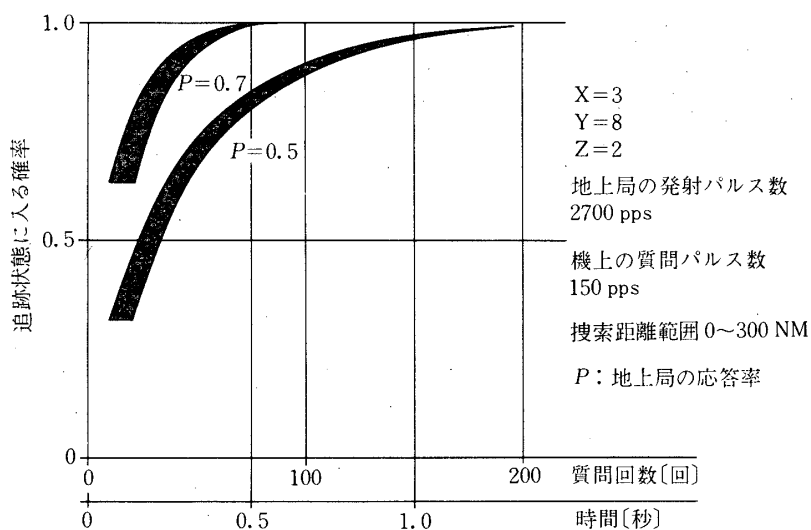


第1図 搜索状態での時間関係



第2図 機上装置の状態遷移

索し、次回の距離ゲートの位置を決める。X個以上受信された場合は距離測定を実行する追跡状態に入り、またこの状態では航空機の運動に伴う距離ゲートの補正も行う。搜索、追跡状態の変化を第2図に示す。記憶状態はDME地上局がモールスによる局符号を送信する場合など追跡状態が失われたとき入る。



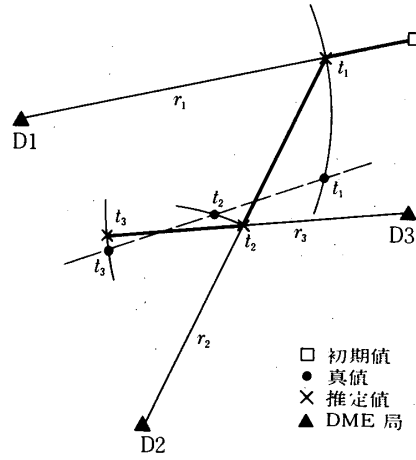
第3図 機上装置の捕捉特性

この方式の搜索時間を求めるため、地上局の発射パルス数、機上の質問パルス数、自己の質問に対する地上局の応答率 P 、搜索距離範囲、 X 、 Y 、 Z を仮定して計算を行った。設定した距離範囲内で追跡状態に入らない場合は、繰り返し初めから搜索するものとする。結果を第3図に示す。この方式では応答率 P が0.7のとき0.5秒で99%以上追跡状態に入る。地上局の応答率 P が大きくなると、地上局の発射パルス数が少なくなると、搜索時間は短くなる傾向をもつ。

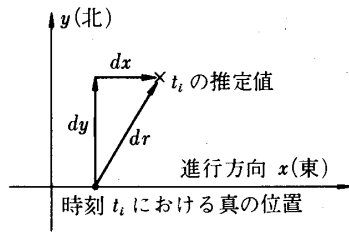
2. DME による航空機の位置推定法

距離情報のみによる航空機の位置推定を行うには、三地上局からの距離情報が同時に得られなければならない。しかし現在用いられている DME は一地上局からの距離情報を連続的に得ることができるが、三局からの距離情報を得るには装置の一部を共用するとしても多重装備にしなければならない。これは航空機側にとって大きな負担となる。また三局同時に使用することは DME のチャンネル間隔が 1 MHz であるので、チャンネル間の干渉等の技術的に難しい問題が起る。そこで現用の機上装置に改良を加え、機上装置を一系統とすることとし、距離情報の収集方法を変え、位置推定アルゴリズムを用い精度良く位置推定を行おうとするものである。

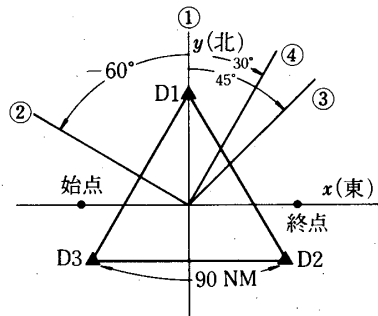
この方式では一地上局からの距離情報を機上装置で連続的に追跡するのではなく、地上の多数局の中から局 D_1 を選び、時刻 t_1 での距離 r_1 を得る。次の情報収集時間 t_2 までの間に局 D_2 のチャンネルに変更する。 t_2 において局 D_2 からの距離 r_2 を得る。以下この操作を繰り返して多数（三局以上）の地上局を順次走査して情報を収集して行く。走査の時間間隔 Δt は前述の DME 機上装置の搜索時間、チャンネルの設定時間などを考えても、5秒程度にはできる。このようにすれば機上装置は一系統にできる。しかし、この方式で得られる情



第4図 距離情報による位置推定



第5図 計算結果として求める誤差



第6図 地上局の配置と飛行経路

報は『時刻 t_j において航空機は局 D_i から直距離 r_j にある』ということで、同時に三地上局からの距離を得たのではないので、位置推定の方法に工夫が必要である。

2.1 距離情報を用いた方法

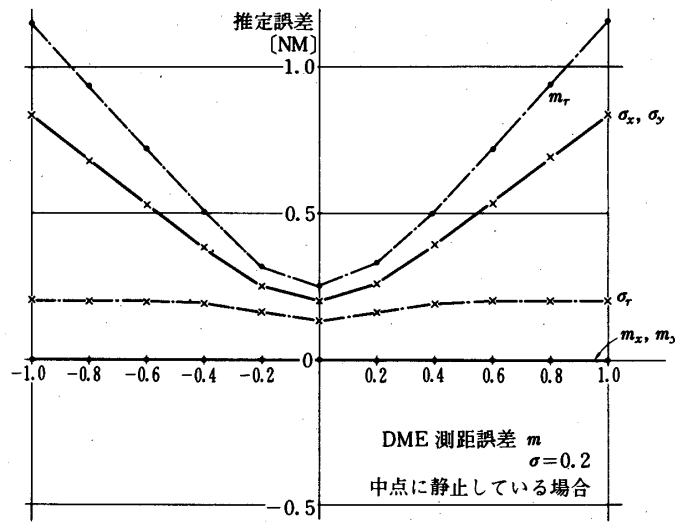
第一法として第4図に示す方式を考えた。使用する地上局は同一直線上にない三局以上とする。まず、それまでの飛行情報をもとに初期位置を仮定する。時刻 t_1 において局 D_1 を選び距離情報 r_1 を得る。初期位置と局 D_1 と結ぶ直線上で局 D_1 から距離 r_1 にある点で初期位置から最短距離にある点を時刻 t_1 における推定値 x_1 とする。次の段階では時刻 t_2 において局 D_2 を選び距離情報 r_2 を得る。前の段階と同様に、推定値 x_1 と局 D_2 を結ぶ直線上で局 D_2 から距離 r_2 にある点で推定値 x_1 から最短距離にある点を時刻 t_2 における推定値 x_2 とする。以下同様な方法で時刻 t_j における推定値 x_j を求めて行く。この方法の基本的な性質を知るためにシミュレーションを次の仮定で行った。

- (1) 航空機の位置を直交座標 x, y 平面で考える。
- (2) 航空機は x 軸上を速度 V_f で等速運動する。
- (3) 地上局の配置は原点を中点とする一辺 90 NM の正三角形とし、三局を順次走査する。
- (4) 測距データは真の距離に平均値 m 、標準偏差 σ の正規分布をもつ誤差が加わったとする。
- (5) 走査の時間間隔 Δt は 5 秒とする。
- (6) 飛行距離は $(-50, 0)$ を始点とする 100 NM とする。
- (7) 設定する初期値は真の位置とする。

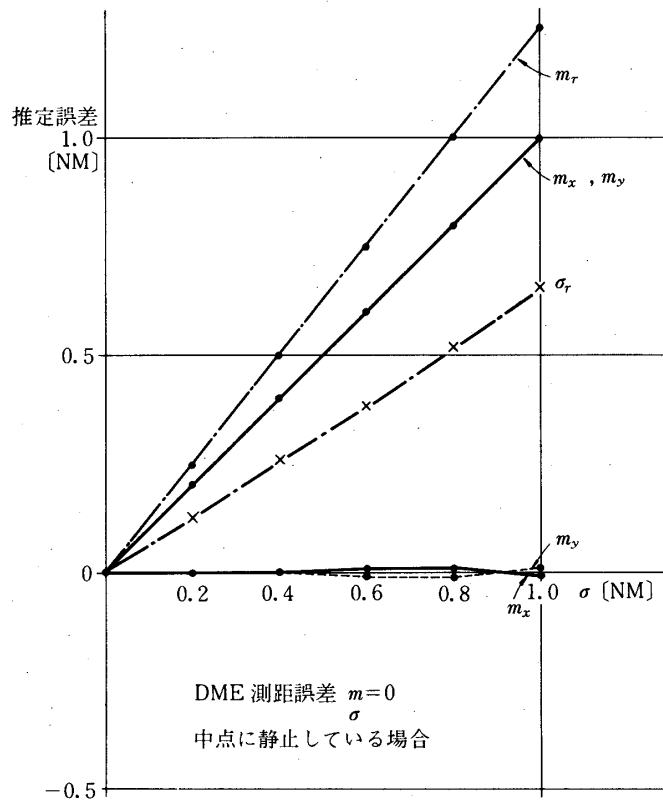
シミュレーションの結果として求めるものは第5図に示す x 方向の誤差 dx 、 y 方向の誤差 dy 、距離誤差 dr の平均値、標準偏差と局の配置を変えることによる諸量の変化である。

第2表 局の配置による誤差の変化

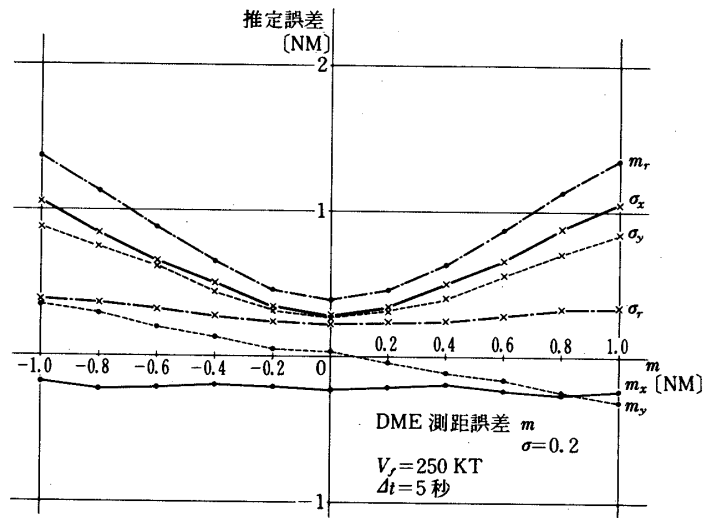
局 置	m_x [NM]	m_y [NM]	m_r [NM]	σ_x [NM]	σ_y [NM]	σ_r [NM]	条 件
1	-0.22	-0.02	0.29	0.18	0.18	0.18	$m = 0$ $\sigma = 0$ [NM]
2	-0.22	-0.02	0.29	0.19	0.18	0.18	
3	-0.22	-0.05	0.28	0.19	0.17	0.18	
4	-0.18	-0.04	0.25	0.20	0.13	0.17	
1	-0.22	-0.11	0.59	0.44	0.37	0.19	$m = -0.4$ $\sigma = 0$ [NM]
2	-0.22	-0.15	0.61	0.44	0.39	0.22	
3	-0.14	-0.18	0.60	0.43	0.40	0.20	
4	-0.05	-0.09	0.52	0.43	0.30	0.13	
1	-0.22	-0.01	0.58	0.43	0.45	0.30	$m = 0$ $\sigma = 0.4$ [NM]
2	-0.18	-0.04	0.57	0.42	0.44	0.30	
3	-0.22	-0.04	0.60	0.45	0.45	0.32	
4	-0.19	-0.06	0.58	0.46	0.42	0.31	



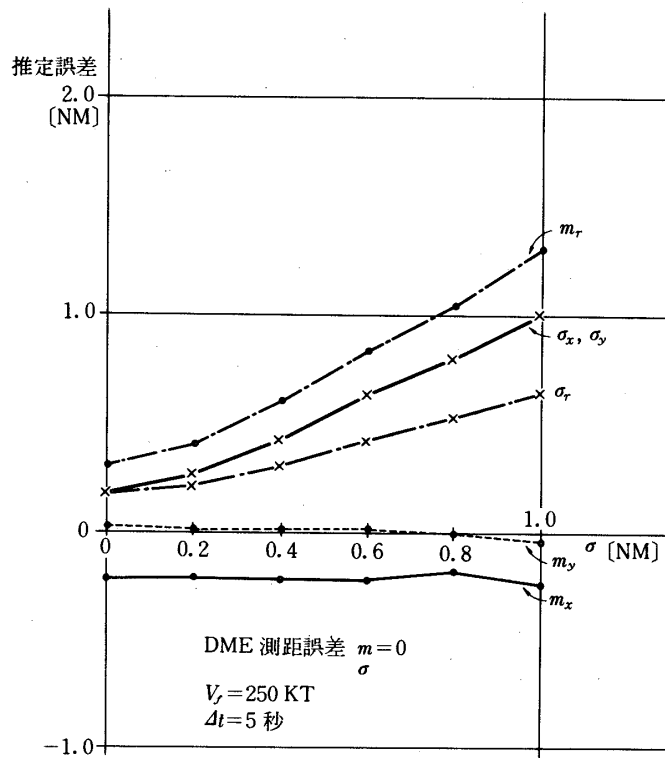
第7図 距離情報による位置推定



第8図 距離情報による位置推定



第9図 距離情報による位置推定



第10図 距離情報による位置推定

結果の一部を第2表と第7図から第10図に示す。

x方向の誤差の平均値 m_x は測距誤差のない場合でも常に負の値をとる。第7図の航空機が座標原点に静止している場合と照し合せれば、これが航空機の色度による推定値の遅れであることがわかる。x方向の誤差の平均値 m_x 、y方向の誤差の平均値 m_y は、測距誤差の平均値 m が大きな所で局の配置による個有の傾向を持つ。 m の小さい場合は影響が少ない。測距誤差の標準偏差 σ は m_x 、 m_y に大きな変化をおよぼさない。以上のことから定常的な誤差、特に m_x を補正する方法を考えないとこの方法は使用することができないことがわかる。

2.2 距離情報と推測航法を用いた方法

前述のアルゴリズムでは進行方向に常に遅れる傾向を持つ。この原因が航空機の色度によるものと考え、推測航法 (dead-reckoning) 成分による補正を考えた。

第一法の距離測定時間間隔 Δt 間の航空機の色度、針路情報を得た上に次のような成分を付け加える第二法を検討した。

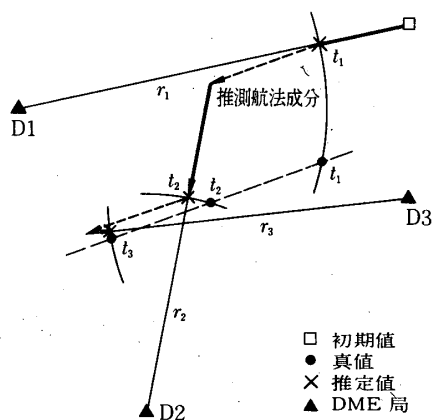
$$\Delta x = k \cdot \Delta t \cdot \text{TAS} \sin \text{TH}$$

$$\Delta y = k \cdot \Delta t \cdot \text{TAS} \cos \text{TH}$$

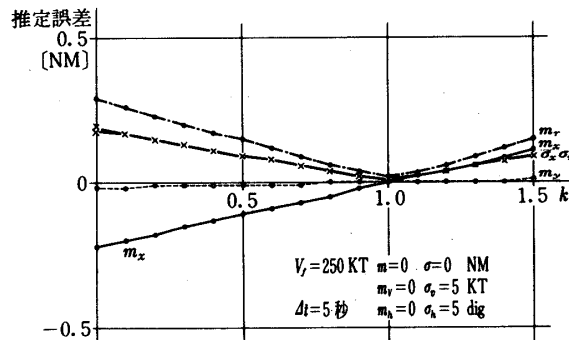
ここで、TAS は真対気速度、TH は真機首方位、 k は補正のための係数である。両情報のセンサとしては通常どの航空機にも装備されている対気速度計と磁気針路計を用いるものとし、なお対気速度計は風による誤差があるが、ここでは一応対地速度と考え、シミュレーションにおいて速度測定誤差の影響を見ることとした。第二法の手順を第11図に示す。第一法の諸条件に次の条件を加えシミュレーションを行い方式の検討を行った。

- (1) 推測航法の補正係数は0～1.5までとする。
- (2) 速度測定誤差は平均値 m_v 、標準偏差 σ_v の正規分布を有する。
- (3) 針路測定誤差は平均値 m_h 、標準偏差 σ_h の正規分布を有する。

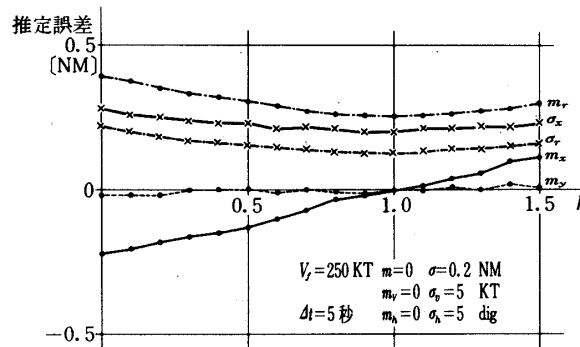
結果を第12図から第17図に示す。y方向の誤差の標準偏差 σ_y はx方向の誤差の標準偏



第11図 距離情報と推測航法による位置推定



第12図 距離情報と推測航法による位置推定

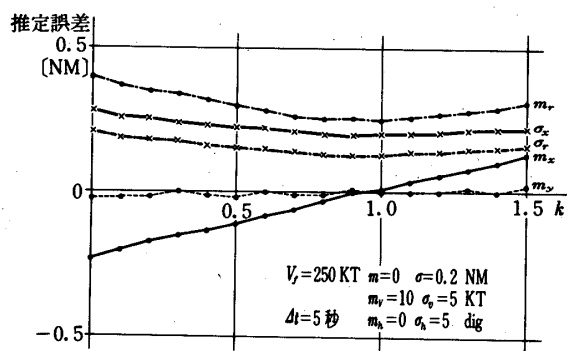


第13図 距離情報と推測航法による位置推定

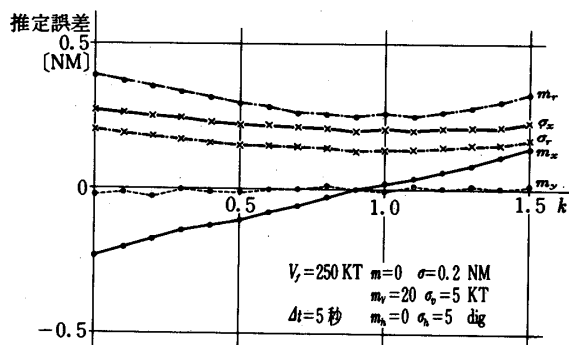
差 σ_x とほぼ同じ値を取るのので、グラフには示していない。ここで補正係数 $k=0$ は第一法を意味する。速度測定誤差の平均値 $m_v=0$ の場合 m_x の値は $k=1$ で0になり、速度成分の補正の効果が第一法に比較して良く表われていることがわかる。また他の値も $k=1$ で最少値をとる。一方 m_v の値が正の場合は k の値の小さい方、 m_v が負の場合 k の値が大きくなる方に最少値が移動する。これは $m_v=0$ で k の値が1以上になったとき、1以下になったときと同じ効果であることがわかる。航空機が250 KTで飛行している場合二割程度の速度測定誤差があっても推定誤差の増分は0.05 NM以下である。このことから速度センサとしてはドプラレーダのような対地速度が測定できるものでなく、対気速度計であってもよいと言える。この方式の各誤差成分は99%以上が0.7 NM以下になり、位置推定は高精度である。

3. 搭載機器の構成

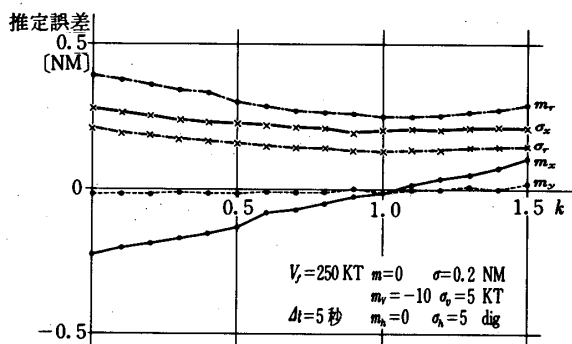
ここで述べた方式を実現するには第18図に示すような機器の構成が考えられる。点線内はほぼ現用の機上機器と同じである。地上局の選択、計算の実行を外部に設けた計算機で行



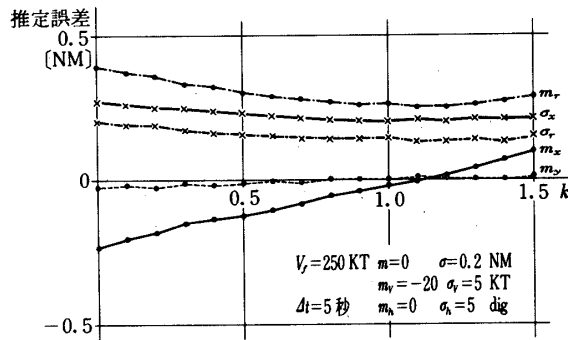
第14図 距離情報と推測航法による位置推定



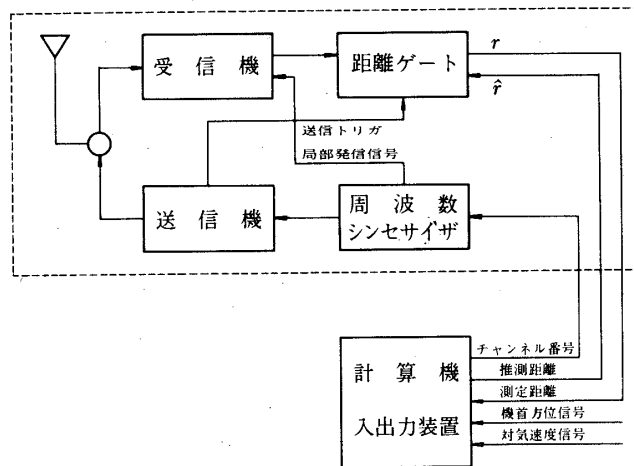
第15図 距離情報と推測航法による位置推定



第16図 距離情報と推測航法による位置推定



第17図 距離情報と推測航法による位置推定



第18図 機上機器の構成

う。周波数シンセサイザにチャンネル番号を与え送信周波数を作る。受信機の間周波数を 63 MHz に選べば局部発信周波数は送信周波数と同じで良い。測定された距離をもとに計算を行い位置推定を行う。次の局の選択の場合、前回の結果からおおよその距離範囲が推測されるので、DME 装置での検索は全距離範囲に渡って行う必要がない。このことによって検索時間は短縮される。送信パルス数も常時検索状態のパルス数約 150 pps 送信しなくても現用装置の検索時間と同程度にできる。このため地上局に過大な質問を行い応答率を低下させることも防げる。現用の機上機器で改良が必要な部分は距離ゲート周辺部分だけである。機器の制御と推定計算を行う外部の計算機であるが、前述のシミュレーションの中心部分をなす位置推定プログラムがフォートランで約 60 ステップで実行できるので、小型計算機で十分であると考えられる。

おわりに

DMEによる航空機の位置推定方式について検討を行ったが、この方式を実用化するためには測距誤差に対する考察、高度のある場合、推定精度と局の配置の関係などについて検討を加えなければならない。また機器的な面ではチャンネル変更に必要な時間、搜索時間などを実際に機器を動作させて調べることが必要である。今回のシミュレーションではこの方式の基本的性質を知ることができた。

1978年1月9日 計測部