

1608 テレイグジスタンスの研究 第23報

－作業用頭部運動追従型ディスプレイの開発－
機械技術研究所 ○前田太郎, 館 暉

Study on Tele-existence(XXIII)

- Development of a head-linked display for manipulation -
Mechanical Engineering Laboratory ○Taro Maeda, Susumu Tachi

1. はじめに

テレイグジスタンスによる遠隔作業において、マスター操作を行っているオペレータに対してスレーブ装置側の環境および状態を提示するにあたっては、主として臨場感の高い視覚情報を用いる。この視覚フィードバックは、テレイグジスタンスに用いられるヒューマンインターフェイスにおいて最も重要な提示系であり、これには十分に広い視野と高い臨場感が要求される。

このような系として我々が提案してきたのが頭部運動の実時間測定による頭部運動追従型の立体視覚提示装置である。

今回、作業実験用のシステムを構築するにあたり、より作業実験に適した提示装置を設計・試作した。また、この装置を用いた追従実験を行い、その動特性を調べた。

2. 頭部運動追従型ディスプレイの試作

第19報より試作1号機をFig.1に示す¹⁾。総重量5.5Kg, 4inchインチウッドロッ管を2台用いている。

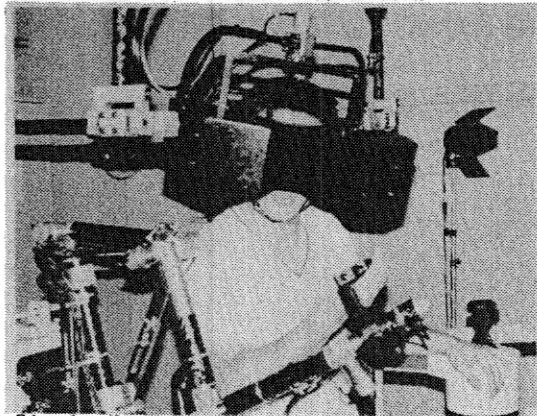


Fig.1 Head-linked Display
Prototype Mk.1

この提示系を用いてマスタスレーブ系を構成し作業実験を行った結果、つぎのような問題点が明らかになった。

- 1) 作業によっては視野の狭さが気になる。
- 2) 手による補助なしでの素早い動きが困難。
- 3) 長時間の連続使用の際にレンズが曇る。

1)は作業用ということで画素数の関係から水平方向の解像度を視力換算で0.3*を確保したため、視野角が33°に設定されているためである。作業対象が動いているものの場合、2)の条件とあいまって追従が困難になった。

ここに正確な作業を行うためにはテレイグジスタンス系において吸収しきれなかった感覚量の個人差を補正するために、自分の腕の位置（テレイグジスタンス状態においてはスレーブアームの位置）をしばしば確認する必要がある。作業のために手が塞がっている場合、頭部の運動に際して手による補助は期待できないため、この追従性は作業効率に大きく影響すると考えられる。

* 換算視力 = $1/(1\text{画素あたりの視野角[min]})$

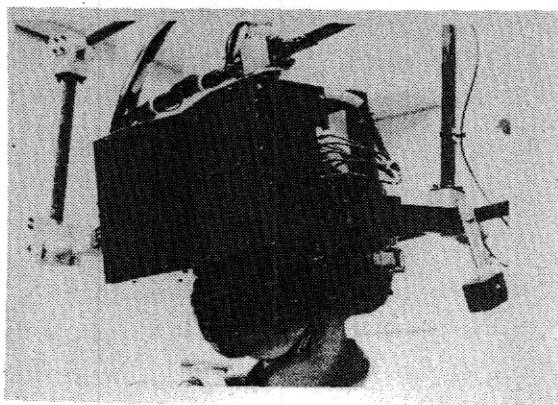


Fig.2 Head-linked Display
Prototype Mk.2

このため作業時の提示系には従来の移動時の提示系以上に動特性が要求されることが分かった。

1)についてはより解像度の高いディスプレイを用いて視野角を広げることによって、2)については提示系の慣性モーメントを小さくし、頭部への固定法をより密着性の高いものに変更することによって改善することが考えられる。また3)についても、系のフィードバックを視覚に頼っている以上、作業用提示系として連続作業の妨げとなる要素を除去する必要がある。

以上の問題点を考慮して二号機を試作した。Fig.2にこれを示す。手による補助なしで素速い動きが可能なように頭部への固定法としてヘルメットを用いている。Fig.3に構造を示す。

着脱機構によりヘルメットを交換することでサイズの変化にも対応できる。このため総重量は5.5kg(内ヘルメット1.4kg)となり軽量化は図れなかったが各部を頭部により密着した

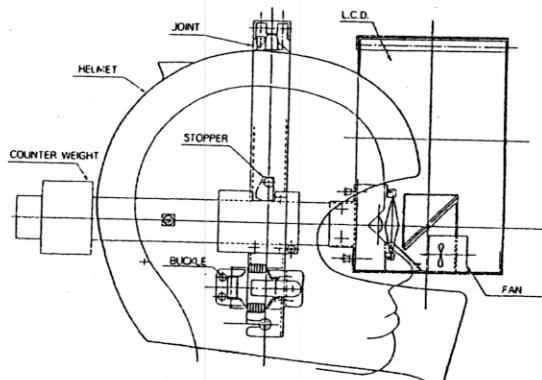


Fig. 3 Visual display design

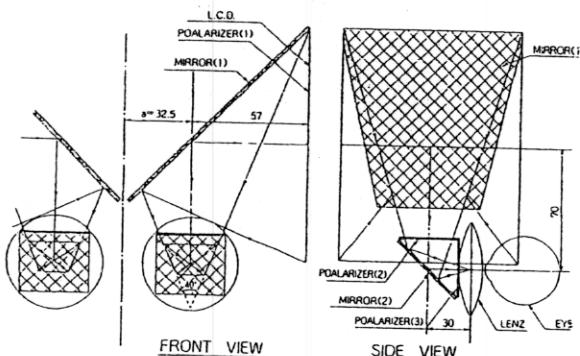


Fig. 4 Viewer design

構成にすることにより、慣性モーメントを小さく抑えている。

液晶ディスプレイには6inch(H720×V240 dot)の素子を用いた。また、2枚のミラーによって光路を立体的に構成することによりLCDを縦に配置し、コンパクトな光学系を構成した(Fig.4)。これによって作業時に必要となる顔前方の空間を確保することができる。また1号機同様、接眼レンズは焦点調節による立体視上の制約を避ける為ディスプレイ面の虚像提示距離が1mになるように設定し、不要な鏡像は偏光板によって視界から除去している。眼間距離は65mm、視野角は単眼40°、解像度は視力換算で0.3である。またレンズの曇り防止の為に送風ファンを内蔵した。これによって長時間の連続着用の際にも視界が悪化することは無くなった。

3. 追従実験

追従実験シミュレータとして第12報で紹介した実験方法を用いる。この実験は立体知覚についての評価を行うものではなく、頭部運動追従型の視覚提示系としての操作特性について評価を行うためのものである。

この追従実験において想定した状況をFig.5に示す。これは頭部運動に追従するスレーブ系としてパン・ティルトの2自由度を持つカメラ系を持ち、これに対した平面上を動き回る視標Bをカメラ視野中心に固定された視標Aで追従するもので、平面上には格子状の背景が表示される。この背景の有無はオペレータを含む実験系の制御構造において違いをもたらし(Fig.6)、追従特性を変化させることができられている²⁾。

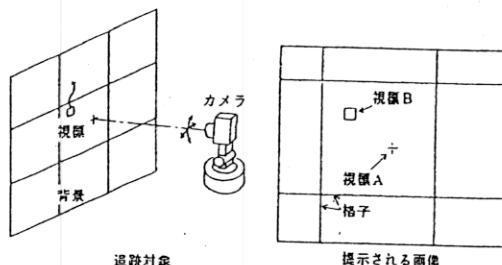


Fig. 5 Model of Tracking Simulation

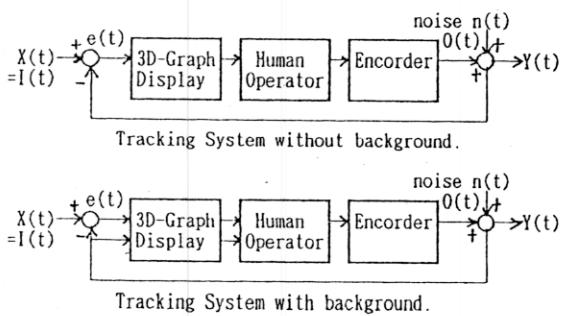


Fig. 6 Block Diagram of Tracking Simulation System

視標Bの動き $X(t)$ は(1)式のような正弦波の組合せによる疑似ランダム信号を用いる。各周波数成分の振幅は周波数に反比例し、各周波数成分のエネルギー及び速度振幅は一定となっている。

$$X(t) = \sum a_n p^{-n} \sin(\omega_n p^n t + \phi_n) \\ (p=1.25, n=17, \omega_n = 0.0222 \text{ Hz}, \phi_n \text{ は乱数})$$

... (1)

また、提示にはダブルバッファリングを用い、提示及びサンプリングの周期は44msである。

ここで評価すべきオペレータを含んだ提示・操作系の開ループ特性 $G(f)$ は、系の入出力の信号のクロススペクトルを用いて開ループ特性 $T(f)$ を求めることにより(2)式のように表せる³⁾。

$$T(f) = \Phi_{xy} / \Phi_{xx} \\ = E[I(f) * \{O(f) + N(f)\}] / E[I(f) * I(f)] \\ = E[I(f) * O(f)] / E[I(f) * I(f)] \\ = O(f) / I(f).$$

$$G(f) = T(f) / \{1 - T(f)\} \quad \dots (2)$$

プログラム上では1024点のサンプリング結果のFourier変換を $I(f)$, $O(f) + N(f)$ とし、これのアンサンブル平均を Φ_{xy} , Φ_{xx} とする。

さらに $G(f)$ の評価としてここではヒューマンオペレータの特性モデルであるMcRuerのクロスオーバーモデル

$$G'(f) = f_c \exp(-j2\pi f t_d) / jf \quad \dots (3)$$

を用いて解析し、クロスオーバー周波数 f_c と等価時間遅れ t_d によってその特性を評価する。

この実験方法に基づき、頭部運動追従型視

覚提示装置1号機、2号機（以下L1, L2と呼称）及び、比較対象として第14報における頭部装着型提示装置2号機(Fig. 7, 重量0.6kg, 視野角60°, 視力換算解像度0.1)⁴⁾（以下M2と呼称）を探り上げ、動特性の比較を行う。



Fig. 7 Head-mounted Display Prototype
Mk.2

4. 実験結果

実験の結果得られた周波数特性と最小二乗法によるクロスオーバーモデルへのあてはめの例をFig. 8に示す。このようにして得られたクロスオーバー周波数 f_c と等価時間遅れ t_d を各装置間で比較してみる。結果をTable. 1 及びFig. 9に示す。 f_c については、 $L_1 < L_2 < M_2$, t_d については、 $L_1 > L_2 > M_2$ という傾向が見てとれる。このことから慣性モーメントの軽減及び視野角の拡大が、 f_c を増加させ t_d を減少させて動特性を向上させている要因となっていることが分かる。また、背景の表示は f_c と t_d の双方を増加させる傾向がみられる。

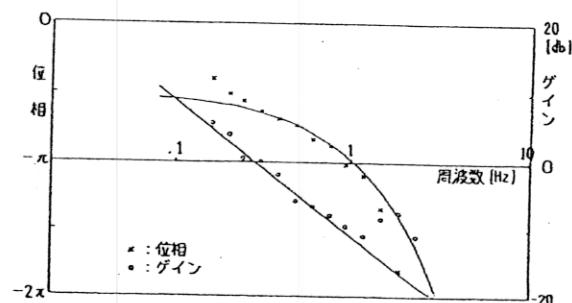


Fig. 8 Frequency Response.

Device	back	fc[Hz]	t d[s]
L 1	on	0.3090	0.2802
	off	0.3042	0.2627
L 2	on	0.4033	0.2673
	off	0.3613	0.2420
M 2	on	0.4272	0.2567
	off	0.3762	0.2067

Table.1 Dynamic Responses

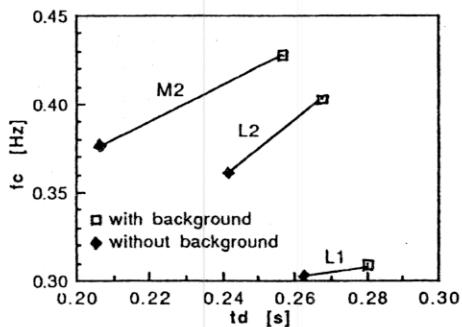


Fig.9 Performance of Devices.

5. 考察

クロスオーバーモデルにおいて f_c は $G(f)$ のゲインを、 t_d は等価時間遅れを決定する要素であり、独立な関数の積の形で表わせる。

$$G(f) = \exp(-j2\pi(t_d f + 0.25)) \times \{f_c/f\}$$

$$= P(f) \times M(f)$$

$$\angle G(f) = \angle P(f), |G(f)| = M(f) \dots (4)$$

$G(f)$ がヒューマンオペレータの動特性のモデルであることを考えると、 t_d 及び $P(f)$ は知覚特性、 f_c 及び $M(f)$ は操作特性を代表していると考えられる。

この考え方に基づくと各装置の周波数特性に係わっていると思われる要素を次の様にまとめることができる。

E [追従特性]

- = O [オペレータの基本的追従特性]
- + P [慣性モーメントによる操作負荷の増加]
- + Q [視野角の制限による知覚特性の低下]
- + R [背景表示による操作特性の向上]
- + S [背景表示による知覚負荷の増加]

これらの要素から(4)式のクロスオーバーモデルを(5)式の様にモデル化することができる。

$$G(f) = P(f) \times M(f)$$

$$= -j\exp(-j2\pi f t_d) \times \{f_c/f\}$$

(in case of tracking with background)

$$= -j\exp(-j2\pi f(t_0 + t_d + t_s)) \times \{f_c K_p K_o / f\}$$

(in case of tracking without background)

$$= -j\exp(-j2\pi f(t_0 + t_d)) \times \{f_c K_p / f\} \dots (5)$$

そこで最も操作負荷が小さく、視野角の大きい装置M 2における背景無しの追従特性を基準の特性として、このモデルに基づき各定数を求めるとき、Table.2のようになる。

Device	k p	t q[s]	k r	t s[s]
L 1	.821	.0560	1.02	.0175
L 2	.961	.0353	1.12	.0253
M 2	1.00	.0000	1.14	.0500

$$(t_0 = 0.2067s, f_0 = 0.3762Hz)$$

Table.2 Comparison among Tracking Schemes.

6. まとめ

作業用テレイグジスタンスシステムのための頭部運動追従型の立体視覚提示装置を設計・試作した。また、この装置を用いた追従実験を行いその動特性を調べた。さらに、従来の装置による実験結果と比較することでその動特性を左右する要因を考察した。

参考文献

- 1)館ほか:テレイグジスタンスの研究
第19報、第7回日本学会学術講演会予稿集、pp.55/58
- 2)荒井ほか:テレイグジスタンスの研究
第12報、第5回日本学会学術講演会予稿集、pp.97/98
- 3)前田ほか:テレイグジスタンスの研究
第11報、第5回日本学会学術講演会予稿集、pp.95/96
- 4)前田ほか:テレイグジスタンスの研究
第14報、第27回SICE学術講演会予稿集、pp.251/252