

# DD モータを用いた 力補助型可動 CRT ディスプレイ装置の開発

荒井 裕彦\* 館 暲\* 宮島 勇\*

本報告ではDDモータを用いた、遠隔操作用の力補助型可動 CRT ディスプレイ装置について述べる。この装置は、操作者の首の力によってディスプレイの方向を制御する際に、内部フィードバックを用いてディスプレイの慣性を補償し、操作者の負担を軽減するものである。バネ要素を考慮することによって、ディスプレイ慣性の約 50% を補償することができた。

## 1. はじめに

ロボットの遠隔操作において、作業能率を向上させるためには、作業環境の状況を的確に操作者に伝達することが必要である。十分に広い視野と高い臨場感をもった視覚情報を操作者に与えるための方法として、我々は操作者の頭部運動を実時間計測し、それに連動して制御されたTVカメラから得られた画像を操作者に常時提示する方式を提案してきた<sup>1)</sup>。これは操作者が見たい方向を向くとカメラも同一方向を向いて、カメラの位置に人がいた時見える情景に相当する画像が操作者に提示されるというシステムである。

このシステムの構成要素として、操作者の頭部運動を計測すると同時に操作者の顔の前に常にディスプレイを支持しておく装置が必要となる。最初に試作した装置は、ディスプレイと一体となったゴニオメータを操作者が首の力で動かすものだった。この装置においては、ディスプレイに作用する慣性力を操作者がすべて負担することになる。ディスプレイの質量(モノクロ CRT 6kg, カラー CRT 10kg)のため、ディスプレイを回したり止めたりするにはかなり首の力が必要であり、素早い動きはできなかった。

次にディスプレイを支えるマニピュレータとゴニオメータとを分離し、マスタスレーブ方式でディスプレイの位置を制御する方法<sup>2)</sup>を試みた。しかしこの方法では頭部とディスプレイとの位置関係に不自然さが残る場合があった。

そこで再び操作者の首の力によってディスプレイの方向を制御しながらも、DDモータを用いて慣性を補償し、

見かけ上のディスプレイ質量を軽減するシステムを開発した。本報告では、この力補助型可動CRTディスプレイ装置の構成と制御について述べる。

## 2. ディスプレイ装置の構造

ディスプレイ本体は、1.5in カラー CRT を2台内蔵し、両眼立体視が可能である。レンズ系・輻射角調整機構を合わせて全重量は 4.6kg である。ディスプレイの動きは水平回転の1自由度で、操作者が頭を左右に振ってもディスプレイが常に顔の前に位置するように、アームの先にディスプレイが取り付けられている。このアームをDDモータによって駆動する。ディスプレイ重心の回転半径は 0.24m である (Fig. 1)。接頭部は顔にフィットするような形状になっており、スポンジのクッションが張ってある。Fig. 2 のようにベルトを用いてディスプレイを頭部に固定する。

## 3. 力補助の方法

操作者の力を補助する方法としては、まずディスプレイと頭部との間に歪ゲージ等の外部力覚センサを設けて操作力を検出し、それに基づいて能動的に力補助を行う

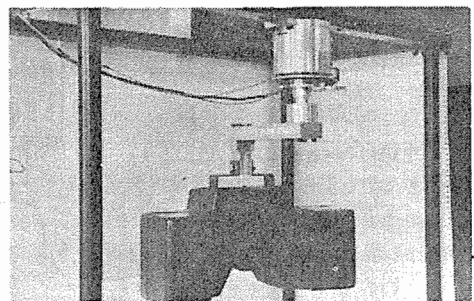


Fig. 1 Power-assisted CRT display

原稿受付 1986年8月12日

\* 機械技術研究所ロボティクス部

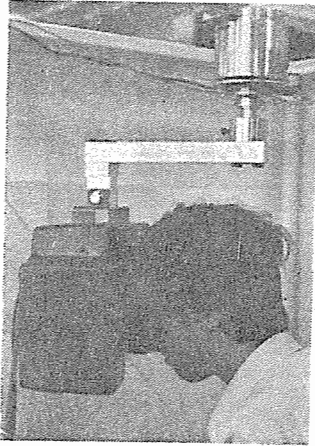


Fig. 2 Operator and display

方法が考えられる。この方法は感度の点では優れているが、モータの制御系他に力覚センサ信号系を付け加える必要があること、アーム中間での干渉等が検出できないこと等の問題がある。そこで本装置では特別の力覚センサを用いず、DDモータと関節の回転を検出する回転センサとの組み合わせのみで力補助を行う方法<sup>3)</sup>を採用した。

DDモータを用いた場合、アームと回転センサとの間に減速器によるバックラッシュ・バネ・摩擦等の要素が入らないため、アームの回転がそのまま回転センサに伝わり、アームの角速度・角加速度等を正しく知ることができる。またアームに加わるトルクはモータ電流によって正確に制御できるから、フィードバックによって慣性力・摩擦力等を補償し、操作者の力を補助することが可能である。

系の運動方程式は、

$$k_t I + T_0 = J\theta s^2 + F_b \theta s + F_c \quad (1)$$

と表わされる。ただし $\theta$ はモータ回転角、 $I$ はモータ電流、 $k_t$ はモータトルク定数、 $T_0$ は操作力トルク、 $J$ は慣性モーメント、 $F_b$ は粘性摩擦係数、 $F_c$ はクーロン摩擦トルクを表わす。

(1)式において、

$$I = (\alpha J \theta s^2 + \beta F_b \theta s + \gamma F_c) / k_t \quad (2)$$

$$(0 < \alpha, \beta, \gamma < 1)$$

とおけば、

$$T_0 = (1 - \alpha) J \theta s^2 + (1 - \beta) F_b \theta s + (1 - \gamma) F_c \quad (3)$$

となり、あたかも慣性力、粘性摩擦、クーロン摩擦がそれぞれ $(1 - \alpha)$ 倍、 $(1 - \beta)$ 倍、 $(1 - \gamma)$ 倍になったかのような効果が得られる。Fig. 3にブロック線図を示す。

ただし本装置においては、摩擦と比較し

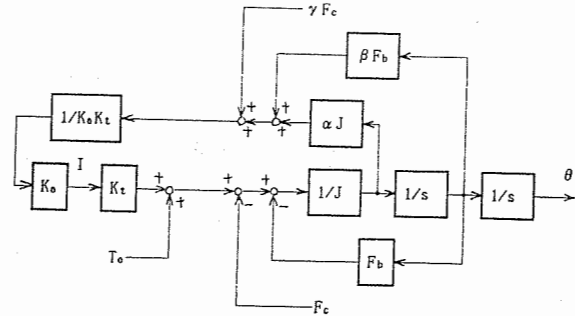


Fig. 3 Active power assistance system

て慣性力が著しく大きいため、 $\beta = \gamma = 0$  において摩擦補償を省き、慣性力のみを補償する。

#### 4. 装置の構成

本装置のハードウェア構成を Fig. 4 に示す。角度センサとしては、1,800 パルス/回転のロータリーエンコーダの出力を4通倍して7,200 パルス/回転として用いている。16bit アップダウンカウンタにおける角度の値を位置アナログ信号値に換算し、D/A コンバータを通してカメラのサーボ系に送っている。

角速度信号を得るための方法としては、タコジェネレータを用いた。アナログ微分回路を用いて角加速度信号を得ている。ノイズをカットするために信号をローパスフィルタに通し、サーボアンプに入力する。サーボアンプは電流制御を行っている。

力補助に用いたDDモータの諸元を Table 1 に示す。

#### 5. 実験

はじめに 3. において述べた制御系をそのまま用いたところ、慣性力の補償ゲイン $\alpha$ を約0.1まで上げた時点で発振が生じた。これはディスプレイをアームに取り付ける部分の剛性が不足していたため、それがバネ要素として作用したからである。実際にその部分を中心に振動が

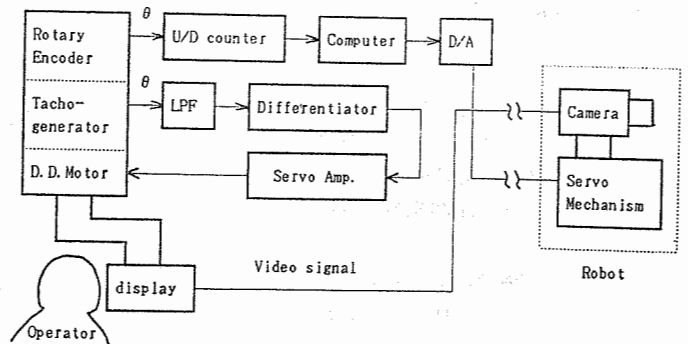


Fig. 4 Control system of power-assisted display

Table 1 Specifications of D. D. motor

|                          |                                                |
|--------------------------|------------------------------------------------|
| Motor Diameter           | $9.48 \times 10^{-2} \text{m}$                 |
| Motor Weight             | $9.07 \times 10^{-1} \text{kg}$                |
| Peak Torque $T_p$        | $3.4 \text{N} \cdot \text{m}$                  |
| Peak Current $I_p$       | $5.6 \text{A}$                                 |
| Torque Sensitivity $k_t$ | $6.1 \times 10^{-1} \text{N} \cdot \text{m/A}$ |

生じていることが観察された。

そこでモータ及び回転センサと慣性負荷との間のバネ要素を考慮したモデル<sup>4)</sup>を考える(Fig. 5)。モータの回転角を  $\theta_1$ 、慣性負荷の回転角を  $\theta_2$ 、モータトルクを  $T_m$ 、負荷に加わる操作力トルクを  $T_0$  とおくと、

$$\begin{cases} T_m = K(\theta_1 - \theta_2) \\ T_m + T_0 = J\theta_2 s^2 \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $J$  は慣性モーメント、 $K$  はバネ定数を表わす。ここで(2)式にしたがって、 $T_m = \alpha J\theta_1 s^2$  とおくと、

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\alpha J s^2 - K}{\alpha J^2 s^2 - (1 - \alpha) JK} T_0 \quad (5)$$

$0 < \alpha < 1$  より、伝達関数の特性根の一方の実部が正となるため、系は不安定になる。

そこで、トルクフィードバックを、

$$T_m = \alpha JK\theta_1 s^2 / (J's^2 + B_s + K') \quad (6)$$

に変えると、

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{(J' - \alpha J)s^2 + Bs + K'}{J\{(J' - \alpha J)s^2 + Bs + K' - \alpha K\}} T_0 \quad (7)$$

という2次系の伝達関数が得られる。この系は、

$$J' - \alpha J > 0, K' - \alpha K > 0, B > 0 \quad (8)$$

という条件の下で安定となる。その場合  $T_0$  としてステップ入力を与えると、 $\ddot{\theta}_2 \rightarrow K' T_0 / J(K' - \alpha K)$  に収束する。すなわち負荷の慣性モーメントは見かけ上  $(K' - \alpha K)/K'$  倍になる。また固有振動数  $\omega_n$ 、減衰係数  $\zeta$  は、

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{(K' - \alpha K) / (J' - \alpha J)} \\ \zeta = B / \{2\sqrt{(J' - \alpha J)(K' - \alpha K)}\} \end{cases} \quad (9)$$

である。非振動的応答を得るには、 $\zeta > 1$  より、

$$B > 2\sqrt{(J' - \alpha J)(K' - \alpha K)} \quad (10)$$

とすればよい。

サーボアンプに一定振幅の正弦波信号を入力し、タコジェネレータ信号の周波数応答を調べた結果、16.7Hz及び530Hzにおいて共振が観察された。これはバネ要

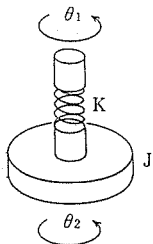


Fig. 5 Model of elastic coupling

素として作用する部分が1カ所だけでなく、高次の振動モードが存在することを示す。

530Hzにおける共振はFig. 4のローパスフィルタ(160Hz)によって除去できる。また、16.7Hzにおける共振を除去するため、Fig. 4の微分器を、(6)式をもとにした伝達関数  $\alpha JKs / (J's^2 + Bs + K')k_t$  の2次フィルタに置き換えた。フィルタのパラメータ  $J', K', B, \alpha$  は、(8)、(10)式を満たしつつ、できるだけ補償ゲイン  $\alpha K/K'$  が大きくなるように選ぶ。フィルタは、 $K'/J', B/J', \alpha$  の3つのパラメータを可変抵抗で変えられるようにアナログ回路で構成した。実際の応答を調べながら、応答が安定でかつ慣性補償の効果が強く現われるように各パラメータを調整した。

以上の結果、ディスプレイによる慣性負荷の約50%を安定に補償することが可能になった。現在パイプ製のモータ取付枠の剛性がやや不足しており、補償ゲインをこれ以上に上げると枠が歪んで振動が生ずる。この振動は枠を押えていれば発生しないので、枠の剛性を上げればさらにゲインを大きくすることができる。

Fig. 6に、ディスプレイに外から力を加えて動かした時のモータの回転角とそれに伴ってモータで発生する補助トルクを示す。ディスプレイを動かすはじめる時、また止める時、それぞれ外からの力を助けるトルクが発生していることがわかる。

またディスプレイを装着して首の力で動かしてみると、補償なしの場合と比較して慣性による反力が軽く感じられ、負担軽減の効果が確認された。特にディスプレイを素早く左右に動かした時の違いが顕著である。ただし慣性補償が50%にとどまっているため約2kgの慣性負荷が残っており、拘束感をさらに少なくするためには補償ゲインをより高くすることが望ましい。

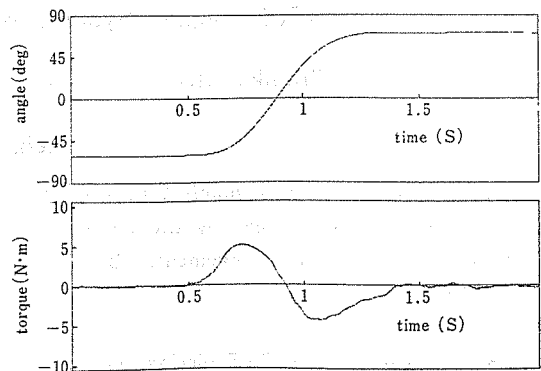


Fig. 6 Torque output for power-assistance

## 6. ま と め

本報告では遠隔操作用の力補助型可動ディスプレイ装置について述べた。本装置は操作者の力によってディスプレイの方向を制御する際に、DDモータによってディスプレイの慣性を補償し、操作者の負担を軽減するものである。バネ要素を考慮することによって、ディスプレイ慣性の約50%を補償することができた。

今後の展開としては、モータ取付枠の剛性を高めて補償ゲインをさらに大きくするとともに、ディスプレイの動きを多自由度化したモデルへの適用を試みる予定である。

最後に、日頃御支援頂いている機械技術研究所阿部稔

ロボティクス部長と遠隔制御課、感覚機構課諸氏に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 館ほか, "テレグジスタンスの研究 第1報", 第21回 SICE 学術講演会予稿集, pp.167-169, 1982.
- 2) S. Tachi and H. Arai, "Study on tele-existence (II) —Three-dimensional color display with sensation of presence—", Proc. of '85 ICAR, pp.345-352, 1985.
- 3) 荒井・館, "直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助", 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.3, pp.209-219, 1986.
- 4) 末広・高瀬, "ダイレクトドライブマニピュレータのサーボ剛性の2次フィルタによる改善", 第24回 SICE 学術講演会予稿集, pp.297-298, 1985.



荒井裕彦 (Hirohiko ARAI)

昭和34年7月9日生まれ。昭和57年3月東京大学工学部計数工学科卒業。同4月本田技研工業(株)入社。昭和59年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボティクス部遠隔制御課。計測自動制御学会会員。(日本ロボット学会正会員)



館 暉 (Susumu TACHI)

昭和21年1月1日生れ。昭和43年東京大学工学部計数工学科卒業。48年同大学院博士課程修了。工学博士。48年東京大学助手。50年通産省機械技術研究所研究員、主任研究官を経て、現在ロボティクス部遠隔制御課長。バイスペクトルを用いる統計的信号処理、電気刺激による情報伝達、盲導犬ロボット、テレグジスタンスなどの研究を行う。54年～55年、マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員。55年IEEE/EMBS論文賞受賞。計測自動制御学会、日本ME学会、バイオメカニズム学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



宮島 勇 (Isamu MIYAJIMA)

大正15年11月7日生まれ。昭和16年3月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在ロボティクス部感覚機構課主任研究官。

## Development of Power-assisted Mobile CRT Display System using a Direct Drive Motor\*

Hirohiko ARAI\*\* Susumu TACHI\*\* Isamu MIYAJIMA\*\*

### ABSTRACT

This report describes a mobile CRT display system for remote operation. The system compensates inertia of the CRT display by the method of internal feedback and helps the operator manipulate the display by his head movement. By considering elasticity, it can compensate about 50% inertia of CRT.

**Key words :** Mobile CRT display system, Active power assistance, Inertia compensation, Direct-drive motor.

\* Received August 12, 1986

\*\* Robotics Department, Mechanical Engineering Laboratory