手動制御動作の適応性†

小 畑 秀 文・磯 部 孝

東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

(昭和 45 年 1 月 14 日 受付)

Adaptive Response Characteristics of the Human Operator

Hidefumi KOBATAKE and Takashi ISOBE

(Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo)

(Received January 14, 1970)

This paper describes a study on the adaptive response characteristics of a human operator to step changes in the dynamics of a compensatory tracking system.

It is already known that the human operator can adapt himself quickly to a change in the dynamics. The process of adaptation has not, however, been investigated in detail because the adaptation takes place in a very short period.

It is found that the operator adjusts not only his gain but also some other response characteristics. An analysis reveals the following important characteristics;

- 1) The delay in taking actions in a transient state is smaller than that in a steady state.
- 2) The operator responds in an open loop fashion and the greater part of the actions seems to be determined by the initial state of the control error.
- 3) The response characteristics in a transient state are similar to those of the response to a step input.

1. 序 論

手動制御系の 1 つの特徴は適応性が著しいことである。入力信号の特性や制御対象の動特性が変化すれば、オペレータはその変化に素早く適応してゆく。

オペレータの制御動作の特性は、一般には線形連続な伝達関数とレムナントと称する雑音に類する成分を導入することによってかなり良く表わすことができる。とされている。しかしオペレータの制御動作は入力信号や制御対象の特性に応じて変化するのであって、1 つの固定した伝達関数を以て表わすことは不適切である。Elkind¹⁾は入力信号のスペクトル幅や振幅の違いによって伝達関数のパラメータがいかに変化するかをかなりくわしく調べている。また制御対象の違いによるオペレータの動特性の差異については McRuer ら²⁾が詳細な解析を行なっている。それによれば、オペレータは制御対象の動特性とオペレータの動特性とをまとめたループ全体の伝達関数がほぼ一定の形になるよ

うに制御対象の動特性に応じた応答特性を示すという。オペレータの線形連続な伝達関数 $H(S)$ の最も一般的なる形は次の式で表わされる。

$$H(S) = \frac{K_h \cdot e^{-\tau_s S} \cdot (1 + T_A S)}{(1 + T_L S) \cdot (1 + T_N S)} \quad (1)$$

τ は応答遅れ時間であり、 T_N は筋肉の応答の遅れ時間を表わす。 $(1 + T_A S)/(1 + T_L S)$ は equalizer と呼ばれ、これとゲイン定数 K_h を含めたものが人間の持つ適応性に重要な働きをする。制御対象の動特性のいかにかわからず、ループ全体としてつねにはほぼ一定の動特性を保つように equalizer が変化し、適応化がなされるというわけである。そして開ループ全体の伝達関数はゲインが 1 に等しくなる周波数 (cross-over frequency) の近くでは近似的に次の形で表わされるとされている。

$$H(S) \cdot Y(S) = \frac{\omega_c \cdot e^{-\tau_e S}}{S} \quad (2)$$

$Y(S)$ は制御対象の伝達関数であり、 τ_e は遅れ要素や進み要素の影響を含めた等価的な遅れ時間である。

† 第 8 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 44・8)

このような準定常状態におけるオペレータの動特性の適応性とは別に、時間とともに変化してゆく入力信号や制御対象の特性に対して、オペレータが適応してゆく過程を明かにすることも興味ある問題である。たとえば航空機や宇宙船ではそのときどきの速度や姿勢によって動特性が大きく変化するので、オペレータの適応してゆく過程がこれらのシステムの安定性や適応の可能性の限界などに大きい影響を与えるだろう。

これまでに制御対象の特性が瞬間的に変化したときにみられる手動制御系の過渡状態を解析し、適応の過程を明らかにした研究報告がある。Young³⁾によれば、オペレータの適応は極性に対する適応のほうがゲインに対するものに優先するという。また Elkind^{4,5)}は適応の過程を 4 段階に分ける考え方を提案し、オペレータの適応が非常に早いことから、オペレータの適応は制御対象に対する内部モデルの切り換えによるものであるという考え方を主体にしたモデルを發展させた。

本研究は制御対象の瞬間的な変化に対してオペレータが適応する過渡状態を解析し、そのときに見られる応答が定常状態で見られるものとは異なることを示し、さらにそれを解析したものである。

2. 実験方法

実験に用いた手動制御系の構成を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Block diagram of the compensatory tracking task

この制御系は制御誤差のみが表示される補償制御系である。制御系への入力信号は雑音発生器から得られる不規則信号を低域波器に通したものをを用いた。Fig. 2 は手動制御系の表示装置と制御レバーの部分を示したものである。制御誤差の表示は直径 12 cm のブラウン管オシロスコープを用い、その表示面に長さ約 2 cm の輝線を 2 等分したものを示し、向かって左側は中央に静止し、右側は制御誤差に比例して上下に振れるようにし、左右の輝線のずれで制御誤差の大きさが表示された。制御レバーは前後方向にだけ動くようになっており、オペレータがこれを手で操作する。レバーが下端の支点の回りに回転すると、フォトランジスタとその前方にある豆電球との距離が変化し、回転角に比例した電圧変化が得られる。この電圧変化がオペレータの出力となる。

Fig. 2 The experimental arrangement

制御対象としてアナログ計算機の積分器（伝達関数 K_p/s ）を用いた。積分器のゲイン定数 K_p は 2.0, 2.5, 3.3, 5.0, 7.14 およびその極性を変えたもの合計 10 種類のものをを用いた。行なった実験は K_p の大きさおよび極性を被験者に予告なしに、不規則に切り換えて、その前後でのオペレータの応答特性の変化を解析し、適応してゆく過程を調べたものである。

被験者が制御対象の変化に気付いたときを知るいちおうの目安として、被験者は制御対象が変化したと判断したときに素早く検出スイッチを押すように指示されている。被験者が検出スイッチを押すまでに少なくとも応答遅れ時間だけの遅れが伴うし、また制御動作のほうに意識が集中していてそれ以上遅れることもあるが、いちおうは検出時刻の目安となるであろう。検出スイッチが ON の状態になった時刻は制御系への入力信号や制御誤差および被験者の出力とともにペン書きオシログラフに記録される。制御対象に用いた積分器や低域波器、入力信号と出力信号との差などはアナログ計算機を用いて実現した。

実験は 20 代の男子 3 名の被験者について行なった。制御対象の特性変化に対するそれぞれの実験例数は Table 1 に示す。これらの実験は 3 回に分けて行なった。1 回の実験は 1 人の被験者については 30 分以内

Table 1 The number of times of experimental runs for each subject

	gain change					
	2.0 ↓ 2.5	2.0 ↑ 3.3	2.0 ↓ 5.0	2.0 ↑ 7.14	5.0 ↓ -5.0	2.5 ↑ -5.0
the number of times of experimental runs	10 10	10 10	10 10	10 10	10	7 7

とし、連続5分間の実験の後に数分の休憩時間を入れた。制御対象の特性が変化する時間間隔は不規則であるが、平均20秒である。

データを採るにあたってあらかじめ十分練習を行ない、制御対象の瞬間的な変化に対しても十分安定な動作を行なうようになってから実験を行なった。

3. 応答特性の変化

制御対象が瞬間的に変化してから、被験者がその変化に気付く、変化した制御対象に対して適応動作を行なうようになるまでの間、制御系全体の特性は定常な動作状態での特性と異なる。 K_p が変化した直後の手動制御系の状態は次の2つの場合に分けることができる。

- i) 制御系が安定のままである場合
- ii) 制御系が不安定になる場合

i) の場合はオペレータが制御対象の変化に適応した動作を行なわなくても制御系自身は安定であるのに対して、ii) の場合は制御系を安定な状態に戻すためにオペレータは制御対象の変化に適応することが必要である。

ところで本研究では制御対象の積分定数 K_p を変化させたときのオペレータの応答の変化を調べたのである。ここに適応過程とはオペレータが K_h 、すなわちオペレータ自身のゲインを、

$$K_h \cdot K_p = \omega_c (\text{const.}) \quad (3)$$

となるように変えてゆく過程であると考えることができよう。 ω_c はループゲインである。この適応してゆく過程でオペレータの応答特性はどのように変化してゆくかをまず論じよう。

3.1 応答特性の同定

オペレータの動特性は制御対象によっても入力信号の性質によっても変化する。しかもその応答特性は時間的にも変化してゆく。オペレータの応答が線形であると考えたとき、オペレータの出力 $m(t)$ は一般に次のように表わされる。

$$m(t) = \int_0^\infty h(\tau, t) \cdot e(t-\tau) d\tau + n(t) \quad (4)$$

ここに $h(\tau, t)$ はオペレータのインパルス応答であり、時間の関数で与えられる。 $e(t)$ は制御誤差、 $n(t)$ は入力とは無相関なレムナント成分である。オペレータの応答特性を線形と仮定するのはかなり良い近似であり、オペレータの出力のうち非線形性による部分は5%程度であるという結果が報告されている⁶⁾。

時間的な変化を伴う動特性を同定する方法はいくつか提案されているが、ここでは学習の同定法⁷⁾と呼ば

れる逐次近似の方法を用いた。(4)式の $h(\tau, t)$ の学習の同定法による推定値を $\hat{h}(\tau, t)$ とする。 $\hat{h}(\tau, t)$ は連続な関数であるが、それを0.1秒ごとにサンプルした離散値系で置きかえて、ベクトル $\underline{\hat{h}}$ で表わし、次のように逐次修正する。

$$\underline{\hat{h}}_{j+1} = \underline{\hat{h}}_j + \alpha \cdot \frac{E_j}{\|\underline{E}_j\|^2} \cdot \{m(j\Delta t) - m'(j\Delta t)\} \quad (5)$$

ただし、

$$m'(j\Delta t) = \sum_{i=0}^{14} \hat{h}_j(i\Delta t) \cdot e(j-i\Delta t) \quad (6)$$

$$\underline{\hat{h}}_j = \begin{pmatrix} \hat{h}_j(0) \\ \hat{h}_j(\Delta t) \\ \hat{h}_j(2\Delta t) \\ \vdots \\ \hat{h}_j(14\Delta t) \end{pmatrix}, \quad \underline{E}_j = \begin{pmatrix} e(j\Delta t) \\ e(j-1\Delta t) \\ e(j-2\Delta t) \\ \vdots \\ e(j-14\Delta t) \end{pmatrix}$$

$$\|\underline{E}_j\|^2 = \underline{E}_j^T \cdot \underline{E}_j, \quad \Delta t = 0.1 \text{ 秒},$$

$$j = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

オペレータのインパルス応答の最大遅れ時間を1.4秒とした。 α は誤差修正係数と呼ばれ、 $0 < \alpha < 2$ の任意の値でよいが、ここでは1.0をとった。このとき、

$$m(j\Delta t) = \underline{\hat{h}}_{j+1}^T \cdot \underline{E}_j \quad (7)$$

が成立する。

オペレータが制御対象の変化に対して適応してゆく過程は通常数秒程度で完了する。このような早い変化をこの逐次近似の方法で忠実に推定することは不可能である。しかし数秒近く続く応答特性はかなりの確にとらえることができるので、制御対象のゲイン変化に対してオペレータの応答特性の変化がゲインだけの变化で説明できるか、あるいは、応答特性そのものに変化があるのか否かは判断することができよう。

3.2 応答特性の時間的变化

3.2.1 ゲイン K_p が減少した場合 Fig. 3は制御対象のゲイン K_p を7.14から2.0に減少させた場合の制御誤差とオペレータ出力、およびオペレータ応答関数の推定値 $\hat{h}(\tau, t)$ の時間変化の一例を示したものである。 K_p が減少したときには単にループゲインが小さくなるだけであるから、制御系は安定である。そのために、制御能力が低下するにもかかわらず、制御誤差に著しい増加はみられない。オペレータの応答特性については、制御対象の変化に気付くまで (Fig. 3のD点) はほぼ一定の応答特性を示しており、D点以後から応答関数のゲインの増加が始まっていることがわかる。しかし、応答関数の形そのものには特に著しい変化は認められず、ゲインは徐々に増加してゆき、変化後4秒程でほぼ定常状態に達していると思われる。

Fig. 3 Tracking records for a change in the process dynamics from 7.14/s to 2.0/s and the change of response characteristics of the operator (subject C)

オペレータのゲインは制御対象のゲイン変化前の値と比較して約 3.5 倍に増加しており、 K_p の減少を補償しているのがわかる。

3.2.2 ゲイン K_p が増加した場合 Fig. 4 はゲ

Fig. 4 Tracking records for a change in the process dynamics from 2.0/s to 7.14/s and the change of response characteristics of the operator (subject C)

イン K_p を 2.0 から 7.14 に急に増加させた場合の応答例である。 K_p が増加すると (同図 C 点) その直後より制御誤差は急速に増大してゆく。これはループゲインの増加によって手動制御系が不安定になるからである。この不安定な状態はオペレータの素早い適応動作によって安定な状態に戻り、増大した制御誤差も急速に減衰してゆく。このときにオペレータの応答に

明らかな変化がみられることが多い。Fig. 4 はその一例であり、制御対象の変化後オペレータのゲインが減少するばかりでなく、応答関数の形そのものも著しく変化していることがわかる。そして制御誤差が通常の範囲内に収束してからは徐々に元の形に戻りつつあるように思われる。このことから、 K_p が増加してから制御誤差が減衰するまでの間、通常の応答とは異なった応答になると考えられる。ここではこの応答の仕方をかりに過渡状態の応答と呼ぶことにする。次にこの過渡状態の応答がどのようなものであるかについて実験の結果を述べる。

4. 過渡状態の応答の特徴

4.1 応答遅れ時間の変化

序論で述べたように、オペレータの応答特性の最も簡単な表現は (2) 式の形で表わされるとされている。いま制御対象は積分要素であるからオペレータは遅れ時間 τ_e を伴う比例要素とみることができる。すなわち、

$$m(t) = K_h \cdot e(t - \tau_e) \quad (8)$$

したがって、オペレータ出力 $m(t)$ と制御誤差 $e(t - \tau_e)$ とを互いに重ね合せてみた場合には両者の位相関係はかなり良い一致をみることが期待される。Fig. 5

Fig. 5 Relationship between the control error $e(t - \tau_e)$ (dotted line) and the operator output $m(t)$ (solid line), (K_p : 2.0 → 7.14) (subject C)

は $m(t)$ と $e(t - \tau_e)$ とを重ね合せて描いたものの一例である。ここで応答遅れ時間 τ_e は次の式によって定めた。

$$\tau_e = \phi_{em}^{-1}(\max_{\tau} \phi_{em}(\tau)) \quad (9)$$

$\phi_{em}(\tau)$ は $e(t)$ と $m(t)$ との相互相関関数であり、 ϕ_{em}^{-1} はその逆関数を表わす。図から、制御対象が変化する前および変化した後数秒を経過してからは、 $m(t)$ と $e(t - \tau_e)$ との位相は非常に良く一致することがわかる。これに反して、制御対象が変化してから

の過渡状態では両者の間に明らかな位相のずれがみられ、オペレータの出力のほうが進んでいることがわかる。同図 (a) は Fig. 4 に示した例であり、これは比較的過渡状態が長く、約 2 秒間続いている。同図 (b) は (a) と同一の被験者のものであるが、過渡状態が比較的短い場合の一例であり、約 1 秒間である。このときの位相のずれは時間にしてともに約 0.1 秒である。このことから、オペレータの応答が (7) 式で近似できるとした場合に、オペレータが適応してゆく過渡的な状態においては、比例ゲインばかりでなく、 τ_e の値も同時に減少していると考えられる。そして、 τ_e の減少は Fig. 5 の場合では 0.1 秒となる。

4.2 加速度の切換点の変化

オペレータの応答がどのように変化しているかを位相平面上において考察する。Fig. 6 は Fig. 1 に示し

Fig. 6 Modified diagram of Fig. 1 as a velocity control system

た手動制御系を観点をえて書いたものである。制御対象は積分要素であるから被験者の出力は制御対象の出力の速度を与える。すなわち、この制御系は速度制御系である。オペレータが制御誤差の状態に応じてどのように速度を変化させているかをみるために、オペレータの出力の時間微分、すなわち加速度 ($\ddot{c}(t)$) を考える。加速度は制御誤差 $e(t)$ とその速度 $\dot{e}(t)$ によって、

$$\ddot{c}(t) = f(e, \dot{e}) \quad (9)$$

なる関係で与えられると考えてよい。関数 f は時間 t によっても変化するし、確率的に変化すると考えられるから、 f の形そのものを決定することは困難である。しかし 1 つの特徴点として速度の増減が変化する点、すなわち加速度の切換点を考えてみる。Fig. 7 は K_p を一定の値に保った定常な動作状態のとき、加

Fig. 7 Distribution of the switching points of acceleration under the steady state tracking (subject A)

速度の切換点が制御誤差 $e(t)$ とその微分値 $\dot{e}(t)$ の位相平面上でどのように分布するかを調べた結果を示したものである。加速度の切換はほとんどいつでも第 1 象限と第 3 象限で行なわれることがわかる。このことは他の 2 名の被験者についても同様であった。それに対して、制御対象のゲインが増加し、被験者がこれに気付いてからの過渡状態では加速度の切換点に変化が生ずる。Fig. 8 は制御誤差の位相平面上での軌跡

(a) subject B (b) subject C
Fig. 8 Examples of experimental trajectories of the control error and switching points of acceleration with a gain increase ($K_p: 2.0 \rightarrow 7.14$)

と加速度の切換点 (図の○印) の変化の様子を示したもので、 K_p が変化した後、加速度の切換点が移動し、同図 (a) では第 4 象限と第 2 象限の両方で、同図 (b) では第 2 象限でそれぞれ加速度の切換が行なわれているのがわかる。このように加速度の切換が普通よりは早目に行なわれるので、制御誤差の反対側への行過ぎ量が非常に小さくなり、 K_p が増大したために増加した制御誤差が急速に減衰するのがみられる。

これまでは K_p の値が増加した場合について述べてきたが、同様な応答はそれの場合だけでなく、一般に制御系が不安定になるような方向に K_p が変化した場合にみられる。一例として K_p が 2.5 から -5.0 に変化した場合の応答例を Fig. 9 に示す。初めに極性に対して適応が行なわれ、ゲインが増加しているために反対側に大きな行過ぎ量が生じるが、そのあとでゲインに対しても適応がなされ加速度の切換点が移動し、制御誤差が急速に減衰しているのがわかる。

4.3 開ループ的制御動作

過渡状態の応答のもう 1 つの特徴としてそれが開ループ的な応答であることがあげられる。Fig. 10 は K_p が 5.0 から -2.5 に変化した場合の応答例である。制御対象の変化に気付いたところでオペレータは自分自身の極性を反転し、制御誤差を小さくするための制御動作を一度試してみる (図中の矢印 1)。しかし制御誤差が完全に収束しないために再び同様な応答を繰返すのがわかる (同図矢印 2)。これはゲインの減少

Fig. 9 Example of a tracking record for a change in the process dynamics from 2.5/s to -5.0/s. The shift of switching points of acceleration can be seen at the point P (subject C)

Fig. 10 Example of transient response to polarity reversal and gain decrease ($K_p: 5.0 \rightarrow -2.5$). In this case the operator tends to respond in an open loop fashion (subject B)

に気付かないまま一度過渡状態での応答が行なわれ、それによる制御誤差の減少が小さいことから K_p の値の減少にも気づき、未制御の誤差を減少させるために再び同様な過渡状態の応答を繰返したものであると考えられる。すなわち、過渡状態の応答の途中では制御誤差の状態の変化はオペレータの応答動作にはフィードバックされず、制御系は閉ループ制御系から開ループ制御系に近い状態に変化するのであることを示しているといえよう。

4.4 過渡状態の応答の特徴

4.1 から 4.3 までの特徴を合わせ考えると、過渡状態の応答は次のようなものであると考えられる。

1) 応答動作はそれまでにオペレータが推定した制御対象の動特性と、増大する制御誤差の初期状態とによってほとんど決ってしまい、途中の制御誤差の変化はフィードバックされない。

2) 加速度は制御誤差が位相平面上で第 2, 第 4 象限にあると予想されるときに切り換えられる。したがって、制御対象についての推定が正しく行なわれるとき、はじめて制御誤差は一度の過渡状態の応答で減衰する。

3) τ_e が小さくなるのは過渡状態の応答が以上のような予測のもとに行なわれる応答であるためであると考えられる。

4.5 K_p の増加率と応答特性の変化

応答特性の変化は K_p が増加したときに必ず起こるというものではなく、また変化がみられる割合は K_p の増加率によって異なる。 K_p が 2.0 から 7.14 に変化した場合には試行回数の約 50% に対して明らかな応答特性の変化がみられたが、 K_p の増加率が小さくなるに従ってその割合は減少してゆき、 K_p が 2.0 から 3.3 に変化した場合にはほとんど変化はみられなかった。また極性変化を伴う場合には、 K_p の増減にかかわらず、試行回数の約 60% に対して応答特性の変化がみられた。このときの τ_e の値の変化は、正確に求めることは困難であるが、0.05 秒から 0.1 秒程度であった。

制御対象が瞬間的に変化するのに対して、 K_p の値を 10 秒から 20 秒の間に連続的に 3 倍に増加させることも試みたが、応答特性に目立った変化は認められず、制御誤差も著しい増加を示さなかった。

これらのことから、応答特性が変化するのは制御対象の特性の変化によって生じた著しく大きい制御誤差が原因であると思われる。

5. ステップ応答との比較

過渡状態の応答と同様に制御誤差の急速な減少がみられるものにステップ応答がある。Fig. 11 は過渡状態の応答とステップ応答とを比較したものである。同図 (a) は K_p の極性だけを変化させたときの過渡状態の応答であり、(b) は普通のステップ応答である。オペレータが制御対象の極性の変化に気付いてからの応答とステップ入力に対してみられる応答とはいずれも行過ぎ量がなく急速な誤差の減少を示すのであって、きわめて良く類似している。同様に、極性とゲインの両方の変化に対してみられる過渡状態の応答とゲイン変化に対するステップ応答も良く類似する。このことから、制御対象の変化後にみられる過渡状態の応答は

Fig. 11 Comparison between the transient response and the step response (subject C)

ステップ入力に対して行なわれる応答，すなわちステップ応答に相当するものと考えられる。 K_p の変化によって制御系が不安定となり，その結果増加する制御誤差はステップ入力によって生じた制御誤差と同じ意味を持ち，オペレータの応答特性が通常の応答特性からステップ応答に相当する応答に切り換えられるものと考えられる。

6. 結 論

制御対象の特性が瞬間的に変化した場合にみられる

オペレータの応答特性の変化について考察した。

制御対象の変化によって手動制御系が不安定になる場合は制御誤差が著しく増加し，このときオペレータの応答特性にゲインの変化だけでは説明できない変化がみられることを示した。この応答は次のような特徴を持つ。

1. 過渡状態の応答の応答遅れ時間は通常の定常状態のときの応答遅れ時間に比べて小さい。
2. 手動制御系を速度制御系と考えたとき，加速度の切換は通常よりも早目に行なわれる。その結果，制御誤差の減衰がきわめて早くなる。
3. この応答は開ループ的な応答である。したがって，制御動作は制御誤差の初期状態によってほとんど決ってしまうように思われる。
4. この応答はステップ応答と同種類の応答であると考えられる。

この研究では制御対象のゲインの変化に対する適応性だけを取り扱ったが，より複雑な制御対象の変化に対する適応性を追究することが望ましい。

終わりに本研究を行なうにあたりご協力いただいた東京大学工学部小松忠紀氏，牧野忠由氏〔現〕松下通信工業(株)〕に感謝いたします。

参考文献

- 1) J. I. Elkind and C. D. Forgie: Characteristics of the Human Operator in Simple Manual Control Systems, IRE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-4, 44/55 (1959)
- 2) D. T. McRuel and E. S. Krendel: The Human as a Component in a Servo System, Jour. Franklin Institute, Vol. 276, Nos. 5 and 6, 381/403 and 511/536 (1959)
- 3) L. R. Young, D. M. Green and J. I. Elkind: Adaptive Dynamic Response Characteristics of the Human Operator in Simple Manual Control, IEEE Trans. on Human Factor of Electronics, Vol. HFE-5 (1964)
- 4) J. I. Elkind and D. C. Miller: On the Process of Adaptation by the Human Controller, Preprint of the IFAC on Bio-Cybernetics, Session 30, June (1966)
- 5) D. C. Miller and J. I. Elkind: The Adaptive Response of the Human Controller [to Sudden Changes in Controlled Process Dynamics, IEEE Trans. on Human Factor of Electronics, HFE-8-3 (1967)
- 6) L. W. Tayler and A. V. Balakrishnan: Identification of Human Response Models in Manual Control Systems, Paper Presented to the IFAC Symposium, Identification in Automatic Control System, 12/17, June (1967)
- 7) 野田・南雲: システムの学習的同定法，計測と制御，7, 597/605 (1968)