適応性をもった純慣性系の最短時間制御

上 野 敏 行

東京大学宇宙航空研究所 東京都目黒区駒場 4-6-1

(昭和 44 年 12 月 24 日 受付)

Adaptive Time Optimum Control of a Purely Inertial System

Toshiyuki UENO

(Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo)

(Received December 24, 1969)

This paper describes a purely inertial system whose attitude around its axis is controlled with air jet, and gives the results of the adaptive optimum control of the system. It is well known that the time optimum control of the purely inertial system can be accomplished by applying positive and negative maximum torques according to the parabolic switching curve in the phase plane. In order to realize the desired switching curve, a nonlinear resistor, called the "varistor", is used in the control system. Keeping the time optimum control loop closed, the small perturbation signal is applied to the system and the inertial moment of the controlled subject is measured by the correlation method. The measured moment is fed into the adaptive control system to determine the optimum switching curve in the phase plane automatically. By changing the moment, it is experimentally verified that the switching curve is optimally set.

The response of the moment measuring system to the sudden change of the moment is described. Also the effects of the test signal on the time optimum control and on the error of the measured moment are stated.

1. ま え が き

純慣性系の最短時間制御問題は、位相面上で放物線を組み合わせた切換線を設定し、最大操作量を用いてオンオフ制御をすればよいことはよく知られている。しかし実際に位相面の切換線を作ることや、慣性や操作量などのパラメータ変化に対しての問題はあまり取り扱われていない。

また、動特性測定はプロセス解析の手段として1つの独立した問題であるが、適応制御への応用を考えた問題とすることもできる。そこで本論文ではパラメータの変化する系の動特性測定を行ない、つねに最適な制御が実現されるように位相面の切換線を変化させる系を構成し、関連する動特性測定の問題、および最適制御の問題について論じた。

2. 純慣性系の最短時間制御

空間に停止中の VTOL 機 (垂直離着陸機) や人工

衛星の一軸まわりの姿勢制御を考えると、制御対象は純慣性系とみなせる。ある姿勢から最短時間で別の姿勢に向きをかえる制御をしたいとする。そのようなある目標値に最短時間で到達する系は最適制御のうちでも最短時間制御といわれている。

Fig. 1 Switching curve in the phase plane

機体の回転軸まわりの慣性モーメントを J 、最大操作トルクを $|M|$ 、姿勢を示す角度を $c(t)$ とする。目標値 $r(t)$ のステップ入力に対して最短時間制御系を作るには、誤差信号 $e(t)$ 、 $e(t) = r(t) - c(t)$

(1)

について位相面で Fig. 1 のような切換線を作る。系の状態がこの切換線のどちらの領域にあるかによって

$\pm M$ の操作をすればよい。このとき系の方程式は (2) 式となる。

$$J \frac{d^2}{dt^2} c(t) = \pm M \quad (2)$$

Fig. 1 の切換線の方程式は、

$$e + \frac{J}{2M} \dot{e}|\dot{e}| = 0 \quad (3)$$

である。切換線を求めることは可能であってもそれを実現することは一般に簡単ではないのは、他の最適制御についても同様である。純慣性系の最短時間制御についても、関数発生器あるいは非線形素子を必要とするため、実際の装置について実験が試みられたことは少ない。しかしバリスタと呼ばれる非線形抵抗素子と演算増幅器を組み合わせると、(3)式の切換線を容易に実現できる。

バリスタ（シリコンカーバイドバリスタ）は、スイッチ回路などの火花消去用としても用いられているが、その特性は最短時間制御系を実現するのに都合のよい性質を持っている¹⁾。素子の両端の電圧を E 、電流を I とすれば特性は近似的に次のように表わされる。

$$I = KE^n \quad (4)$$

素子のうちで $n \approx 2$ となるものを選び出すことができるが、ある電圧、電流の範囲で、

$$I = K_v \cdot E|E| \quad (5)$$

と表わせる。一方向の電流については 2 乗特性を持つものは他にもあるが、このように両方向について 2 乗特性を持つのがこの素子の特徴である。Fig. 2 に使用した素子の特性を示す。この素子を Fig. 3 のように演算増幅器の入力素子として用い、出力のポテンシオメータの分圧比を k とすれば、

$$E_2 = -k(K_v R_f) E_1 |E_1| \quad (6)$$

Fig. 2 Voltage-current characteristics of the varistor

Fig. 3 Operational amplifier using a varistor as an input impedance

となり、 k, R_f を適当に選ぶことにより切換線を設定することができる。 k を変えれば容易に切換線を変えられるので、慣性モーメントが変化したときに切換線を最適になるように変化させていくことができる。最短時間制御系のブロック図は Fig. 4 のようになる。

Fig. 4 Block diagram of the time optimum control system and measurement of the inertial moment

Fig. 4 で最適切換線を実現する k^* の値 k_{opt}^* は (7) 式となる。

$$k_{opt}^* = \frac{J}{2M} \quad (7)$$

ところが慣性モーメント J は変化するものと考えられる。場合によっては M も変化するであろう。ただし操作量 M の変化は相対的に J の変化とみなせるので、以下では J の変化として考えていくことにする。このような変化に対応するためには、 J を測りそれに適した切換線を設定していかなければならない。慣性モーメントの変化に対して切換線を変化させないと、目標値の変化に対してオーバーシュートを生じたり、操作量がチャタリングを起こし動作時間がよけいにかかったりすることになる。したがって慣性モーメントの変化を知るために、制御ループが閉じたままの状態、制御対象の動特性測定（この場合には慣性モーメントの測定）を行なう必要がある。

3. 慣性モーメントの測定と切換線の設定

動作中のプロセスの動特性を測定する方法は、いろいろ考えられている。しかし、ここで必要なのは制御対象のパラメータの変化であり、それができるだけ簡単に求められることが望ましい。また、制御ループ内にあるプロセスの動特性測定に、一般の測定法をそのままあてはめるには問題がある。閉ループ内プロセスの動特性を測定する方法の 1 つに、外部からテスト信号を加え、相関法によって SN 比よく動特性測定を行なう方法がある^{2), 3)}。ここではその相関法を用い

た方法を応用して、慣性モーメントを測ることとする。

Fig. 4 において系の出力信号として加速度 $y(t)$ をとる。操作量 $x(t)$ との間には、

$$y(t) = \frac{M}{J} x(t) + n(t) \quad (8)$$

の関係がある。 $n(t)$ は加速度信号に加わる雑音である。 n とは独立なテストシグナル u を外部から加え、 x, y との積の平均を計算し、 J_m として (9) 式のように定める。

$$J_m(t) = \frac{\frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t x(t') \cdot u(t') dt'}{\frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t y(t') \cdot u(t') dt'} \quad (9)$$

(8) 式から (10) 式の間係を導くことができ、

$$\frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t y(t) u(t) dt = \left(\frac{M}{J} \right) \frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t x(t) u(t) dt + \frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t n(t) u(t) dt \quad (10)$$

十分大きな T_0 については (10) 式の右辺の第 2 項は小さくなると考えられるので、(9) 式は、

$$J_m(t) \doteq \frac{J}{M} \quad (11)$$

となり、慣性モーメント J を測ることができる。

Fig. 4 に測定系のブロック図を示した。 T_0 時間の平均化は 1 次フィルタで行なわれている。Fig. 4 のブロック図で $k_{opt}^* = J/2M$ であるから、測定した J_m に比例して最短時間制御装置のポテンショメータの分圧比 k を設定すれば、 J の変化に対応してつねに k^* を最適値 k_{opt}^* に保つことができる。測定値 J_m に対応してポテンショメータを設定するのにここでは自動平衡計器の平衡電動機を利用した。ポテンショメータのかわりに掛算器などを用いれば、電気的に切換線を変えることも可能である。

本論文の方式では慣性モーメントの測定値 J_m に応じて分圧比 k が設定され、切換線が決められてしまう。その設定において最短時間制御が実現されているか否かのフィードバックは行なわれていない。そこがこの適応系の欠点であるが、逆に、目標値の変化に対し最短時間応答をする用意がつけねになされているともいえるであろう。

4. アナログ計算機によるシミュレーション

最短時間制御系の動作を確かめ、動特性測定装置によって切換線が正しく設定されることを調べるために慣性系をアナログ計算機の積分器で置き換えて、シミュレーション実験を行なった。制御および動特性測定装置は後で述べる空気ジェットを用いた姿勢制御系に使用する装置をほとんどそのまま用いた。

切換線をきめる Fig. 3 の k の値は Fig. 4 の k_{opt}^* との関係により、

$$k_{opt} = \frac{k_{opt}^*}{K_v R_f} = \frac{J}{2MK_v R_f} \quad (12)$$

となる。各パラメータの値を代入して求めた k_{opt} の値と、実験的に最適となるような値とはよく一致した。その結果、ここで製作されたバリスタを用いて切換線を作った装置で、最短時間制御系が実現されることが確認された。

次にテストシグナルを加えて動特性測定を行ない、それにより最適切換線が設定されることを確かめた。テストシグナルは簡単に発生できるので m 系列信号を使用した。そのクロック周波数は 10 Hz 以下について、テストシグナルと操作量の大きさの比は 0.1, 0.2, 平均化フィルタの時定数 $T \approx 100, 50$ s として、それらの組み合わせについて調べた。その結果、アナログ計算機でのシミュレーション実験では外乱がほとんどない状態なので、平均化時定数は小さくてよく、テストシグナルの m 系列信号のクロック周波数は比較的高い周波数のものを加えることが可能であり、発生器の

(a) record of the measured inertial moment, J was changed from $J=2$ to 1, and 1 to 2

(b) phase plane trajectories at time A

Fig. 5 Analog computer simulation $|u|/|w|=0.1$, $T=50$ s, clock freq. = 4 Hz

(a) record of the measured inertial moment, J was changed from $J=2$ to 1, and 1 to 2

(b) phase plane trajectories at time B

Fig. 6 Analog computer simulation ($|u|/|w|=0.2$, $T=100$ s, clock freq. = 4 Hz)

ソフトレジスタの段数は測定系に対して影響がないことがわかった。テスト信号と操作信号の大きさの比が 0.1 であれば十分に慣性モーメントの測定を行ない切換線設定ができ、最適の最短時間制御をあまり乱さないが、比が 0.2 になると位相面軌跡を乱すようになることが明らかになった。Fig. 5, Fig. 6 に測定例を示した。

5. 空気ジェット姿勢制御系の最短時間制御

動特性測定により、制御対象の特性の変化に適応することができ、つねに最短時間制御が実現できることをアナログ計算機による実験だけでなく、なるべく実物に近い装置で実験を行ない示すのがこの章の目的である。制御対象は、圧縮空気を吹き出しその反動により一軸のまわりの傾きを制御する機体である。

5.1 装置の構成

純粋な慣性系を想定しているためまつの少ない支持方法で、かつ動力源の空気を送る必要がある。Fig. 7 (a) に示したように軸は固定され、ベアリングで軸をとりまく外側の直方体を支える。この直方体の部分が軸のまわりで回転するが、その上には Fig. 7 (b) のようにはりと移動おもり、電磁バルブなどが取り付けられて、バルブの先の下向きのノズルから空気が吹き出され機体の傾きが変えられる。支持軸の一方から中

(a) sectional view of the air supply system

(b) picture of the attitude control system

Fig. 7

心に穴を通し、空気はこの穴を通して軸の中ほどに垂直にあけられた穴に達する。この穴の両側では、直方体と軸の間は 5/100 mm と狭くしてあるので、空気はほとんど大部分回転体に導かれる。慣性モーメントを変化させるにははりの上のおもり (片側で 1.4 kgr) を平衡電動機と糸の機構により、平衡を保ちながら同じ距離だけ軸に近づけたり遠ざけたりする。なお、回転機体全体の重量は 14 kgr である。空気源の圧力は 3 kg/cm² (ゲージ) である。

5.2 制御および動特性測定装置

最短時間制御系と慣性モーメント測定系のブロック図を Fig. 8 に示す。ここで注意すべきことは、制御対象の系の入力信号 x のトルクを直接知ることはできないので、電磁バルブの開閉に従い、その絶対値はわからなくとも、一定のあらかじめ大きさの比が決まったトルクが発生するものとして、バルブ開閉の信号でトルク x に比例する信号 x_0 を作っている。

角加速度の信号は角速度を微分して y_0 としている。微分器の時定数は 1 ms で、テスト信号のクロック周期 (0.25 s) と比べて十分小さく、慣性モーメント測定値への影響は無視することができる。

最短時間制御をするための操作量としてのトルクは、ノズル 1, 4 により $|M|$ のトルクを発生する。テスト信号を系に入れるにはノズル 2, 3 (それぞれ対応するバルブの先のノズル) により $|eM|$ の大きさのトルクを発生させている。

Fig. 9 に回路図の一部を示した。回転機体の傾き角を検出するには低トルクのポテンショメータを使用

Fig. 8 Block diagram of the adaptive time optimum control system

Fig. 9 Diagram of the time optimum control system using a varistor

した. 角度 c に対する電圧 α は,

$$\alpha = K_\alpha c \quad K_\alpha = 3.44 \text{ [V/rad]} \quad (13)$$

一様な磁界の中でコイルが動けばその速度に比例した電圧が発生する. そこで角速度を測るにはマイクロアンメータの指針を機体につないで動かしている. 途中のフィルタやアンプを含めた係数は,

$$\dot{\alpha} = K_\omega \dot{c} \quad K_\omega = 4.15 \text{ [V/rad/s]} \quad (14)$$

テスト信号 u との掛算は u が 2 値信号であるのでリレーの切換えで行なわれている. また, 割算器はホール素子を利用した掛算器を演算増幅器のフィードバック回路に組み入れたものである.

5.3 動作の記録と解析

主な質量の, 回転軸の中心からの距離をもとにしてあらかじめ計算により軸まわりの慣性モーメントの大

略値を求めると,

$$\left. \begin{aligned} J_{\min} &= 7.11 \times 10^8 \text{ [gr} \cdot \text{cm}^2] \\ J_{\max} &= 17.1 \times 10^8 \text{ [gr} \cdot \text{cm}^2] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

と約 2.4 倍変化することになる.

操作信号 w とテスト信号 u により M と ϵM のトルクを発生させる. トルクの比が $\epsilon (=0.2)$ になるようにノズルの大きさを推力の計算式⁴⁾によって求めた.

上ざらばかりを用いてトルクを測定してみると,

$$M/g = 5.07 \times 10^3 \text{ [gr} \cdot \text{cm]} \quad (16)$$

$$\epsilon M/g = 1.09 \times 10^3 \text{ [gr} \cdot \text{cm]} \quad (g: \text{重力の加速度})$$

希望どおり $\epsilon = 0.2$ とみなすことができる.

最適切換線は角度 c , 角速度 $\dot{c}$ について,

$$c + \frac{J}{2M} \dot{c} |\dot{c}| = 0 \quad (17)$$

となるが, Fig. 9 の回路では電圧 $\alpha, \dot{\alpha}$ について (不感帯を無視する),

$$\alpha + k (R_f K_v) \dot{\alpha} |\dot{\alpha}| = 0 \quad (18)$$

となる. したがって, 上の M, J に対してのポテンシオメータの設定値 k の最適値 k_{opt} は,

$$k_{\text{opt}} = \frac{J \cdot K_\alpha}{2 M \cdot K_\omega^2 R_f K_v} \quad (19)$$

(15), (16) 式の M, J を代入すると $k_{\text{opt}} = 0.08 (J_{\min})$, $k_{\text{opt}} = 0.19 (J_{\max})$ となる. 実験により求めた最適の k は $k_{\text{opt}} = 0.11 (J_{\min})$, $k_{\text{opt}} = 0.21 (J_{\max})$ であった. 慣性モーメントの見積りはごくおおざっぱな値であったからこの程度の誤差はやむをえず, 最短時間制御系の設計法としては以上に述べたことで十分役立つと思われる.

Fig. 10, Fig. 11 に $J_{\min}$, $J_{\max}$ のときに目標値を $r=r_0$ から $r=0$ にステップ状に変化させたときの位相面軌跡を示した. この位相面の記録から, $J_{\max}$ の軌跡の上の任意の点 $(\alpha_{\max}, \dot{\alpha}_{\max})$, $J_{\min}$ の軌跡の上の任意の点 $(\alpha_{\min}, \dot{\alpha}_{\min})$ を読み取ることにより,

Fig. 10 Phase plane trajectories, $J_{\min}$, test signal is not applied to the system

Fig. 11 Phase plane trajectories, $J_{\max}$, test signal is not applied to the system

$$\frac{J_{\max}}{J_{\min}} = \frac{\alpha_{\max}/\dot{\alpha}_{\max}^2}{\alpha_{\min}/\dot{\alpha}_{\min}^2} \quad (20)$$

として, $J_{\max}/J_{\min}$ を求めることができる. Fig. 10, Fig. 11 と (20) 式によれば $J_{\max}/J_{\min}=1.95$ となる. k_{opt} の値の比が $0.21/0.11=1.91 (=J_{\max}/J_{\min})$ であることを考え, 両方の平均をとると, 慣性モーメントは実際には 1.93 倍変化していることになる.

3.5.1 不感帯 本装置では操作量の正負が切換わるときに, パルプ開閉の振動が速度検出器に雑音としてはいり, 誤動作の原因となる. そこで位相面の原点付近にだけでなく, 切換線にそって Fig. 12 のような不感帯を設けている. 不感帯の大きさは実験的にきめられたが, その大きさは角度にして $2c_0=1.3^\circ \sim 1.6^\circ$ である.

Fig. 12 Switching curve with deadband

3.5.2 テストシグナル アナログ計算機での実験で, 発生器のシフトレジスタの段階は測定に影響しないことがわかっているので, 5 段のシフトレジスタの発生する m 系列信号を用いた. まさつのような外乱や, 信号検出回路のおくれを考えれば, m 系列のクロック周波数は低いほうがよい. いっぽう, テストシグナルは制御系にとっては外乱であり, クロック周波数が高いほうが角速度や角度の外乱としては小さいことになる. けっきょく, 実験的には数 Hz 程度が適当で,

4 Hz としている. アナログ計算機の実験では, テストシグナルの大きさは操作量の $0.1/1$ にしても十分測定できたが, 空気ジェット系ではそれでは測定値が不安定で, テストシグナルの大きさは操作量の $0.2/1$ としている.

3.5.3 切換線の自動設定 テストシグナルを加えて, 慣性モーメントを測定しながら $J_{\min}$ から $J_{\max}$, $J_{\max}$ から $J_{\min}$ と慣性モーメント J をステップ状に変化させて測定値 J_m を記録する. それぞれ Fig. 13 (a), Fig. 14 (a) 参照. J_m が安定したと思われる所で目標値を変化させ, 姿勢制御系の応答を位相面で記録する. Fig. 13 (b), (c), Fig. 14 (b), (c) 参照. このときの平均化フィルタの時定数は 200

(a) record of the measured inertial moment

(b) phase plane trajectories at time A, $J_{\min}$

(c) phase plane trajectories at time B, $J_{\max}$

Fig. 13 Air jet control system

(a) record of the measured inertial moment

(b) phase plane trajectories at time c, $J_{\max}$ (c) phase plane trajectories at time D, $J_{\min}$

Fig. 14 Air jet control system

s である。慣性モーメントが変化したのに対応して切換線が変化し、位相面の記録から最短時間制御が行なわれていることがわかる。テスト信号が比較的大きいので軌跡が乱れるが、この程度はアナログ計算機でのシミュレーションでも見られたとおりである。

テスト信号を入れているので回転機体は目標値に達したのち、約 $\pm 0.5^\circ \sim 0.8^\circ$ ゆれている。これはだいたい不感帯の範囲ぐらいで、この制御系の制御成績は目標値に対して $\pm 1^\circ$ 以内といえよう。

Fig. 13, 14 の J_m の記録によると $J_{\max}/J_{\min} = 2.0 \pm 0.1$ となり、あらかじめ求めた $J_{\max}/J_{\min} = 1.93$ と比較し、慣性モーメントが正しく測られているといえる。 $J_{\min}$ と $J_{\max}$ の間の値についても同様

に慣性モーメントの測定が行なわれ切換線が設定される。

3.5.4 慣性モーメント測定値の誤差 電磁パルプ開閉による機体の細かい振動が角速度検出器にはいり、加速度信号 y_0 には雑音 n_0 が加わっている。その雑音は定常不規則信号とはいえないが、いちおうそれを仮定し、平均値が 0 で自己相関関数 ϕ_{nn} が、

$$\phi_{nn}(\tau) = \sigma_n^2 e^{-a|\tau|} \cos 2\pi f_0 \tau \quad (21)$$

としておく。このとき測定値 J_m の分散を求めると、

$$\sigma^2(J_m) = \left(K_a \frac{J}{K}\right)^2 c^2 \frac{1}{\sigma_n^2} \int_0^\infty \phi_{nn}(\tau) d\tau \quad (22)$$

ただし、 K_a は割算器の係数、 K は加速度信号検出器の係数である。また、 c は n_0 と y_0 の振幅の比として振動の記録から求めることができる。

$$c = \frac{E[n_0]}{E[y_0]} \quad \text{あるいは} \quad \frac{\sqrt{E[n_0^2]}}{\sqrt{E[y_0^2]}} \quad (23)$$

加速度信号の記録をみて、 a , f_0 のだいたいの値を求めると、 $a = 2.5 \text{ s}^{-1}$, $f_0 = 25 \text{ Hz}$, c は高々 5 程度である。 $T = 200 \text{ s}$ にしてあるから、

$$\sigma(J_m) = \left(K_a \frac{J}{K}\right) \times 3 \times 10^{-3} \quad (24)$$

となる。 $\left(K_a \frac{J}{K}\right)$ が測定値 J_m として記録紙上に記録されているわけであるから、パルプ開閉による雑音を始めに仮定したようにみなすかぎりにおいては、測定値 J_m に与える影響は微小であるといえる。

したがって、ここで問題になるのは軸受け付近の特性であると思われるが、軸受けのまさつを正確に表わすことはむずかしい。回転機体の傾き具合で、値が変わるが静止まさつトルクとして約 $100 \text{ gr} \cdot \text{cm}$ ほどはある。慣性モーメントを変えるおもりは糸で動かされているが、左右の止まる位置が 1 mm ずれても約 $140 \text{ gr} \cdot \text{cm}$ の不平衡トルクを発生する。これに対してテスト信号を入れる空気ジェットが発生するトルクは約 $1000 \text{ gr} \cdot \text{cm}$ である。慣性モーメント J が大きいときは、テスト信号によって機体はゆっくりかつ小さくゆれ、 J が小さくなれば速くゆれるようになる。そのため、まさつなどの影響を一概に論ずることはできないが、上のような原因で測定値 J_m が 10% 程度ばらつくのはやむをえないであろう。 $T = 200 \text{ s}$ と大きくしているのはこのようなまさつなどの影響をできるだけ打消すためである。

3.5.5 測定値 J_m のステップ応答 慣性をステップ状に変化させたときの J_m の応答は、動特性測定系の動特性を示している。本論文で用いたような動特性測定系の応答は一般に平均化フィルタの時定数できまるといわれているが、その内容をもう少し詳しく

調べてみる。

Fig. 8 のブロック図で J_m は $t \geq 0$ において、

$$J_m(t) = K_d \frac{X(t)}{Y(t)} = \frac{X_0 e^{-t/T} + \frac{1}{T} \int_0^t e^{-\xi/T} u_x(t-\xi) d\xi}{Y_0 e^{-t/T} + \frac{1}{T} \int_0^t e^{-\xi/T} u_y(t-\xi) d\xi} \quad (25)$$

ただし、 X_0, Y_0 は $t=0$ での $X(t), Y(t)$ の値、 $u_x(t) = u(t) \times x_0(t)$ 、 $u_y(t) = u(t) \times y_0(t)$ である。 $J_m(t)$ が一定の値に落ち着くまでは、目標値を変えるようなことをしないとすれば、 $X(t)$ の値はあまり変化しない。そこで $u_x(t) = X_0$ とみなし、外乱を無視すれば $y_0(t) = \frac{K}{J} x_0(t)$ であるので、

$$u_y(t) = u(t) \times y_0(t) = \frac{K}{J} u_x(t) = \frac{K}{J} X_0 \quad (26)$$

また、 $t < 0$ では J_0 であったものが $t=0$ で J に変えられたとすれば、 Y_0 を $Y_0 = \frac{K}{J_0} X_0$ としておく。(25)

式は、

$$J_m(t) = \frac{K_d}{\frac{K}{J_0} X_0 \left\{ e^{-t/T} + \frac{J_0}{J} (1 - e^{-t/T}) \right\}} \quad (27)$$

$t=0$ では $J_m(0) = K_d \frac{J_0}{K X_0}$ 、 $t \rightarrow \infty$ では $J_m(\infty) = K_d \frac{J}{K X_0}$ となる。 J/J_0 を $(1/2, 2)$ 、 $(1/4, 4)$ と変えたときの $J_m(t)$ を Fig. 15 に示した。Fig. 13, 14

Fig. 15 Response of the moment measuring system to the change of the moment

で J を大きくしたときには、測定系の応答が 1 次フィルタの応答よりおそく、 J を小さくしたときは、応答が速くなっていることは以上のようにして説明される。これは測定対象が大きくステップ状に変化したときの

応答であり、 $J_0 \rightarrow J_0 + \Delta J$ と微小の変化をしたときには (27) 式から、

$$J_m(t) \doteq \frac{K_d}{K X_0} \left\{ 1 + \frac{\Delta J}{J_0} (1 - e^{-t/T}) \right\} \quad (28)$$

となり、たしかに時定数 T をもつ応答とみなせる。また $1/J_m(t) = K_d Y(t)/X(t)$ を測定するのであれば (27) 式より応答は 1 次フィルタの時定数 T で定められる。ただ、この実験で $K_d X/Y$ を求めているのは装置の構成が簡単になるためである。

6. む す び

圧縮空気を動力源とした一軸まわりの姿勢制御系を製作し、最短時間で傾きを目標値に修正する系を構成した。非線形抵抗素子と演算増幅器およびポテンシオメータにより望みの位相面切換線が実現できることを示した。制御対象である純慣性系の慣性モーメントが変化した場合には、それに応じて位相面切換線を変化させるように、制御系にはつねに小さなテストシグナルが加えられ、慣性モーメントが測定されている。その測定は姿勢制御のループを切り離すことなく行なわれている。約 2 倍の慣性モーメントの変化に対して切換線を自動的に設定することができた。それにより本論文で述べたような方法で制御対象の特性が変化しても、つねに最適な制御系を作ることができることを実験的に確かめられた。

慣性モーメントが変化したときの動特性測定系の応答、およびアナログ計算機でのシミュレーションではあまり問題にならなかったテストシグナルについても、空気ジェット系における動特性測定の誤差との関係が調べられた。

最後に日ごろ御指導いただく東京大学宇宙航空研究所五十嵐寿一教授、石井 泰助教授に感謝の意を表します。また、回転機体の軸受け部分の製作に御援助いただいた、日本レギュレーター (株) 取締役川元修三氏 (現在、工学院大学工学部) に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 石井 泰・小林健三：オンオフ式速応サーボ系の解析と設計，第 5 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，367/372 (1966)
- 2) 上野敏行：モーメント法によるプロセス動特性の測定，計測自動制御学会論文集，5-3，265/272 (1969)
- 3) B. B. ソロドフニコフ，A. C. ウスコフ：自動制御系の統計的解析法，p. 99 (1963-コロナ社)
- 4) 可動アイアンパードの構造および機能，航空宇宙技術研究所資料，TM-71 (1965)