

## 円筒状リニア誘導モータを用いたサーボ機構

山田 一\* 杉田恵三\*\* 丸山利喜\*\*

(昭和53年5月22日受理)

### A New Servomechanism Using a Cylindrical Linear Induction Motor

Hajime YAMADA, Keizo SUGITA and Toshiki MARUYAMA

The circuitry constitution and the dynamic characteristics of a new servomechanism using a cylindrical linear induction motor, which is called linear servomechanism by the authors, are described in this paper.

The cylindrical two-phase linear induction motor and a new contactless eddy current velocity sensor are used in the linear servomechanism.

According to the experimental results of the step response and the reciprocal stroke characteristics of the linear servomechanism, it is clear that our servomechanism has a positioning accuracy  $\pm 0.1$  percents over the stroke 1000mm.

The new servomechanism has the following merits :

- (1) It can easily get a stroke longer than 500mm with high response.
- (2) It is substantially lighter than the linear dc motor.

The linear servomechanism with higher thrust of the linear induction motor and low friction supporting will be capable of being applied to the recorder, the large-sized co-ordinator and the manufacturing machine and so on.

### 1 ま え が き

リニアモータをただ単に限られたストロークの往復運動に利用するだけでなく、その変位と速度などを制御して、高い位置決め精度を実現すると、サーボ機構への応用が拓けてくる。

リニア直流モータをサーボ機構へ応用した例として、すでに X-Yレコーダ<sup>1)2)</sup> や電子ミシン<sup>3)</sup> などが実用化されている。しかし、円筒状リニア誘導モータを用いたサーボ機構(以下、リニアサーボ機構と略す)の発表はきわめて少ない<sup>4)</sup>。前者は磁界発生部分が大

\* 電気工学教室 助教授

\*\* 大学院修士課程

きくなるために長いストロークがとりにくい欠点があるが、後者はその点での心配が少ないために長ストローク・サーボ機構に適している。

リニアサーボ機構 (Linear servomechanism) を実現できると、従来方式とくらべて以下のようなメリットが生じてくる<sup>5)</sup>。

- (1) 従来の数多くの機械的な変換要素 (歯車・プーリ等) を必要とせずに直接直線運動が得られるから、構成部品点数が著しく減少し、信頼性が向上する。
- (2) さらに、機械的要素によるバックラッシュや時間遅れなどを回避できるから、高い応用性が期待できる。
- (3) 回転部分がないために、構造が簡単かつ堅牢であり、経済的にも有利となる。

本論文では、筆者らが開発したリニアサーボ機構の回路構成について説明し、本機構に用いた円筒状リニア誘導モータ・渦電流式速度センサの特性について述べ、さらにリニアサーボ機構の特性を明らかにする。

#### Notations :

- $B$  : Flux density [T]
- $d$  : Diameter [m]
- $e$  : Induced voltage [V]
- $E$  : Voltage [V]
- $f$  : Frequency [Hz]
- $F$  : Thrust [N]
- $F_s$  : Standstill force [N]
- $g$  : Gap [m]
- $g_e = K_c g$  : Effective gap [m]
- $G = 2\mu_0 f \tau^2 / \pi \rho_r g_e$  : Goodness factor
- $i$  : Current (instantaneous value) [A]
- $I$  : Current (effective value) [A]
- $I_s$  : Stator current (effective value) [A]
- $J_s$  : Surface current of stator [A/m]
- $K$  : Coefficient, Gain
- $K_c$  : Carter's coefficient
- $l$  : Length of stator [m]
- $M$  : Mass [kg]
- $M_s$  : Mass of stator [kg]
- $N$  : Number of turns
- $p$  : Number of coils
- $R_m$  : Reluctance [ $H^{-1}$ ]
- $s$  : Slip, Laplacian operator
- $t$  : Thickness [m], Time [s]
- $v$  : Velocity [m/s]

- $v_s = 2\pi f$  : Synchronous speed [m/s]  
 $V$  : Voltage [V]  
 $w$  : Width [m]  
 $Z$  : Impedance [ $\Omega$ ]  
 $\theta$  : Firing angle [rad]  
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m] : Permeability in the vacuum  
 $\rho$  : Resistivity [ $\Omega\text{-m}$ ]  
 $\rho_r = \rho/t$  : Surface resistance of the secondary conductor [ $\Omega$ ]  
 $\tau$  : Pole pitch [m]  
 $\phi$  : Magnetic flux [Wb]  
 $\varphi$  : Phase difference [rad]  
 $\omega = 2\pi f$  : Angular frequency [rad/s]

## 2 リニアサーボ機構の構成

### 2.1 回路構成と動作原理

二次導体であるロッドを固定し、ステータを可動部としたリニアサーボ機構の構成を示すと Fig.1 のようになる。この方式は、ステータの慣性は比較的大きいが、“重い”対象

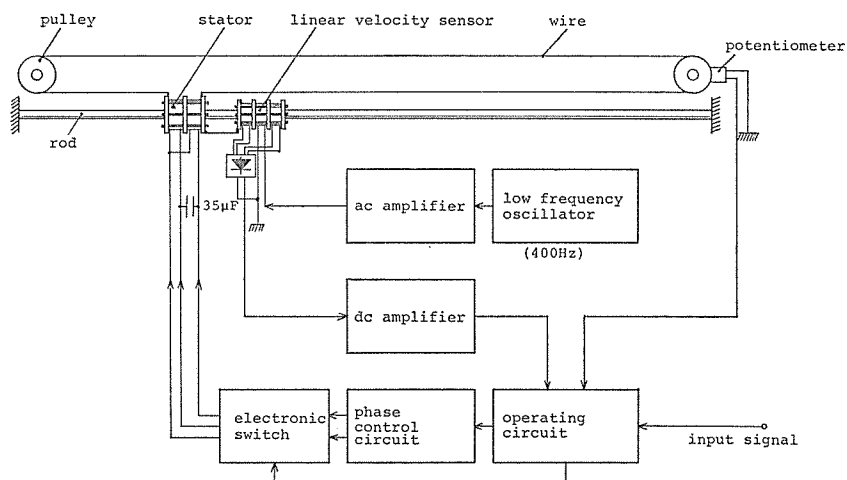


Fig.1 Schematic layout of a linear servomechanism.

の大ストローク（変位）制御が得られる特徴がある<sup>6)</sup>。

このリニアサーボ機構の動作原理は、以下のようなになる<sup>7)</sup>。Fig.1において、まず入力信号が零のとき、ステータは励磁されないで、設定位置に停止している。次にステータに所要の変位に比例する入力信号を与えると、ポテンシヨメータとの差電圧（誤差信号）に応じて位相制御回路がオンとなり、次段の電子スイッチが作動して、ステータは所要の変位を走行する。そこで、入力信号とポテンシヨメータとの差電圧が零になった時点で、

ステータは無励磁となって停止する。なお、リニア速度センサからの出力をフィードバックすることによって、走行中の一定速度が得られている。

## 2・2 ブロック線図

リニアサーボ機構をブロック線図であらわすと、Fig. 2 のようになる。位相制御回路は

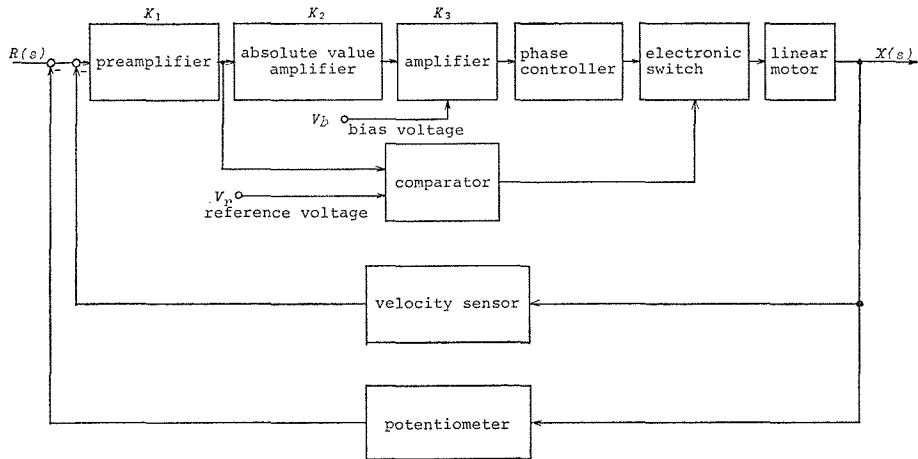


Fig. 2 Block diagram of a linear servomechanism.

サイリスタで構成されているが、この回路だけでは運動の方向を制御することができないので、さらに2組のサイリスタによる電子スイッチによって正・逆両方向の変位が得られるようになっている。

初段増幅器  $K_1$  の出力電圧と基準電圧  $V_r=0$  [V] とをコンパレータによって比較し、+信号のときは正方向へ、また-信号のときは逆方向へとステータが変位するように電子スイッチの制御を行っている。

絶対値増幅器  $|K_2|$  は、サイリスタの位相制御を常に  $0\sim 180^\circ$  の点弧角で行わせるために設けてある。また、サイリスタ制御回路は、不感帯と飽和特性をもっているため、その前段の増幅器  $K_3$  に適当なバイアス  $V_b$  を与えて、位相制御特性の線形化を図っている。

このリニアサーボ機構では、ステータの位置検出に回転形ポテンシオメータを使用しているが、リニア速度センサの信号を積分して、変位信号に変換する方式も考えられる。

## 3 円筒状リニア誘導モータ

### 3・1 推力の表現式

円筒状リニア誘導モータ (Cylindrical linear induction moter) の推力の表現式は、電磁界理論に基づいて、次の形で与えられている<sup>8)</sup>。

$$F_s = \frac{1}{2v_s} \cdot \frac{\rho_r J_s^2}{s(1 + \frac{1}{s^2 G^2})} \cdot \omega l \quad (1)$$

たとえば、上式をポールピッチ $\tau$ と表面抵抗 $\rho_r$ について整理すると、始動推力 $F_s$  ( $s=1$ ) について次式が得られる ( $l=p\tau$ ,  $p=2$ ).

$$F_s(\tau, \rho_r) = \frac{A}{B \frac{\tau^2}{\rho_r} + C \frac{\rho_r}{\tau^2}} \quad (2)$$

ここに、 $A = \omega p f \mu_0^2 (NI_s)^2$ ,  $B = 4(\mu_0 f)^2$ ,  $C = \pi^2 g e^2$

式(2)に対して、所定の始動推力 $F_s$ を設定し、 $F_s - \tau - \rho_r$ 特性を3次元表示し、これら3パラメータの最適関係を求め出すこともできる<sup>9)</sup>.

また、式(1)から始動推力 $F_s$ を周波数 $f$ のみの関数として表わすこともできる。式(3)は $I_s = \text{const.}$  の場合の $F_s(f)$ の表現式である。

$$F_s(f) = \frac{A' I_s^2}{B' f + C' \frac{1}{f}} \quad (3)$$

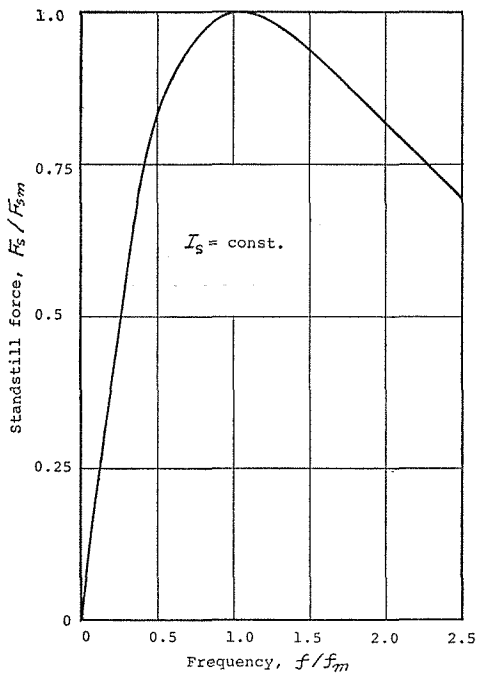


Fig.3 Normalized characteristics of standstill force versus frequency when the stator current is constant.

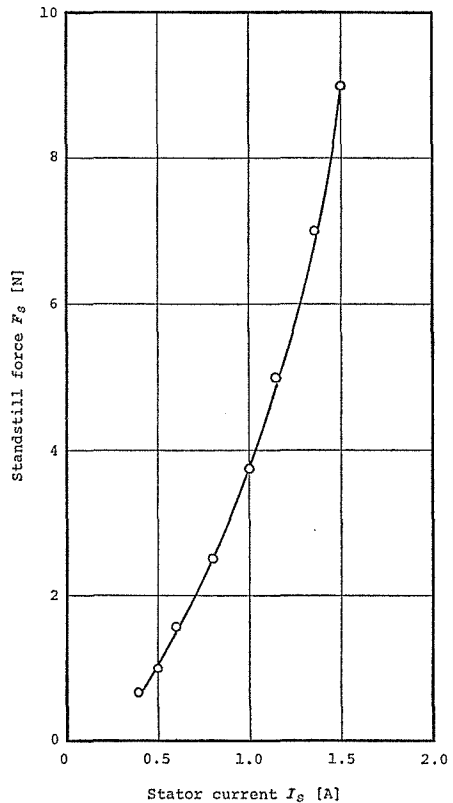


Fig.4 Characteristics of standstill force versus stator current of the linear induction motor.

ここに,  $A' = wp(\mu_0\tau\rho_r N)^2$ ,  $B' = 4(\mu_0\tau^2)^2$ ,  $C' = \pi^2 g e^2 \rho_r^2$ ,

式(3)において,  $B'f = C' \frac{1}{f}$  の時,  $F_s(f)$  は最大となる. この時の周波数  $f_m = \sqrt{\frac{C'}{B'}}$  は, 結局  $G = 1$  を満足している. いま,  $F_{sm} = F_s(f_m)$  として,  $I_s = \text{const.}$  時の始動推力の相対値  $F_s/F_{sm}$  の周波数 (相対値)  $f/f_m$  への依存性を計算してみると, Fig. 3 のようになる.

以上のことから, このリア誘導モータの始動推力は, ステータ電流  $I_s$ , 周波数  $f$ , ポールピッチ  $\tau$ , 有効ギャップ  $g_e$ , 表面抵抗  $\rho_r$  の5パラメータの関数であることが理解できる.

### 3・2 推力特性

このリアサーボ機構に使用した円筒状2相リア誘導モータの仕様は Table 1 に示

Table 1 Specifications of the cylindrical two-phase linear induction motor.

	Item	Symbol [unit]	Numerical value
Stator	Pole pitch	$\pi$ [m]	$76.7 \times 10^{-3}$
	Number of coils	$p$	2
	Number of turns	$2 \times N$ [turns]	$2 \times 1600$
	Gap	$g$ [m]	$1.2 \times 10^{-3}$
	Exciting frequency	$f$ [Hz]	60
	Synchronous speed	$v_s$ [m/s]	9.26
	Length	$l$ [m]	$77.2 \times 10^{-3}$
	External diameter	$d$ [m]	$70.0 \times 10^{-3}$
	Mass	$M_s$ [kg]	1.35
Rod	Resistivity (Cu)	$\rho$ [ $\Omega$ -m]	$1.77 \times 10^{-8}$
	Thickness (Cu)	$t$ [m]	$0.8 \times 10^{-3}$
	Length	$l'$ [m]	2.9
	External diameter	$d'$ [m]	$15.8 \times 10^{-3}$
	Mass	$M$ [kg]	3.0

す通りである. この円筒状リア誘導モータのステータ電流  $I_s$  へ依存する始動推力特性を Fig. 4 に示した.

## 4 渦電流式速度センサ

### 4・1 動作原理

最近, 渦電流を利用して計測対象に対して非接触で速度を測定する方法が研究されている<sup>10)11)</sup>. この渦電流式速度センサの動作原理を Fig. 5 に示した. 励振コイルEによる磁束密度  $B(\omega)$  によって計測対象となっている金属平板には渦電流  $i_e$  とそれによる磁束  $\phi_e$  とが生ずる. 金属平板が速度  $v$  で移動することによって, 平板上には次式で与えられる速度起電力  $e_v$  が誘起する.

$$e_v = KBv \quad (4)$$

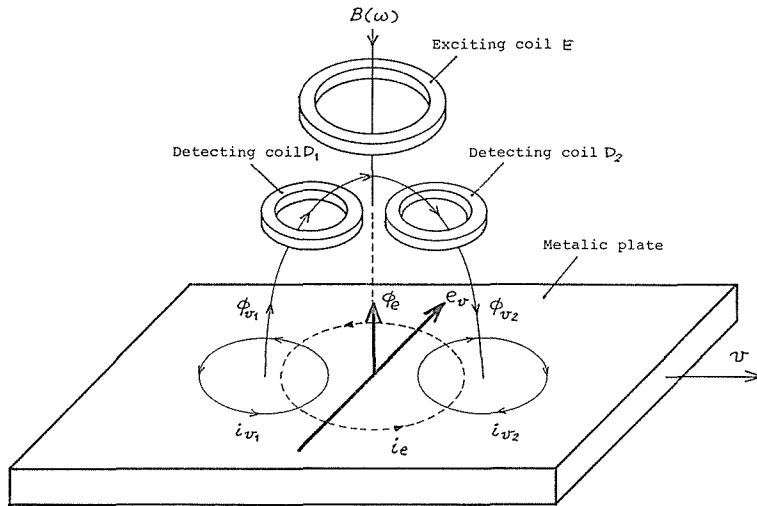


Fig.5 Principle of a velocity sensor using eddy current of the linear induction motor.

ここに  $K$  : 定数

速度起電力  $e_v$  は Fig.5 に示すように、電流  $i_{v1}$  と  $i_{v2}$  とに分流され、次式となる。

$$i_{v1} = i_{v2} = \frac{e_v}{Z_2} \tag{5}$$

ここに、 $Z_2$  : 金属平板に対する等価インピーダンス

次に、1組の検出コイル  $D_1$  と  $D_2$  が構成する磁気回路の磁気抵抗をそれぞれ  $R_{m1} = R_{m2} = R_m$  とおき、 $i_{v1}$ 、 $i_{v2}$  によるそれぞれの磁束は、

$$\phi_{v1} = \frac{i_{v1}}{R_m} + \phi_e, \phi_{v2} = -\frac{i_{v2}}{R_m} + \phi_e \tag{6}$$

となる。そこで、 $D_1$  と  $D_2$  による誘起電圧  $V$  は  $\phi_{v1} - \phi_{v2}$  の時間微分をとり、次式で表わされる。

$$V = \frac{K\omega N_2 B}{R_m Z_2} v \tag{7}$$

渦電流速度センサの出力電圧は式(7)からも直線性がよいものであることがわかる。また式(7)は、渦電流式速度センサの動作原理を定性的に理解する上で都合がよいが、定量的な設計には不向きである。この速度センサの解析には、電磁界理論法の方がより有効である<sup>11)12)</sup>。

さらに、計測対象となる非磁性金属平板の厚さが 3 [mm] 以上、また測定速度が 2 [m/s] 以上になると、検出特性が非直線的になることが解明されている<sup>13)</sup>。

#### 4・2 出力電圧—速度特性

このリアサーボ機構の簡略化に大きな役割を果たしているものに、渦電流式速度センサ（以下、速度センサ）がある。Fig. 5 に示した速度センサの構造では、出力電圧が低いので、これを Fig. 6 に示すように改良した。この速度センサの構造は、古くからあるドラ

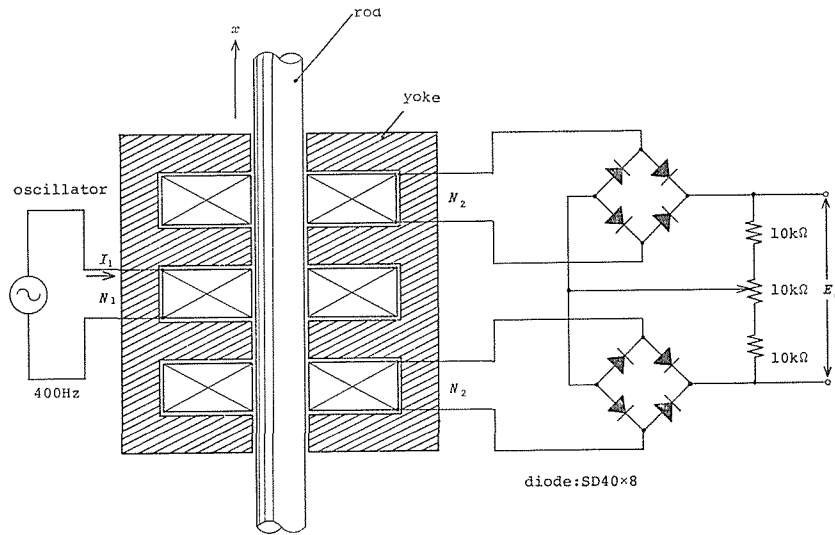


Fig. 6 Construction of a linear velocity sensor.

グ形交流タコメータを直線状に展開し、これを再び 90° 異なった方向に閉じて円筒状にしたものと見なすことができる。Fig. 6 に示した速度センサの構造の外観は、円筒状リアモータとよく類似しており、ロッドはリアモータのステータと共用することができ、計測上のメリットが大きい。速度センサには、一つの励振巻線  $N_1$  と二つの検出巻線  $2 \times N_2$  とがほどこされており、ロッドは前述のようにリアモータのと共用している。速度センサの諸量は Table 2 のようになる。

Table 2 Dimensions of a linear velocity sensor.

Exciting coil	Number of turns $N_1$ [turns]	300
	Width of windings $l_1$ [mm]	12
	Diameter of coil $d_1$ [mm]	32
Detecting coil	Number turns $2 \times N_2$ [turns]	$2 \times 200$
	Width of windings $l_2$ [mm]	12
	Diameter of coil $d_2$ [mm]	32

mass 240g, gap  $g=1.5\text{mm}$



速度センサは、そのヨークと機械的に直結されており、励振電流によって生じた速度渦電流を検出巻線でピックアップしている。一組の検出巻線は差動接続されて、その速度を直流信号として取り出している。

Fig. 7 は、速度センサの励振電流  $I_1=0.6$  [A]、走行速度  $v=1.0$  [m/s] を一定にした場合における励振周波数に依存する検出巻線からの交流出力電圧の関係を示したものである。この図から、励振周波数が60 [Hz] のときに最も大きい速度出力電圧が得られること

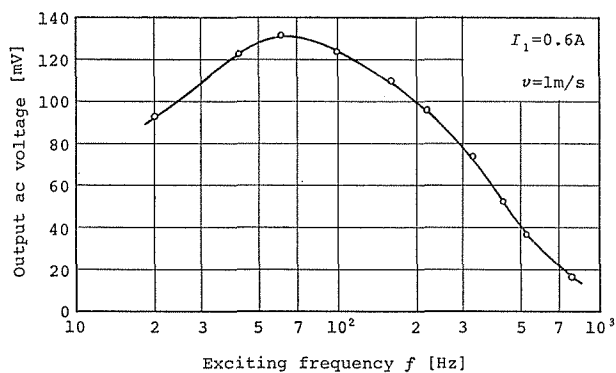


Fig. 7 Alternating output voltage versus frequency characteristics of the linear velocity sensor.

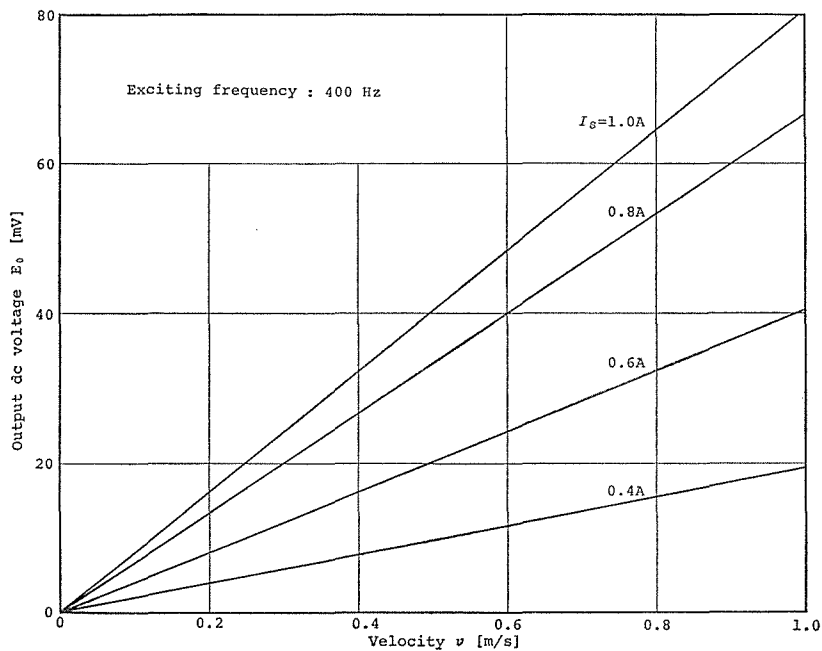


Fig. 8 Output dc voltage-velocity characteristics of the linear velocity sensor.

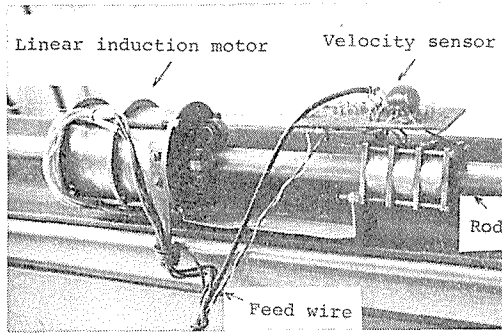


Fig.9 A linear induction motor and a velocity sensor located on the rod in a linear servomechanism.

がわかったが、制御系には良質な直流が望ましいので、励振周波数を 400 [Hz] に選定した。

Fig. 8 は、励振周波数を 400 [Hz] 一定として、励振電流  $I_1$  をパラメータとした速度センサの直流出力電圧  $E_0$  と走行速度  $v$  との関係を示した実測例である。励振電流 0.4~1.0 [A] の範囲において線形な速度出力が得られている。

Fig. 9 には、リニアサーボ機構のロッド上に配置された速度センサとステータの外観を示した。

## 5 リニアサーボ機構の特性

### 5.1 リニアサーボ機構の伝達関数

リニアサーボ機構を伝達関数で表示したブロック線図は、Fig. 10 のようになる。リニ

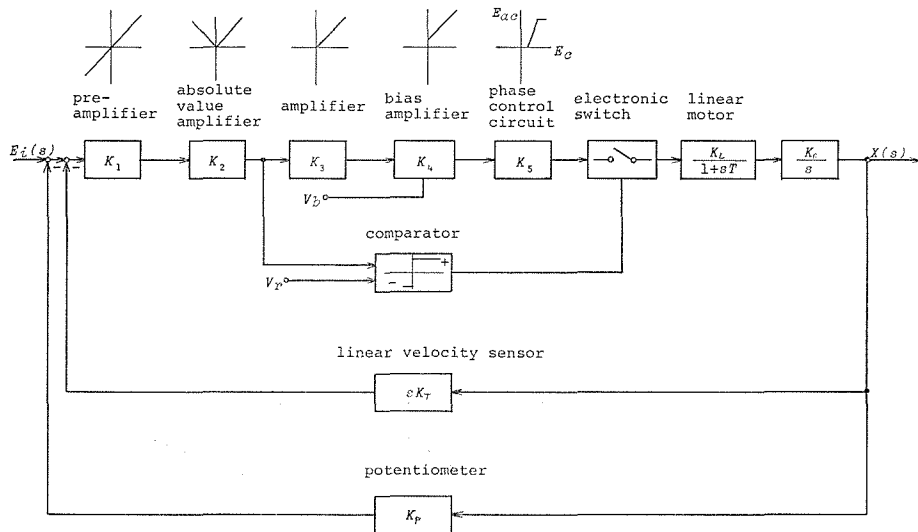


Fig.10 Transfer function of a linear servomechanism.

アモータの伝達関数  $G_L(s)$  は、同図に示すように、一次遅れ系で近似することができる。すなわち、

$$G_L(s) = \frac{K_L}{1 + sT_L} \quad (8)$$

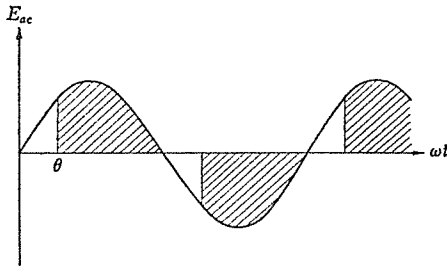


Fig.11 Output voltage wave-form of the thyristor phase control circuit.

この系におけるステータの変位制御は、本質的にはサイリスタ位相制御回路の出力電圧  $E_{ac}$  の等価的な振幅制御で実現している。そこで、サイリスタ位相制御回路の出力電圧  $E_{ac}$  はFig. 11 のようになるから、これを記述関数を利用して点弧角  $\theta$  で表現すると、 $E_m$  を電源電圧の波高値として次式となる。

$$E_{ac}(\omega t) = E \sin(\omega t + \varphi) \tag{9}$$

$$E = \frac{E_m}{2\pi} \sqrt{\{\sin 2\theta + 2(\pi - \theta)\}^2 + (\cos 2\theta - 1)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\cos 2\theta - 1}{\sin 2\theta + 2(\pi - \theta)}$$

式(9)の  $E$  と  $\varphi$  は、それぞれ電圧  $E_{ac}$  の基本波の等価正弦波近似による振幅と位相差である。そこで、点弧角  $\theta$  をかえることによって、電圧  $E_{ac}$  を等価的に変化させることが

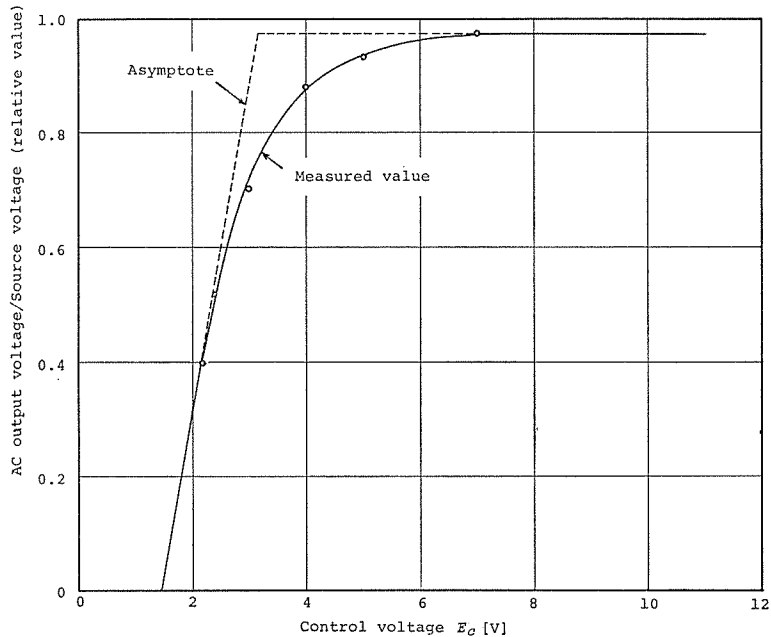


Fig.12 Characteristics of output voltage versus input voltage in the thyristor phase control circuit.

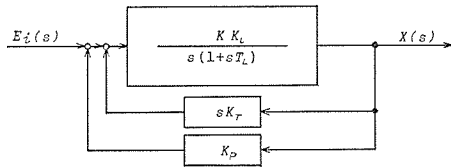


Fig. 13 Overall transfer function of a linear servomechanism.

できる。Fig. 12 は、サイリスタ位相制御回路における点弧角  $\theta$  に比例する制御電圧  $E_c$  に依存するその出力電力  $E_{ac}$  の関係を示したものであり、 $E_c = 0 \sim 1.5$  [V] の範囲において不感帯が存在する。この不感帯を補償するために、バイアス増幅器 ( $K_4$ ) にバイアス電圧  $V_b$  を与えて、位相制御回路の入・出力関係の線形化を図っている。

Fig. 13 は、リアサーボの全伝達関数のブロック線図を示した。

以上から、系全体の伝達関数  $F(s)$  は、次式のように 2 次遅れ系で近似することができる。

$$F(s) = \frac{KK_L}{s^2T_L + s(1 + KK_LK_T) + KK_LK_P} \quad (10)$$

ここに、 $K = K_1K_2K_3K_4K_5K_6$  : 前向きゲイン

## 5.2 リアサーボ機構の動特性

リアサーボ機構のステップ応答性の実測例を以下に示す。

Fig. 14 は、リアモータに変位 0 から 680 [mm] を与えた時の系のステップ応答である。また、Fig. 15 は、リアモータに変位  $\pm 340$  [mm] から 0 まで急変させた時の系のステップ応答の実測例である。両者のデータから、オーバーシュート 9%、応答時間 1.4 [s]、応答速度 500 [mm/s]、立ち上がり時間 0.8 [s] であった。また、定常偏差は 0.5 [%] 以下である。

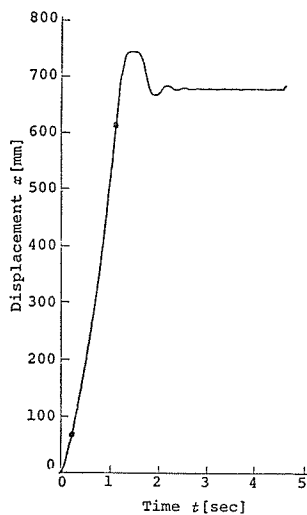


Fig. 14 Step response of a linear servomechanism. The displacement has 0 to 680 mm.

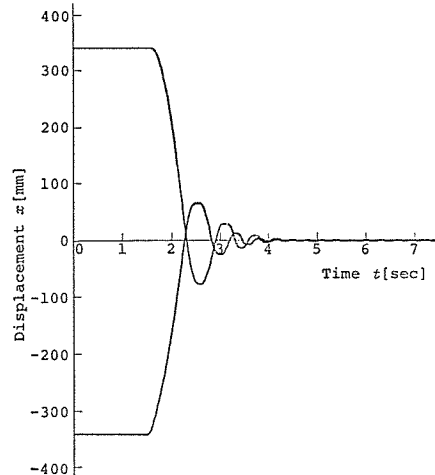


Fig. 15 Step response of a linear servomechanism. The displacement has 340 to 0 mm.

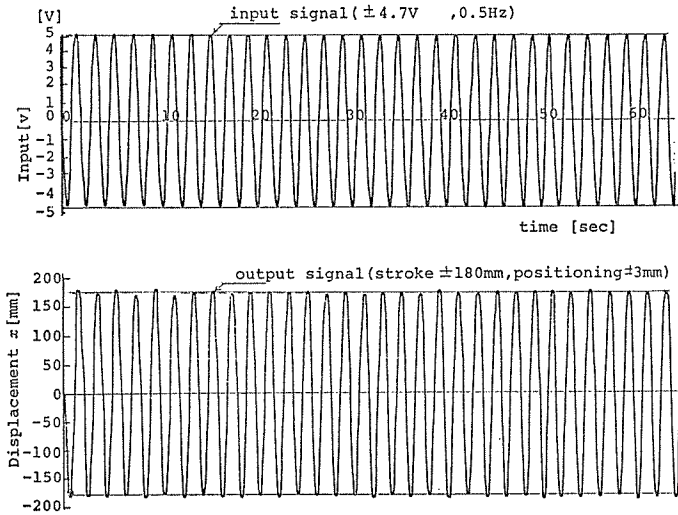


Fig.16 Reciprocal stroke characteristics of a linear servomechanism.

次に変位繰り返し特性の実測例を Fig. 16 に示した。本実験では、波形記憶装置を用いて発生させた振幅 4.7 [V]、周波数 0.5 [Hz] の正弦波電圧を入力として、ステータに ±180 [mm] の変位を与えて変位の繰り返しを実行した。同図において、位置決め精度は 1 [%] 前後であり、ステータとロッド間の機械的な摩擦損の低減化を計ることにより、より高い位置決め精度の実現が可能であろう。

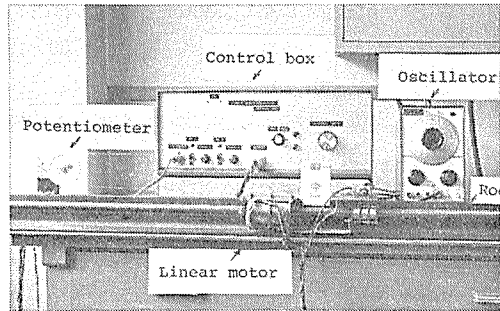


Fig.17 A general view of a linear servomechanism.

Table 3 には、このリニアサーボ機構における主な仕様例を示した。また、このリニアサーボ機構の全景を Fig. 17 に示した。

Table 3 Specifications of a linear servomechanism.

Item	Numerical value
Standstill force	4 [N] (0.41kgf)
Controlled displacement	1000 [mm]
Positioning accuracy	±0.1 [%] (±1mm/1000mm)
Response speed	1 [m/s]
Consumed power	200 [VA]

## 6 あとがき

本論文で述べた円筒状リニア誘導モータを用いたサーボ機構は、500 [mm] 以上の変位が高速で容易にとれること、またリニア直流モータにくらべて本質的に質量が数分の一になる等の特長を有している<sup>14)</sup>。

リニアモータの高推力化、支持方法等の改良によって記録計、大形座標器、プリンタ、工作機械等への応用が期待できよう<sup>15)16)</sup>。

本研究室におけるリニアモータに関する研究は、昭和44年(1969年)から開始され、今日までに市川良郎(現在、新光電気工業)、伊藤八郎(現在、神鋼電機)、竹内晟吉(現在、日電公社)、平林清美(現在、三菱電機)、前川康二(現在、大林組)、寺村映(現在、消防庁)の諸君の参加があった。特にリニアサーボ機構に対する寺村映君の貢献は大きく、ここに彼らの名をあげて謝意を表する次第である。

## 文 献

- 1) YHP電子応用測定器・システムカタログ, p.201 (1975-76版)
- 2) Esterline Angus (晶新商事): ペンレコーダ・カタログ (1973)
- 3) 日本電子工業振興会編: マイクロコンピュータの新技術動向, 52-A-126, pp.217-225(昭和52)
- 4) G.Ehrenberg: Lineal motor, Inst. & Cont. Sys., March, pp.109-110 (1967)
- 5) 松宮・高木: 計測論, Vol.7, No.6, p.30 (1971)
- 6) 寺村・平林・山田: リニアサーボモータ, 昭49 電全大, 1114
- 7) 寺村・山田: リニアモータを用いたサーボ機構, 第17回自動制連講, 2001 (1974)
- 8) 山田・竹内: 円筒状リニアモータの推力解析, 信大工学部紀要 No.30, pp.37-52 (1971)
- 9) 山田: リニアモータと応用技術, 実教出版社, pp.20-21 (1977)
- 10) 若林・白江: 渦電流を利用した無接触アナログ速度トランスジューサ, 第17回自動制連講 No.4001 (1974)
- 11) 山田・前田・大谷: 渦電流速度トランスジューサの変換理論, 電気学会磁気応用・磁性材料合同研資, AM-75-25, MAG-75-45 (1975)
- 12) 山田: リニアモータの測定, トリケップス社, No.209-78-A (1978)
- 13) 武平・田中・戸田: うず電流を利用した速度計の解析, 電学論, Vol.97-A, No.9, pp.457-464 (1977)
- 14) 山田: リニアモータの応用化例, 位置決めサーボへの応用, 自動化技術, Vol.8, No.5, pp.37-40 (1976)
- 15) 見城編: 小型制御モータデータブック, トリケップス社, p.424 (1975)
- 16) マシンデザイン: リニアモータを位置決めサーボ機構に応用, No.11, pp.22-23, 工業調査会 (1975)