

反転要素を制御対象とした上肢トラッキング動作の学習過程*

小堀 聡**

Manual tracking motion has studied in order to investigate motor function of upper limb. This paper describes the learning process on reversal elements which mean that output on the display is reversed by controlled objects. On the experiment, the reference point is presented on the display as a circle, and the output of the actuator which is controlled by use of the mouse is shown as a cross. The subject is instructed to pursue the reference point as accurately as possible. The experiments were performed on normal subjects and learning process was analyzed with mean absolute error and proportion of patterns of the motion which we proposed. The results obtained are as follows ;

- (1) Normal subjects can adapt reversal elements in several trials.
- (2) In the case of one direction reversal elements, the affection by reversal is observed at non-reversal direction.
- (3) Anisotropy with respect to vertical and horizontal direction isn't recognized.
- (4) Compared with one direction reversal elements, two direction reversal element is easy to be tried at the early period.
- (5) Proposing evaluation parameters are effective for analysis in characteristics of the motion.

上肢運動機能を解析するためにトラッキング動作についての研究を行ってきた。本論文では、制御対象が反転要素での学習過程について述べる。反転要素とは、操作器の操作方向と表示器上の出力の移動方向が反転しているものをいう。実験では、目標点が円形のマークで、マウスの出力が十字形のカーソルで画面上に表示され、被験者はできるだけ正確に出力を目標点に追従させるように指示される。平均誤差と今回提案した動作パターンの割合によって、学習過程を中心に解析を行った。その結果から次のことがわかった。

- (1) 健常者の場合、数回の試行で反転要素に適応できる。
 - (2) 1方向のみの反転でも、反転による影響が非反転方向にもみられる。
 - (3) 左右反転と上下反転との間に異方性は認められない。
 - (4) 1方向反転より2方向反転のほうが、学習の初期では取り組みやすい。
 - (5) 提案した評価パラメータは動作の特徴を解析するのに有効である。
- (キーワード：手動制御系、トラッキング動作、反転要素、学習過程、動作パターン、異方性)

1. はじめに

人間の随意運動を制御という観点から考えれば、そのシステムは数多くのサブシステムによる複雑な階層構造¹⁾から成り立っているといえるが、その全体のメ

* 平成3年4月9日受付

** 龍谷大学 理工学部電子情報学科
Dept. of Electronics and Informatics, Faculty of Sci. and
Tech., Ryukoku Univ.

カニズムについてはまだ十分に解明されていない。しかしながら、運動系をブラックボックスとしてとらえ、その制御特性の機能的側面だけに着目した研究は、手の動作を中心に進められている²⁾。

手動制御系に関して、人間による機械の制御という立場から、人間-機械系における人間の様々な動作特性が研究され始めたのは今世紀初頭から³⁾とされ、その歴史はかなり古いといえる。当初は心理学者による研究が主たるものであったが、その後の制御工学の発展に伴って、そうした人間の性質を工学的に研究する学問が人間工学という体系にまとめられ、現在に至っている。それらの研究は、人間が機械を制御する際に、人間の性質があらかじめ明らかにされていれば、機械の設計の段階から、その点を考慮することができるという考えに基づいている。

Tustin らによる初期の研究では、入力と出力の関係で制御者の動作特性を解析し、線形化した伝達関数で近似的に表現するということが行われ、数多くの伝達関数が提案された⁴⁾。また、この伝達関数が制御対象によってどのように変化するかについては、McRuer らが研究を行い、クロスオーバーモデルとしてまとめる⁵⁾など、多くのモデルが考案されている⁶⁾。

最近の研究では、様々な理論を応用したモデルによる解析⁷⁻⁹⁾、学習過程や個人差に着目したもの¹⁰⁻¹²⁾や、逆に個人差を排して特性を標準化したもの¹³⁾、そして動作の非線形性の解析¹⁴⁻¹⁶⁾も報告されている。また、速度が可変の場合¹⁷⁾、視覚聴覚併用表示の場合¹⁸⁾、予覚動作の場合¹⁹⁾などの研究があり、数種のポインティングデバイスの比較^{20,21)}や新しいデバイスの提案²²⁾などもみられる。さらに最近では、一次元から二次元^{23,24)}の動作の研究へと移行している。

しかしながら、これらの研究は基本的には機械を正常に操作できる人間、すなわち健常者を対象としたものである。一方、手動制御系の研究成果をなんらかの障害をもつ患者の動作解析に応用しようとする試みも行われているが、臨床での評価に有効に利用できた例は少ない²⁵⁾。

このような背景から、本研究においては二次元の上肢のトラッキング動作を行わせることにより、健常者および患者の動作特性を解析し、上肢運動機能の評価

に応用することを目的としている。ただし、本論文では健常者における個人差や学習過程などについて検討し、上肢運動機能の評価とその臨床への応用については別の機会²⁶⁾で述べる。なお、ここでいうトラッキング動作とは、CRT 画面上の目標点をポインティングデバイスを用いて追従させることをいう。

また、制御対象が通常の比例要素の場合では、個人差や学習効果が現れにくいという予想から、反転要素についての実験を行い、その結果を考察した。反転要素とは、ポインティングデバイスの操作方向と CRT 画面上のカーソルの移動方向が反転しているものをいう。反転要素での実験については吉澤らの報告²⁷⁾があるが、本研究は目標値入力がランダムな連続信号で、制御系が追従型である点で大きく異なり、実験結果にも相違がみられた。

本論文では、まず実験の概略と動作パターンの割合という新しい評価パラメータによる解析方法について述べる。そして、この方法を用いて解析結果を検討し、学習過程²⁸⁾を中心に、個人差、非反転方向への影響、反転方向による差異などについて論ずる²⁹⁾。

2. 実験

2-1. 実験システム

手動制御系には大きく分けて補償制御系と追従制御系がある³⁰⁾が、ここでは吉澤らの補償制御系の実験²⁷⁾と比較するため、目標値と制御値の現在値の両方を同時に表示する追従制御系の実験を行うことにした。ブロック線図は図 1 に示すとおりである。

実験システムは以下のもので構成した。
パーソナルコンピュータ

(NEC 製：PC-9801 VM)

カラーディスプレイ (NEC 製：N 5913)

640×400 dots, 0.38 mm/dot

マウス (NEC 製：PC-9871 K) 4 counts/mm

マウスパッド

目標値データとしては、乱数とスプライン関数を用いてランダムで滑らかに変化する二次元データを作成して、ファイルに保管しておき、実験の際にそれらを

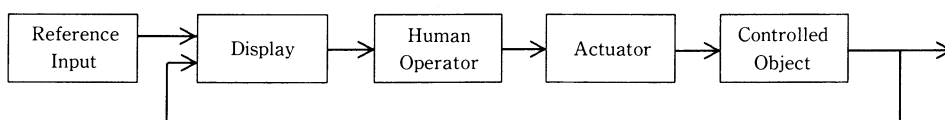


図 1 追従制御系の構成

Fig. 1 Block diagram of the pursuit tracking system.

ランダムに読み込むようにした。難易度は目標値の速度を評価基準にし、ほぼ一定に保つようになっている。目標点は半径 7 dots の円で表され、移動速度は平均 64 dots/sec となるように設定した。

一方、マウスの動きは 6 dots の十字形のカーソルで表示される。マウスの実際の移動距離と CRT 画面上での移動距離の比率（マウス感度）は 1:2 に設定した。マウスの制御値データは 25 msec のサンプリング周期で保存する。

制御対象としては、非反転の比例要素（以下、単に比例要素）とマウスの操作方向とカーソルの移動方向が反転している比例要素（以下、反転要素）で行うことにした。反転要素は、さらに左右反転、上下反転、上下左右反転に分かれ、それぞれ左右方向のみ、上下方向のみ、上下左右両方向の反転である。このような反転要素での実験は、通常の知覚体制の擬似的な破壊²⁷⁾とみなすことができ、この方法で被験者の個人差や学習過程をより明確にすることが可能であると考えた。

2-2. 実験方法

被験者は健康な 21~24 歳の男子学生 30 名である。実験は制御対象により、次の 4 種類で行った。

- a) 比例要素
- b) 左右反転要素
- c) 上下反転要素
- d) 上下左右反転要素

まず、a) は 30 名全員の被験者に対して、1 日 5 回の試行を 6 日間、計 30 回行った。次に、b), c), d) の 10 名ずつのグループを構成し、1 日 5 回の試行を 12 日間、計 60 回行った。

同一日の実験では、1 回 30 sec の試行終了後、約 30 sec のインターバルをとり、5 回連続で試行を行った。

実験に際しては、被験者に対して“目標点の動きにカーソルをできるだけ正確に追従させよ”という課題を与えて実験を開始した。また、先入観を与えるのを防ぐために、実験の主旨、解析方法については、被験者にはいっさい知らせず、さらに実験以外のときに実験について考えたり、他の被験者と話したりしないように注意した。なお、被験者は全員右利きで、実験も利き手でいった。

2-3. 解析方法

制御成績を評価する方法として、以下のような平均誤差と動作パターンの割合を各試行ごとに計算した。なお、添字の x, y は、それぞれ CRT 画面上の左右方向、上下方向の成分を示している。

(1) 平均誤差

平均絶対値誤差、すなわち目標値と制御値との各軸方向での距離の平均値 E_x, E_y を次の定義より計算した (r_x, r_y : 目標値, c_x, c_y : 制御値)。

$$E_x = \sum_{i=1}^n |r_x - c_x| / n \text{ (dots)} \quad (1)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^n |r_y - c_y| / n \text{ (dots)} \quad (2)$$

この平均誤差による解析は直感的にわかりやすく、また前述の被験者に対する課題に対応しているという利点がある。

(2) 動作パターンの割合

しかしながら、平均誤差は試行時間全体を平均化したものであり、それによって各軸方向での動作の特徴を解析するのは難しい。そこで、特に反転要素では、通常のプロportion要素での遅れの動作以外に、操作方向を誤るという逆方向への動作がみられると考え、それらの動作の時間軸上の割合を解析に用いることにした。

まず、目標値と制御値をそれぞれ時間微分して速度を求め、その絶対値がある値 (40 dots/sec) より小さい部分を±、それより大きい部分は正と負で+と-に分けた。そして、目標値と制御値のそれらの符号を時間軸で比較して、遅れ動作率 D_x, D_y と逆動作率 R_x, R_y を次のように定義した。

D_x, D_y : どちらか一方が±で、他方が+または-である部分の割合 (%)

R_x, R_y : どちらか一方が+で、他方が-である部分の割合 (%)

この方法では、動作パターンの割合のみに注目し、実際の誤差の大小は直接考慮せず、誤差の原因を推定していることになる。なお、各評価パラメータを各軸方向に分けて表さない場合は、それぞれ E, D, R で示すことにする。

3. 結果

比例要素と各反転要素での各評価パラメータ E, D, R の試行回数による変化を図 2 と図 3 に示す。試行回数ごとの有意差検定の結果は表 1 に示したとおりである。反転要素での実験は 60 回行ったが、31 回以降では、もはやほとんど変化がなかったので、30 回までのデータについて検討することにした。

なお、図中のプロットは被験者の平均値を、上あるいは下への線は標準偏差を示している。また、表中の左側に示した数字は、試行ごとに値を比較して前者のほうが危険率 5% で有意に大きかった場合の 10 回の試行ごとの数であり、逆に右側の数字は、後者のほう

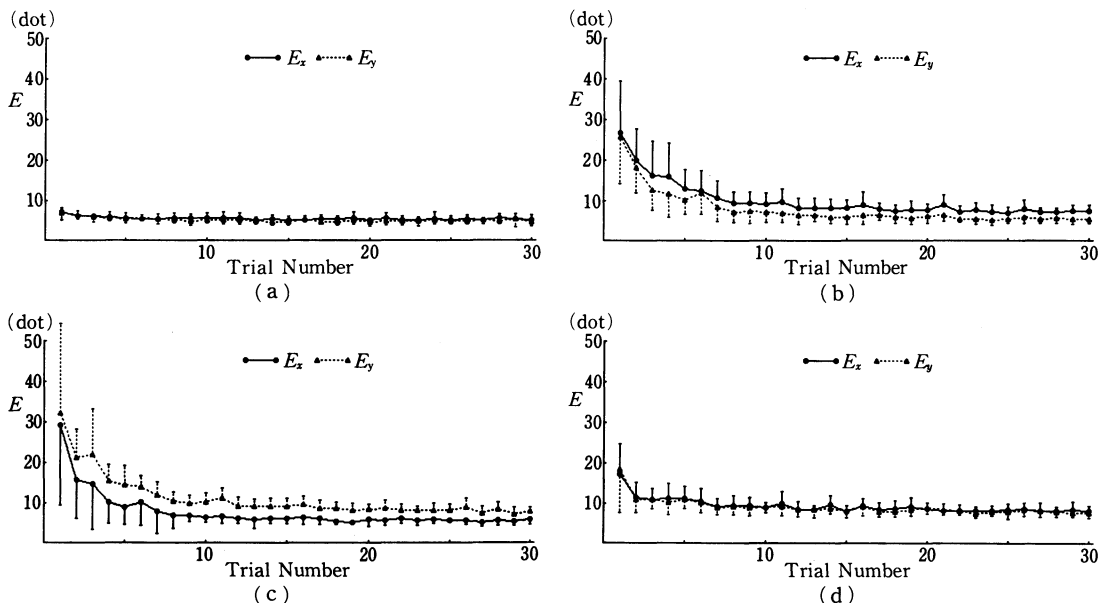


図2 試行回数による E の変化。(a) 比例要素, (b) 左右反転要素, (c) 上下反転要素, (d) 上下左右反転要素
Fig. 2 Transition of parameter E . (a) non-reversal, (b) horizontal reversal, (c) vertical reversal and (d) horizontal-vertical reversal.

が有意に大きかった場合の数である。これらの有意差検定は、各評価パラメータについて以下の7種類の比較で行った。

- I : 左右反転での左右方向と上下方向の比較
- II : 上下反転での左右方向と上下方向の比較
- III : 上下左右反転での左右方向と上下方向の比較
- IV : 左右反転での左右方向と上下反転での上下方向の比較 (反転方向どうしの比較)
- V : 左右反転での上下方向と上下反転での左右方向の比較 (非反転方向どうしの比較)
- VI : 左右反転での左右方向と上下左右反転での左右方向の比較
- VII : 上下反転での上下方向と上下左右反転での上下方向の比較

以上の比較は次のことを検討するために行った。

- I ~ III : 反転していることが各軸方向へどんな影響を与えるか、特に非反転方向への影響
- IV, V : 左右反転と上下反転では制御特性に差異、つまり異方性があるか
- VI, VII : 反転方向が1方向のみと2方向では、どのような差異があるか

これらの結果から次のことがわかった。

- (1) E のグラフ (図2) より、個人差は比例要素ではきわめて小さく、また各反転要素でも学習とともに平均値も標準偏差も小さくなり、10回程度で

ほぼ安定することがわかる。図3の D の変化をみると、学習効果は認められるが、ばらつきはあまり小さくならない。 R に関しては10回程度でほぼ0になる。

- (2) 1方向反転の場合、反転方向の各評価パラメータは非反転方向より有意に大きい。非反転方向にも反転の影響が明らかに認められる。特に R のグラフから、学習の初期では非反転方向にも逆動作がみられるが、学習とともにほとんど認められなくなる。
- (3) 反転方向どうし、および非反転方向どうしの有意差検定の結果から、左右方向と上下方向との異方性は認められない。ただし、 R と E において、学習の初期段階での反転方向と非反転方向との差は、左右反転では上下反転よりも小さく、反転方向により差異が認められる。
- (4) 2方向反転のほうが1方向反転よりも、学習の初期では評価パラメータが小さく、安定するのも早い。

4. 考察

4-1. 個人差と学習過程

今回調べた個人差は、臨床へ応用することを考える

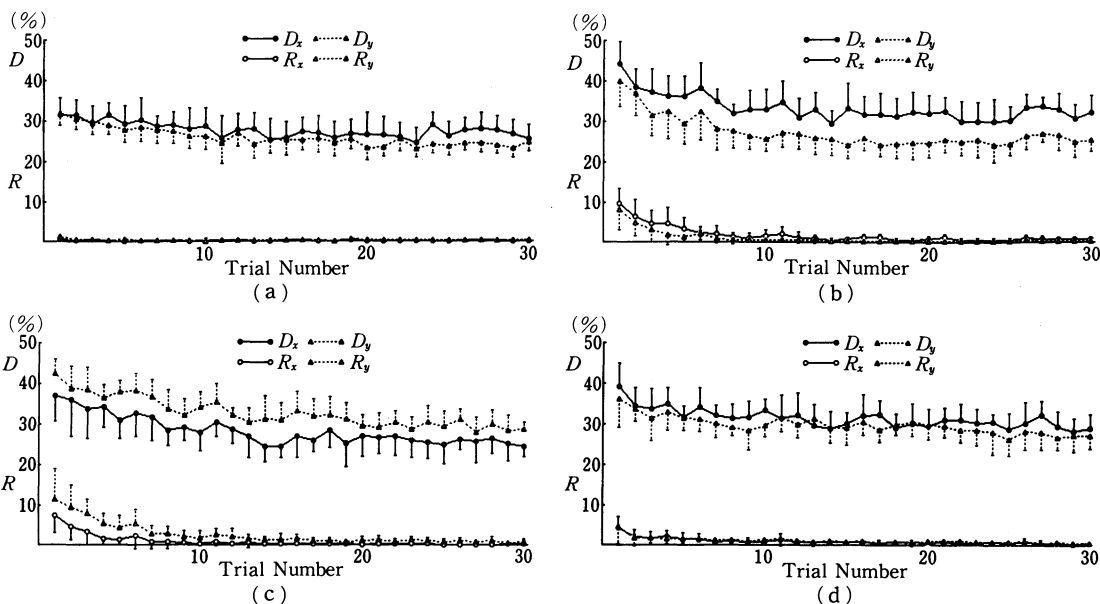


図3 試行回数による D と R の変化。(a)比例要素, (b)左右反転要素, (c)上下反転要素, (d)上下左右反転要素
Fig. 3 Transition of parameters D and R . (a)non-reversal, (b)horizontal reversal, (c)vertical reversal and (d)horizontal-vertical reversal.

と、データが個人差の範囲なのか、疾患によるものの検討に役立つと考えられる。また、各反転要素では比例要素に比べて個人差が大きかったことから、反転要素で実験を行うことは、被験者の動作特性を調べるのに有効であるといえる。

各評価パラメータの学習曲線により、マウスの操作方向とカーソルの移動方向が異なるという非日常的な課題であっても、健常者では数回の試行を行えば、逆動作と遅れ動作の割合が少なくなるというかたちで適応できることがわかった。また、特に学習過程の初期に動作の特徴が顕著にみられることから、学習過程を

調べることの重要性が指摘できる³¹⁾。なお、今後の実験は30回程度の試行で十分であることもわかった。

4-2. 非反転方向への影響

1方向のみの反転の場合、非反転方向へ影響を与えていることは明らかであるが、特に学習の初期には非反転方向でも逆動作がみられ、これが平均誤差を大きくする原因となっていると考えられる。しかし、この影響も10回程度の試行により、反転方向、非反転方向ともに、逆動作がほとんどみられなくなるというかたちで減少してしまう。

表1 有意差検定の結果

Tab.1 Results of significance test.

Comparison Type	E			D			R		
	1~10	11~20	21~30	1~10	11~20	21~30	1~10	11~20	21~30
I	1	8	10	7	10	10	2	6	7
II	7	9	10	7	9	7	9	9	10
III	—	—	1	2	1	1	—	1	1
IV	—	—	—	—	—	5	3	2	1
V	—	—	—	1	2	—	—	—	2
VI	3	—	2	4	—	2	4	—	2
VII	7	1	—	10	3	1	9	—	—

また、反転方向と非反転方向の E および R については、10 回までの左右反転ではあまり差がなく、上下反転では非反転方向が有意に小さいという結果になったのは、非反転方向への影響は左右反転のほうが大きいことを示唆する。このことは異方性に関連すると考えられる。

4-3. 異方性

吉澤らの研究²⁷⁾で明らかにされたような、左右反転のほうがより困難であるという異方性は認められなかった。その報告によれば、異方性は脳の両側性と異種感覚情報の統合に必要な視空間の変換の機能に関係しており、指標が視空間の片側に偏る場合に起こるとしている。したがって、本研究のように制御系が追従型であり、目標値が連続的に変化する場合には、あてはまらないと考えられる。つまり、ステップ信号で、しかも補償制御系の場合、被験者は大きな偏差を補償する動作をしなければならないのに対して、連続信号で追従制御系の場合は、連続的に変化する場合点をわずかな動作で追従するだけだからである。ただし、学習の初期においては、左右反転のほうが上下反転に比べて、 R と E の反転方向と非反転方向との値の差が小さいという点で差異が認められたので、これについてはさらに検討が必要である。

4-4. 1 方向反転と 2 方向反転の比較

2 方向反転のほうが学習の初期で各評価パラメータの値が小さく、安定するのも早いのは、1 方向のみに反転している場合より、概念的に取り組みやすいことを示していると考えられる。また、そのために個人差も現れにくくなっている。

4-5. 評価パラメータ

平均誤差による解析²⁷⁾は古くから行われている方法であるが、先に述べたように各軸の動作の詳細な特徴を表現することはできない。これに対して筆者の提案した方法は、平均誤差の大小の原因を遅れ動作と逆動作という動作パターンに分けて、全体の動作のなかに占める割合を求めたものであり、学習過程の詳細な分析や非反転方向への影響の検討などに役立つことがわかった。

また、このような方法は従来の伝達関数による解析方法に比べると、動作のモデル化が容易でないという欠点があるが、動作の特徴を直感的に表現しやすく、今後、臨床での評価に応用することを考えると有効であると考えられる。

なお、学習曲線に対数関数などで近似し、その係数

で難易度を表す方法も考えられるが、この場合にはパラメータの数が多くなるので、今回の研究の範囲では用いなかった。しかしながら、今後さらに詳細な分析を行うためには、そのような学習曲線の近似についても検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、健常者の上肢運動機能を調べることを目的に、二次元の上肢のトラッキング動作について、制御対象が反転要素の場合の実験を行い、評価パラメータを新しく提案して、学習過程を中心に検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 健常者の場合、反転要素に対して数回の試行で適応できるようになる。
- (2) 1 方向のみの反転では非反転方向への影響が認められる。特に学習の初期では、逆動作が非反転方向にもみられる。
- (3) 入力信号が連続で制御系が追従型の場合には、反転方向についての異方性は認められない。
- (4) 2 方向の反転のほうが 1 方向のみの反転より、学習の初期では取り組みやすい動作である。
- (5) 本論文で提案した動作パターンの割合による解析方法は、各軸方向での動作の特徴を検討するのに有効である。

以上のように、反転要素での学習過程に動作特性がより顕著に現れることがわかり、本研究の手法が有効であることが示せた。

なお、これら以外の研究課題として、他のポインティングデバイスとの比較や、異なった目標の速度とデバイスの感度での実験を実施し、現在検討を加えている。また、臨床での検査の応用として、小脳性運動失調症の患者を対象に検査を行い、その結果を発表した²⁸⁾。そして最終的には、これらの結果を総合して、上肢運動機能障害の動作特性を明らかにしたいと考えている。

謝 辞

平成元年度および 2 年度の久留米工業大学電子情報工学科の卒業研究生には、実験の実施、データの分析などに取り組んでもらいました。また、大阪大学医学部付属病院の川端秀彦助手（現在、大阪府立母子健康総合医療センター勤務）、津田勇人技官（現在、箕面市役所健康福祉部保健福祉課勤務）には、実験計画全般についてのご助言をいただきました。それぞれに謝意を表します。

なお、本研究の一部は平成 2 年度文部省科学研究費

補助金 (奨励研究A : 課題番号 02750362) によるものです。

参考文献

- 1) 塚原仲晃編：脳の情報処理, 152~156, 朝倉書店, 1984.
- 2) 伊藤正美監修：生体信号処理の基礎, 222~225, オーム社, 1985.
- 3) 井口雅一：人間-機械系, 1~13, 共立出版, 1970.
- 4) 佐藤方彦：人間工学概論, 85~94, 光生館, 1971.
- 5) 長町三生編：現代の人間工学, 89~94, 朝倉書店, 1986.
- 6) 大島正光監訳, G. Salvendy 編：ヒューマンファクター, 1003~1024, 同文書院, 1989.
- 7) 畑 四郎, 竹田晴見：手動制御系における最適制御理論適用に関する一考察, システムと制御, 21(10), 565~570, 1977.
- 8) 内藤重保, 鳩山由起夫, 野田淳彦：手動制御準定常特性の因果律的最適同定法による測定, 計測自動制御学会論文集, 18(6), 564~570, 1982.
- 9) 末長 修, 井原素三：人間の周波数依存荷重を考慮した最適制御に関する研究, 人間工学, 25(2), 109~116, 1989.
- 10) 竹田晴見, 畑 四郎：手動制御系における制御者の適応・学習過程に関する個人差表現の手法, システムと制御, 24(1), 55~61, 1980.
- 11) 末長 修, 井原素三：追跡手動制御系における微小動作の解析, 人間工学, 21(3), 125~133, 1985.
- 12) 末長 修, 井原素三：人間の制御機能からみた制御特性における個人差の解析, 人間工学, 23(6), 355~365, 1987.
- 13) 岡田 剛, 木原昌彦, 水倉幸夫：人間の操作特性の標準化, 計測自動制御学会論文集, 18(4), 329~334, 1982.
- 14) 土屋和夫, 織田守矢：人間の手動作系の伝達関数の非線形性について, 電気学会雑誌, 82(885), 915~920, 1962.
- 15) 伊藤宏司, 伊藤正美：人間の安定化動作における学習過程と非線形性について, 電気学会論文集, Vol. 96-C, No. 5, 109~115, 1976.
- 16) 高谷昌昭, 千原国宏, 桜井良文：手動制御系における非線形動作に関する一考察, システムと制御, 22(7), 437~443, 1978.
- 17) 伊藤宏司, 竹内 章, 伊藤正美：手動制御系における人間の速度可変予見追従機能, 計測自動制御学会論文集, 14(2), 149~154, 1978.
- 18) 井上和夫, 荒木義彦, 澤田友宏, 三ツ井秀樹：視覚・聴覚併用表示による手動制御系の制御特性について, システムと制御, 21(12), 686~693, 1977.
- 19) 山下利之：手動制御系における予覚動作の解析, 人間工学, 24(1), 53~59, 1988.
- 20) 大倉元宏, 窪田 悟：簡単なポジショニングタスクにおけるライトペンとマウスの比較, 人間工学, 23(5), 311~324, 1987.
- 21) 行待武生, 岡田有策：インテュ操作による手動制御の研究, 人間工学, 25(1), 1~9, 1989.
- 22) 辺見一男, 井上和夫：感圧特性を有するカーソルキーによるポインティング動作, システム制御情報学会論文誌, 2(9), 301~305, 1989.
- 23) K. Hemmi, K. Inoue and K. Kamei : A Model of Human Behavior in Two-Dimensional Pursuit Control System, 10th IFAC World Congress Munich, 315~320, 1987.
- 24) P. Viviani and P. Mounoud : Perceptuomotor Compatibility in Pursuit Tracking of Two-Dimensional Movements, Journal of Motor Behavior, 22(3), 407~443, 1990.
- 25) 浅賀忠義, 松本昭久：上肢協調性運動の定量的評価の試み, 理学療法ジャーナル, 23(2), 129~134, 1989.
- 26) S. Kobori, H. Tsuda, A. Tokimasa and K. Abe : Evaluation of Upper Limb Motor Function by means of Tracking Motion on Reversal Element, The Transaction of the IEICE, Vol. E 74, No. 5, 1047~1050, 1991.
- 27) 吉澤 誠, 二坂広美, 竹田 宏, 大友 仁, 鴻巣 武, 佐藤 元, 大坂和久：人間オペレータの制御特性の異方性と脳の両側性, 医用電子と生体工学, 26(4), 187~195, 1988.
- 28) 小堀 聡：上肢トラッキング動作の反転要素における学習過程, 人間工学, 26(Suppl.), 122~123, 1990.
- 29) 小堀 聡：制御対象が反転要素の場合の上肢トラッキング動作の解析, 久留米工業大学知能工学研究所報告, Vol. 3, 61~68, 1990.
- 30) 真辺春蔵, 長町三生編：人間工学概論, 135~142, 朝倉書店, 1968.
- 31) 吉田義之：基礎人間工学, 96~131, コロナ社, 1977.