

空 中 線 安 定 方 式

沢 井 善 三 郎
東 口 實
山 下 道 夫

Antenna Stabilization System

By

Zenzaburo SAWAI, Minoru HIGASHIGUCHI
and Michio YAMASHITA

Abstract: Some considerations of the antenna stabilization system in an airborne Doppler radar and its experimental results so far obtained are reported in this paper. Although the so-called data stabilization system is also used for the same purpose, it is discussed in an accompanied paper in this issue.

The antenna stabilization system consists of two main parts; that is, a Vertical Reference and a Follow-up Servo Loop. How to determine a reference line (the vertical or the horizon) in an inertial space is an important problem, and it is considered briefly. In this paper, however, an emphasis is laid on discussions of the follow-up servo in the antenna control system, the input signals of which are a pitching, a rolling and a yawing signal referred to an aircraft attitude. Such a servo system is also built by using a vertical gyro as a reference, for examining the overall performance and characteristics of control elements such as magnetic amplifiers, balancing of pitch and roll frames, etc..

概 要

機上用ドブラレーダにおける空中線安定方式に関して考察し、現在までに得られた結果について報告する。同様の目的のものとしてデータ安定方式があるが、これは別の項で述べる。空中線安定系は二つの主要な部分すなわち垂直基準系とそれに追従する閉ループ追従制御系とから構成される。一般に、慣性空間においては垂直にしる水平にしるその基準をどこに、いかにとるかということはあらゆる場合に最も基本的な問題となるであろう。しかしここではこの問題については単に概略のみを述べたに過ぎない。本文では追従制御系に重点を置き、機体の動揺すなわち、ピッチ、ロール、ヨーなどの信号によって、いかに空中線系の安定化を計るかという問題について考察した。垂直ジャイロを用いて実験装置を試作し、個々の制御要素について検討した。ここに構成した装置はサーボ増幅器をはじめ他の要素の組み合わせの面からみても完全なものとは言えず更に検討を加え改良の余地もあるであろう。ここに示したものは単に空中線安定系の一例に過ぎない。

目 次

1. 緒 言	3.1. 垂直ジャイロ
2. 空中線安定系の機構	3.2. 空中線架台
2.1. 基 準 系	3.3. 追従制御系
2.2. 追従制御系	3.4. 附 加 装 置
2.3. 安定系の構成	4. 結 言
3. 試作装置について	参 考 文 献

1. 緒 言

機上用ドプラレーダを用いて航空機を速度を測定する場合、直接測定されるものは、空中線系に準拠した座標系における速度成分に比例した量である。したがって航空機の地表面に対する速度成分を得るには、次の二つの方法が考えられる。

(1) 空中線安定方式 (Antenna Stabilization System)

これは空中線を航空機の機体にジンバル系を用いて支える方式であって、空中線は常に水平に維持される。しかし場合によってはその基準方向を航空機の進行方向と一致させることもある [1]。

(2) データ安定方式 (Data Stabilization System)

これは空中線を機体に固定して空中線のピッチ・ロール角を検出し、アナログ計算機またはデジタル計算機を用いて座標変換を行なう方式である。

この両者の中間のものとして、たとえば空中線のピッチ・ロール角に対する修正を段階的に変化させ、さらにその細かい部分の修正に簡単なデータスタビライザを用いる方式、あるいは (1) の方式で空中線の基準方向を地表面に対して固定しておく方式なども考えられる。

上記の (2) の方式については、その座標変換式とともに別に述べる [2]。したがってここでは主として (1) の方式について考察する。

一般に、航空機のように地表面をはなれて航行する系において、その進行方向、地表面に対する相対的位置を知ることは、いかなる場合においても必要欠くべからざる条件である。機上用ドプラレーダを用いる場合にも、最終的には地表面に対して一定の関係をもった基準系に準拠した情報を得なければならない。この意味で何らかの基準系を必要とすることは上記 (1)、(2) のいずれの方式であっても変りはない。ここでは機上用ドプラレーダに対する応用を主眼とし、さらにひろく基準を与える系としての空中線安定系について考察し、試作した装置について述べる。

2. 空中線安定系の機構

空中線安定系は、(i) 基準系、(ii) 追従制御系を主体として構成される。すなわち、まず基準系によって地表面に対して一定の方向をもった座標空間を規定する。しかる後、これに応じて空中線をその座標空間において一定の方向をもつべく追従させるものとする。たとえば地表面に対する機体の動揺は基準系と機体系との間の誤差信号として得られるので、これを空中線安定系の入力信号とし、基準系に追従させるようにしてもよい。

2.1. 基準系

基準系で最も基本的な役割を果すものは通常ジャイロ스코プである。すなわち、高速で回転している“こま”は慣性空間に対して一定の方向を維持する性質をもつことから、これを適当な方法で機体系に支えれば、これから方向基準を得ることができるからである。

今、我々がここで問題にしているのは、地表面に対する基準であり、そのためには鉛直軸を何らかの方法で決定しなければならない。地球上における鉛直について詳細に考えると種々なものがあり、その基準のとり方にもさまざまな方法が考えられている [3]。

重力の方向を検知し、これを直接ジャイロに伝えて摂動 (Precession) を生ぜしめる方式 (Vertical Gyro); 地球の回転ならびに航空機の加速度を検知して自己の位置を知り、これと重力の方向との関係を用いて制御ループを動作させる方式 (Schuler Loop) などがある。前者の方式は航空機に加速度を生じた場合、それがそのまま誤差になるので、加速度を無視し得る状態で、最初に設定をしておくことが必要である。後者は慣性誘導方式の基本となるものであり、最終的な精度はジャイロおよび加速度系のドリフトによって定まるものである。

次に機首方向基準としては、磁気コンパス、ジャイロコンパスなどがあり、さらにこれらの精度を上げるものとして慣性誘導方式の基準系に至るまでの加速度計を組み合わせたさまざまな段階の方式がある [1]。

しかし、いずれにしても基準系としては地表面上を対象としている限り地球表面に対して既知の方向を何らかの方法で検出し、これを基準としてジャイロに伝えているものと考えられる。

2.2. 追従制御系

追従制御系は基準系から得られる機体の動揺の信号 (ピッチ角, ロール角, ヨー角) によって安定化すべきもの、たとえば空中線に乗せる架台を水平に一定の方向に維持するように追従させるようなサーボ系である。Fig. 2.1 に空中線に乗せるための架台の一例を示す。

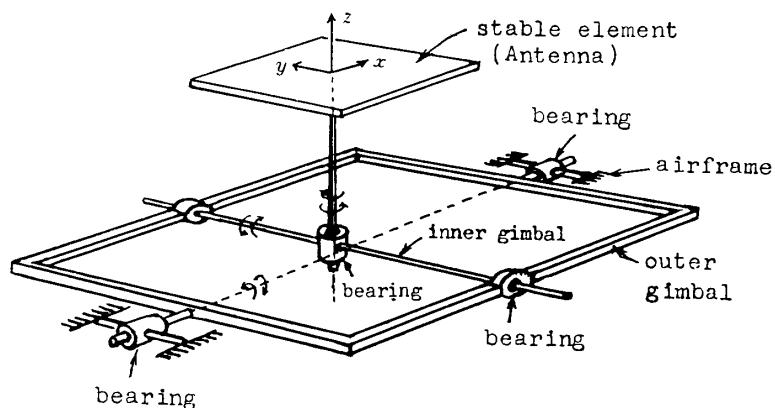


Fig. 2.1. The 3-axes stabilized table supported with gimbals.

2.3. 安定系の構成

空中線安定系の構成としては、基準系を空中線系とともに一つの架台に乗せる方式と、ほかにある基準系に追従させて空中線を安定化する方式とが考えられる。また、空中線の水平安定化のみをおこない、その基準方向を航空機の世界方向に一致させ、機上ドプラレーダを含む大きな制御系として空中線の水平面内の回転で偏流角を指示させる方式もある [4]。

3. 試作装置について

試作装置の概観を Fig. 3.1 に示す。また安定系のブロック図を Fig. 3.2 に示す。Fig.

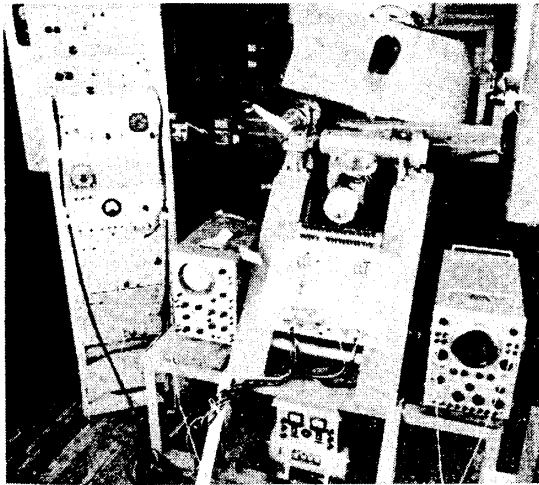


Fig. 3.1. An experimental antenna stabilization system.

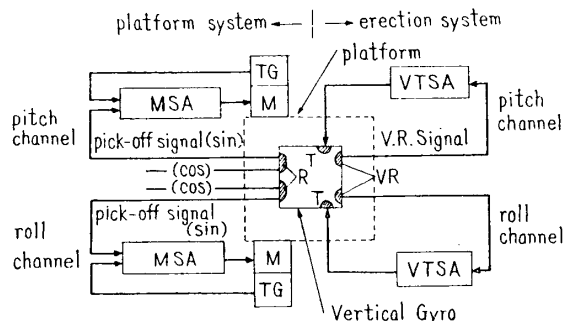


Fig. 3.2. A block diagram of an antenna stabilizer.

VR: vertical reference
T: torquer
R: resolver
TG: tachometer-generator
M: servomotor
MSA: magnetic servoamplifier
VTSA: vacuum-tube servoamplifier

3.2 の右半分は垂直ジャイロの垂直設定制御系, 左半分は水平安定化される追従制御系である. 以下これの各部について順次述べる.

3.1. 垂直ジャイロ

試作装置には Kearfott 製 T2104-1B Vertical Gyro を用いた. これは概念的には Fig. 3.3 に示されるような構造である. 図には示していないが, ジャイロ支持ジンバル内には電磁的機構に基づく垂直基準 (Vertical Reference) がある. また “こま” の位置修正用のトルクモータ, “こま” と筐体間の相互位置を検出するためのレゾルバはピッチ・ロールにそれぞれ対応して Fig. 3.3 に示す位置にある. ここで使用した Vertical Gyro の規格と動作特性のうち重要なものを Table 3.1 および Table 3.2 にかかげる

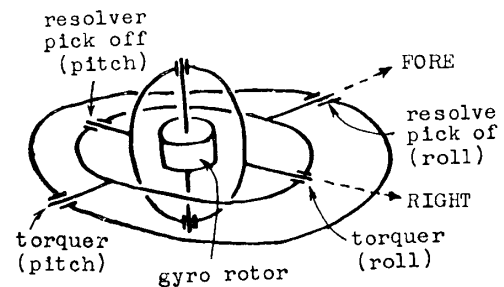


Fig. 3.3. The vertical gyroscope.

Table 3.1. DESIGN FEATURES OF VERTICAL GYROSCOPE

<p>DEGREES OF FREEDOM</p> <p>Two degrees of freedom gyro with $\pm 85^\circ$ freedom in roll and $\pm 85^\circ$ freedom in pitch.</p>	<p>Error: $15'$ Max. error spread through $\pm 45^\circ$</p> <p>Null: 30 mV RMS Maximum</p>
<p>PICKOFFS</p> <p>Type: Synchro Resolver</p> <p>Excitation: 26 Volts, 400 Cycle, Single Phase</p> <p>Voltage Gradient: 0.130 Volts/Degree</p> <p>Output Voltage: 6.4 Volts, Sinusoidal</p> <p>Impedance, Output Winding: (primary short-circuited) Direct axis $20+j 5.5$, Quad. axis $26+j 7.3$</p>	<p>MOTOR</p> <p>Synchronous, Hysteresis</p> <p>Excitation: 115 Volts, 400 Cycle, 3 Phase</p> <p>Power: Starting: 40 VA, 30 Watts max. Running: 30 VA, 15 Watts max.</p> <p>Speed: 24,000 rpm within 2 mins. time of starting</p> <p>Rotor Inertia: 900 g-cm^2</p> <p>Angular Momentum: $2.25 \times 10^5 \text{ g-cm}^2/\text{sec.}$</p>

Table 3.2. PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Repeatability to established vertical: To within a cone of half angle equal to 5 minutes of arc.	Free drift rate in 5 minutes of time: 2° max. at room temperature; 2½° max. at -54°C and +71°C
---	--

これを動作させるためには、(i) “こま” を回転させるための 115 V, 400 c/s, 3 相, 40 VA の電源と、(ii) Fig. 3.2 に示した右半分のトルクモータ用のサーボ増幅器ならびに、トルクモータ、レゾルバ励磁用の 26 V, 400 c/s, 単相の電源が必要である。

次に垂直ジャイロが航空機の姿勢に対して、どのような動作をするかを簡単に述べる。

3.1.1. Gyroscopic action について

非常に速い回転をしている“こま”に外部からトルクを加えると、“こま”は一般にトルクの方と異なる方向に傾く。すなわち、“こま”の角運動量のベクトルを \mathbf{M} 、外部から加えられるトルクを \mathbf{T} 、“こま”の運動（摂動）の角速度を $\boldsymbol{\Omega}$ とすると、これらの間には次の関係が成立する。

“こま”の回転角速度、慣性能率をそれぞれ $\boldsymbol{\omega}$, I として

$$\mathbf{M} = I \cdot \boldsymbol{\omega}, \quad \mathbf{T} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{M} = I \cdot \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\omega}$$

$$\text{あるいは} \quad |\boldsymbol{\Omega}| = \frac{|\mathbf{T}|}{|\mathbf{M}|}$$

である。したがって、“こま”はその角運動量 \mathbf{M} のベクトルの方向が加えられたトルク \mathbf{T} の方向に一致するような運動をする。この様子を示したのが Fig. 3.4 である。

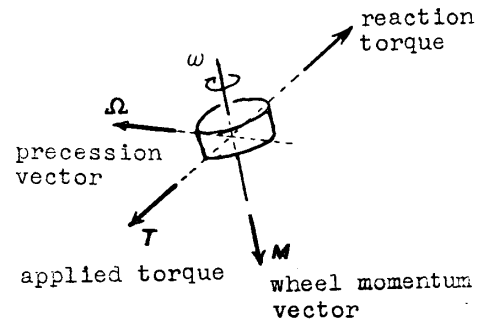


Fig. 3.4. The precession of a gyroscope.

3.1.2. 起立制御系（垂直の設定）

垂直ジャイロは Fig. 3.3 に示すように、ピッチ、ロール各軸に関してそれぞれ位置の設定をおこなう構造になっており次のような制御動作をする。

ピッチ動作、たとえば機首が上昇している場合には Fig. 3.5 に示すような摂動 $\boldsymbol{\Omega}_p$ を生ずればよい。そこで外部から \mathbf{T}_p の方向のトルクを加えてピッチ角を修正する。

ロール動作、たとえば右翼が下がっていく場合には Fig. 3.6 のように摂動 $\boldsymbol{\Omega}_r$ を生ずればよい。この場合には外部から \mathbf{T}_r の方向のトルクを加えてロール角を修正する。

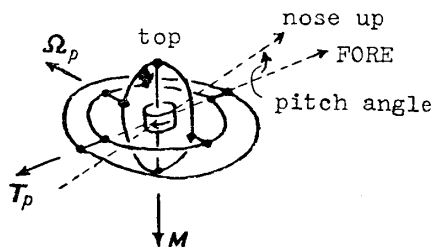


Fig. 3.5. Pitching action of the vertical gyroscope.

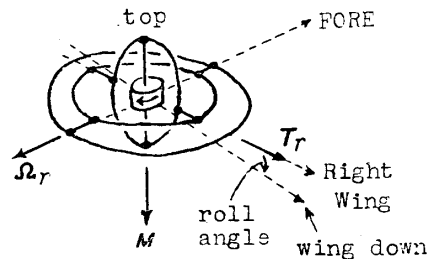


Fig. 3.6. Rolling action of the vertical gyroscope.

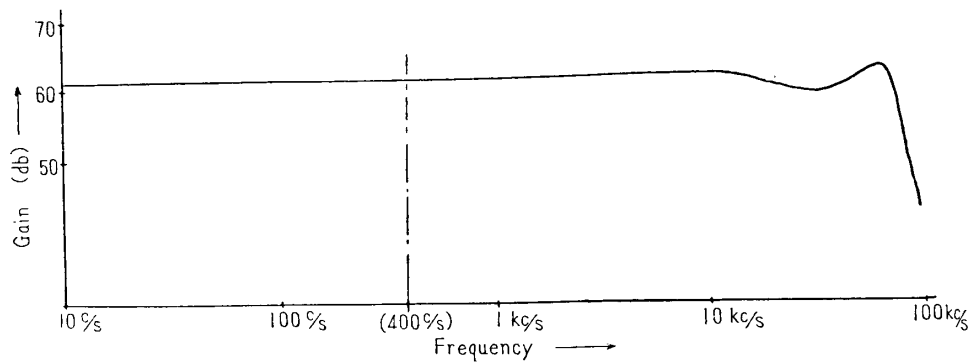


Fig. 3.7. The frequency response of the vacuum-tube servoamplifier.

このように垂直ジャイロの垂直の設定は行なわれるのであるが、具体的には 400 c/s で偏差の正負によって位相が 180° 異なる垂直基準のピッチ、ロールの信号でそれぞれロール軸、ピッチ軸上にある 2 相モータ（トルクモータ）を駆動することによって遂行される。すなわち Fig. 3.2 の右半分に示した制御ループを構成する。

Vertical Gyro の“こま”を直立させるためのサーボ増幅器 (Erection Amplifier) として真空管増幅器を用いた。6L6 プッシュプルで最大出力は約 19 W、電圧利得は約 60 db で、10 c/s ~ 50 kc/s で -3 db 以内の周波数特性を有する。この増幅器の負荷が誘導性であるために異常発振を起こし不安定を招きやすいので、トルクモータの制御巻線に並列に $0.45 \mu\text{F}$ の静電容量を入れて、400 c/s におけるリアクタンス分を打ち消している。Fig. 3.7 にこのサーボ増幅器の周波数応答特性を示す。

垂直ジャイロの“こま”が回転を始めると、その軸と重力の方向の偏差に比例した信号は、垂直ジャイロ内の垂直基準で検出され、サーボ増幅器によって増幅され、この偏差を零にするようにトルクモータに帰還される。これが起立制御系の役割であり、垂直位置に設定されるのである。

3.2. 空中線架台

空中線を乗せるための架台の構造を Fig. 3.8 に示す。ロールとピッチのフレームについては次のように組み立てた。

(1) ロールフレーム、材質はアルミで、大きさは $600 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 、重量は約 14 kg である（ただしこの中には垂直ジャイロ 7 kg、ほかに平衡をとるための荷重なども含んでいる）。ロール軸のまわりの慣性能率は約 0.72 kg-m^2 であり、またピッチ軸に平衡な軸については約 0.57 kg-m^2 である。

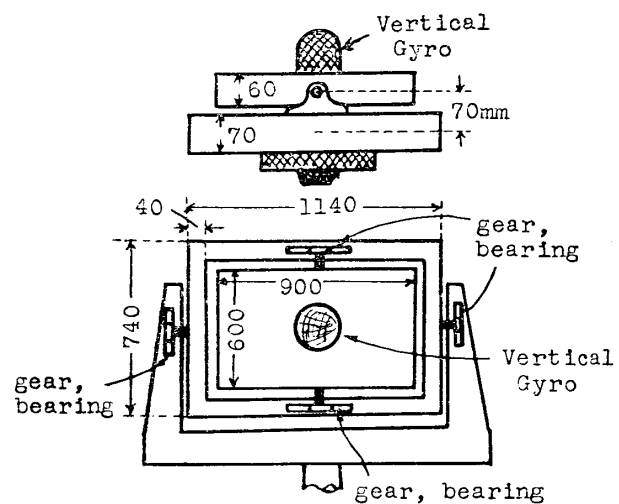


Fig. 3.8. Platform mechanisms.

(2) ピッチフレーム, 材質は鉄で約 6.7 kg の重量 (ロールフレーム支持部のみ) で, ピッチ軸のまわりの慣性能率は約 3.5 kg-m^2 である.

また, サーボモータと架台とにとりつけてある歯車比は 15:250 と 30:250 に交換できるようにしてある.

3.3. 追従制御系

垂直ジャイロからは空中線架台のピッチ角, ロール角の正弦, 余弦に比例した 4 個の出力が得られる. このうちピッチ角, ロール角の正弦に比例した 2 個の出力を用いてそれぞれピッチ軸, ロール軸をサーボモータで駆動し, 空中線架台のピッチ, ロール誤差を零にするような制御ループ (Fig. 3.2 の左半分に示した) を構成する. 次にこの制御系の主要素について述べる.

(1) サーボモータ

Kearfott 製 Servomotor-generator R801-2A-424586 (gear head) を用いた. このサーボモータで上記のピッチ軸, ロール軸を駆動する. ピッチ・ロール側とも同じサーボモータが使用してある. Table 3.3 と 3.4 にこれの電気定格と機械定格を示す.

Table 3.3. Electrical Ratings of Servomotor-generator.

MOTOR CHARACTERISTICS				GENERATOR CHARACTERISTICS	
	Fixed phase	Control phase		Excitation	Output
Voltage	115V	300V	150V	Voltage 115V	Volts at 0 rpm 0.013 RMS
Frequency	400 c/s	400 c/s	400 c/s	Frequency 400 c/s	Volts at 1000 rpm. 3.2 RMS
Current*	0.183A	0.067A	0.134A	Current 73 mA	Phase Shift
Power Input*	9.2W	9.6W	9.0W	Power Input 5.4W	at 0 rpm 85° lead
P.F.*	0.43	0.48	0.45	P.F. 0.64	at 50 rpm 4.5° lag
R*	280Ω	2140Ω	500Ω	R 1012Ω	at 3000 rpm 5° lag
X*	575Ω	3960Ω	1015Ω	X 1210Ω	at 5000 rpm 4.5° lag
Z*	640Ω	4500Ω	1120Ω	Z 1575Ω	Output Impedance 2200Ω
Effective R*	1460Ω	9400Ω	2500Ω	Effective R 2440Ω	Max. Speed for Linear Output 5000 rpm
Parallel tuning Condenser		0.08 μF	0.32 μF		

*: at stall value

Table 3.4. Mechanical Ratings of Servomotor-generator.

MOTOR	WITH GEAR HEAD
Rotor Inertia: 5.73 g-cm^2	Gear Down Ratio: 58.3
Torque at Stall: $2.4 \text{ oz-in} = 1.69 \times 10^{-2} \text{ N-m}$	Static Torque: $97.9 \text{ oz-in} = 0.691 \text{ N-m}$
No Load Speed: 4700 rpm	Backlash: 20'(max.)
Max. Power Output: 2.4 W	
Time Constant: 0.0167 sec	
Torque (at Max. Power Output): 1.4 oz-in	
Speed (at Max. Power Output): 2300 rpm	
Operating Temp. Range: $-54^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$	

(2) サーボ増幅器

大出力を必要とするので磁気増幅器を用いた [5]. はじめ Fig. 3.9 に示すようなダブラ回路を使用したか、負荷が交流モータの場合には、i) インダクタンスの影響、ii) 零出力時の環流電流、iii) 速度逆起電力の影響、などによって、たとえば Fig. 3.10-b, 3.10-c に示すような異常現象を生じて安定度が低下し、また Fig. 3.11 に示す外

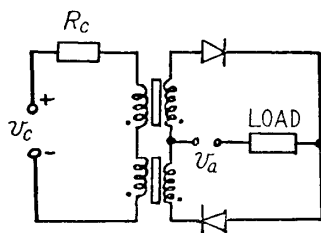


Fig. 3.9. A doubler circuit.

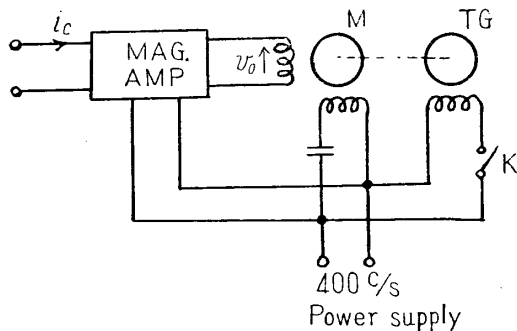
 R_c : control resistance v_c : control voltage (DC)

Fig. 3.10-(a). A test circuit of the magnetic amplifier (doubler circuit).

M: servomotor

TG: tachometer-generator

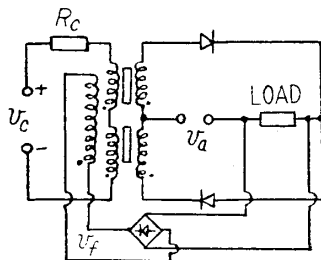
 i_c : control current (DC) v_o : output voltage

Fig. 3.11. An example of external feedback (voltage feedback).

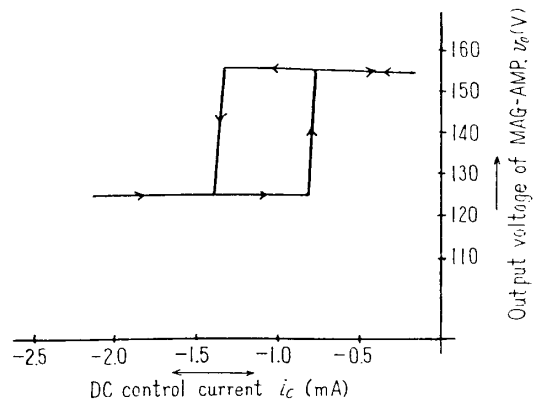


Fig. 3.10-(b). The jump characteristics of the magnetic amplifier. (switch K is off in Fig. (a))

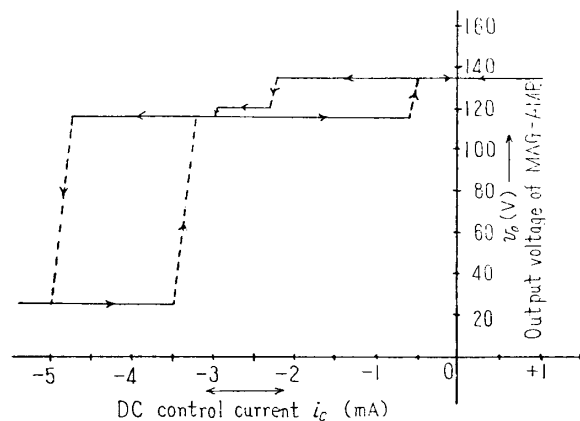


Fig. 3.10-(c). The jump characteristics of the magnetic amplifier. (switch K is on in Fig. (a))

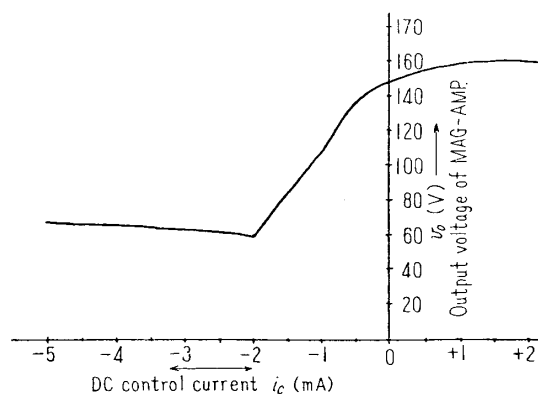


Fig. 3.12. Effects of external feedback in the magnetic amplifier (doubler circuit).

部帰還をかけて利得を下げれば Fig. 3.12 のように特性を改善することはできるが、入力に大電力を要すること、および上記の ii) の零出力時の環流電流があって使用上の欠点はまぬがれない。したがって出力回路には中間タップのある Geyger 回路 (Fig. 3.13) を用いた [6]。Geyger 回路はサーボモータが静止、すなわち磁気増幅器の出力が零の時に、サーボモータに流れる直流分電流が最大となり、これがブレーキ作用

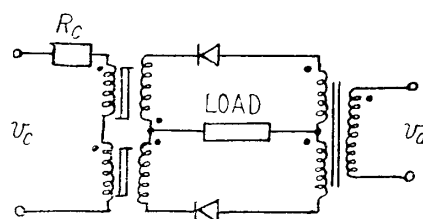


Fig. 3.13 The Geyger circuit with center-tap. v_c : control voltage (AC)

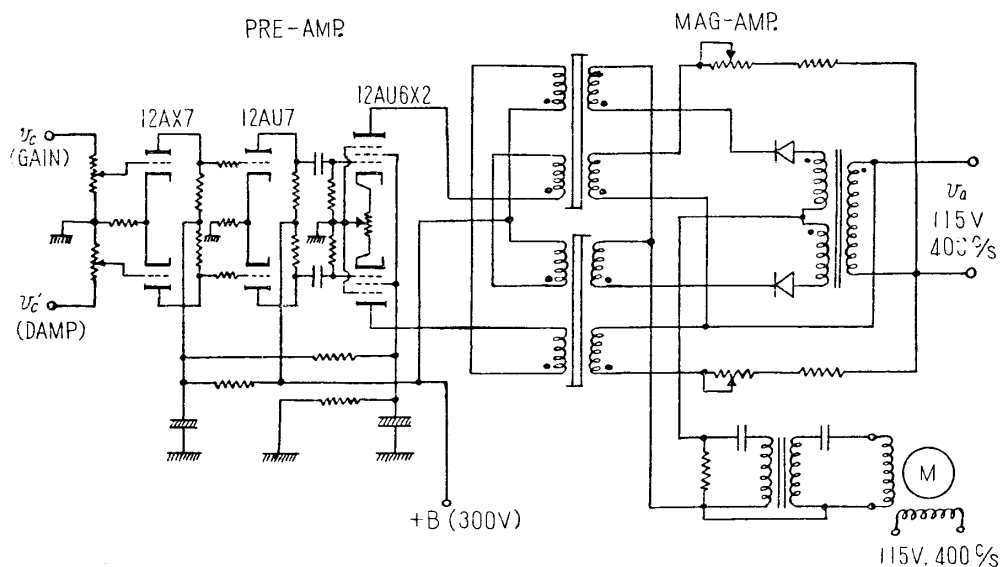


Fig. 3.14. Schematic diagram of the magnetic servoamplifier.

をすることが特徴である。しかしこの直流分電流のために余分の損失があり、サーボモータの交流定格を下げなければならない。我々の実験ではこの直流分電流があまりにも大き過ぎて、サーボモータを十分に駆動することが非常に困難であった。したがって出力側は Fig. 3.14 に示すように交流分のみで動作させることにした。しかしこの場合、負荷電流の直流分でブレーキをかけるというこの回路の本来の特徴がなくなることは止むを得ない。なお使用した磁気増幅器の入力対出力の特性を Fig.

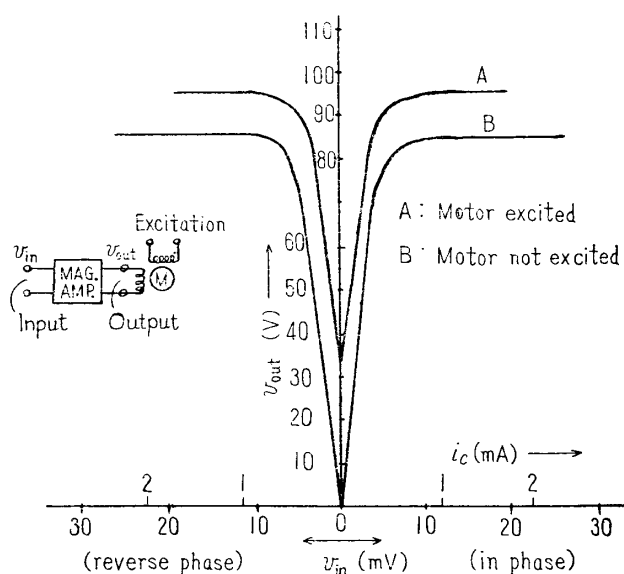


Fig. 3.15. The characteristics of the magnetic servoamplifier (Fig. 3.14).

Table 3.5. The Sequence table of the system operation.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\overline{A_2R}$					A_2R					A_2R			
\overline{BR}				BR					BR				
\overline{TR}	START	10 min →	TR		TR				START		10 min →	TR	
\overline{ThR}					START	2 min →	ThR				ThR		
$\overline{ThR'}$					START	2 min →	ThR'				ThR'		
$\overline{A_1R}$							A_1R				A_1R		
$A_1'R$							$A_1'R$				$A_1'R$		
\overline{CR}			CR			CR		CR		CR		CR	CR
Heuter	G-PL1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	×
Gyro Run	G-PL2	×	×	O	O	O	O	O	×	×	×	×	×
Ready	G-PL3	×	O	O	O	×	×	O	O	×	×	O	×
Torquer Excitation	G-NL1	×	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	×
Not Ready	R-PL1	O	×	×	×	O	O	×	×	O	O	×	×
Torquer Servo Amp.	R-NL1	×	×	×	×	×	O	O	O	O	×	×	×
	R-NL1'	×	×	×	×	×	O	O	O	O	×	×	×
Signal		↑ 100V 50c/s 1φ SW ₁ ON	↑ 115V 400c/s 1φ SW ₂ ON	115V 400c/s 3φ SW ₃ ON				↑ System Operat- ing	↑ 115V 400c/s 3φ SW ₃ OFF		↑ Gyro Stop 1φ SW ₂ OFF	↑ 115V 400c/s 1φ SW ₂ OFF	100V 50c/s 1φ SW ₁ OFF
○...Lamp ON													
×...Lamp OFF													

3.15 に示す。

3.4 附加装置

ここで使用した垂直ジャイロはピッチ角，ロール角がいずれも $\pm 85^\circ$ の範囲に限定されている。また起立制御系については，ジャイロの性質上互に直角方向の軸に関する制御をおこなっている。したがって，ジャイロが静止している状態で起立制御系を動作させることは好ましくない。すなわち垂直ジャイロの“こま”を回している状態で架台を手などで動かしたり，また“こま”が正規の回転数 (24,000 rpm) に達するまでの約2分間に，トルクモータ用のサーボ系を動作させたりするとジャイロを破損する恐れがある。したがって，その防止策としてリレー回路を組み合わせる附加し，ジャイロの安全を計っている。Fig. 3.16 にこのリレー回路および安定系全体の動作状態を表示する表示回路を示す。同図の (A₂R)，(BR) などはリレーを，(TR) はタイマー，(ThR) はサーマルリレーを示し，単なる記号 BR，CR などはそれぞれリレーの接点を表わしている。また，SW₁，SW₂，SW₃ などはそれぞれ 100 V，50 c/s，単相，115 V，400 c/s，単相，115 V，400 c/s，3 相の主開閉器である。最後にこの空中線安定系全体の動作順序を表示する図を Table 3.5 に示しておく。

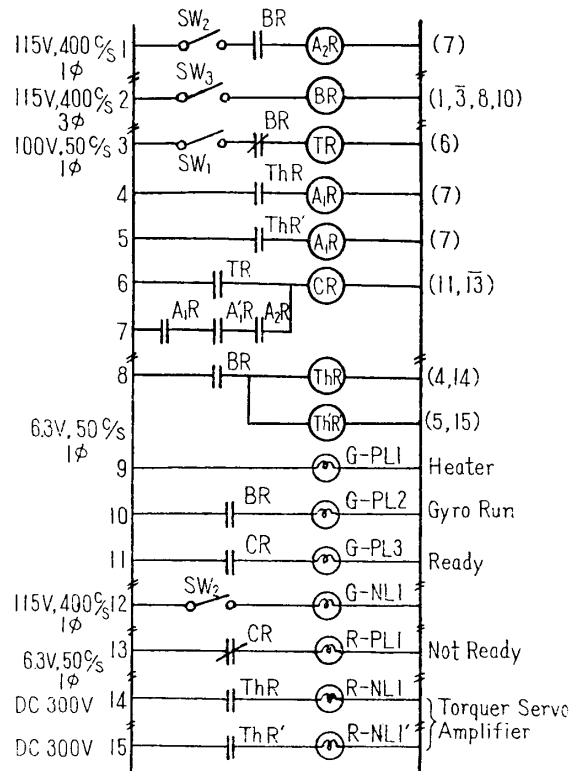


Fig. 3.16. Relay circuits and lamps of the experimental system.

同図の (A₂R)，(BR) などはリレーを，(TR) はタイマー，(ThR) はサーマルリレーを示し，単なる記号 BR，CR などはそれぞれリレーの接点を表わしている。また，SW₁，SW₂，SW₃ などはそれぞれ 100 V，50 c/s，単相，115 V，400 c/s，単相，115 V，400 c/s，3 相の主開閉器である。最後にこの空中線安定系全体の動作順序を表示する図を Table 3.5 に示しておく。

4. 結 言

以上空中線安定方式について考察をおこない，その試作装置について述べた。しかしここでは空中線安定系における部分的な研究を進めたに過ぎない。したがって，制御系全体を考察するには至っていない状態である。たとえば磁気増幅器について考えても，その応答特性，また 2 相サーボモータを組み合わせた場合の特性などについても更に多くの測定を要する状態である。現在の段階で，これらの実測なくして早急に結論を出すことは甚だ困難である。

本文の最初にも述べたように単に一つの基準系をとってみても，これがどのようにあるべきか，またいかに改善されるべきかという問題も残っている。最終的には慣性誘導方式の制御系の問題ともつながるのであるが，このような事柄については，またの機会にゆずることとしたい。

不完全ではあるが，空中線安定方式を考える時の一方法として試みたものである。なおこの試作研究は機関研究「超音速航空機の電子航法方式」の一部として行なったものである。

最後に本研究を進めるに当たって終始御指導を賜った岡田実教授をはじめ，有益な助言，討

論をされた計測部の諸氏に深く感謝致します。

1961 年 11 月 7 日 計測部

参 考 文 献

- [1] W. R. Fried: Principles and Performance Analysis of Doppler Navigation System, IRE Trans. Vol. ANE-4 No. 4, p. 176 (Dec. 1957).
- [2] 東口: データ安定方式, 本集報. p. 585.
- [3] W. Wrigley: Indication of the Vertical from Moving Bases, IRE Trans. Vol. ANE-5 No. 4, p. 182 (Dec. 1958).
- [4] F. A. McMahon: The AN/APN-81 Doppler Navigation System, IRE Trans. Vol. ANE-4 No. 4, p. 202 (Dec. 1957).
- [5] 穴山: “磁気増幅器とは”, OHM 第 48 巻 第 5 号 p. 37 (昭 36/5).
- [6] H.F. Storm (山村, 原田訳): 磁気増幅器, コロナ社 (昭 34/9).
- [7] J.B. Scarborough: *The Gyroscope—(Theory and Applications)*,—Interscience Publishers N.Y. (1958).
- [8] C. S. Draper: *Inertial Guidance*, Pergamon Press, OXFORD.