

力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究

久富 茂樹 千原 健司 山田 宏尚* 武藤 高義*

Research on a Force Feedback Remote Control System

Shigeki Kudomi Kenji Chihara Hironao Yamada* Takayoshi Muto*

あらまし 研磨作業のような作業者の力感覚が必要な作業を遠隔で行うためには、操作者に作業反力（力覚）を提示することが重要となる。このような機能を持つ装置として、著者らはこれまでに、大パワー、高剛性といった特長を有する油圧アクチュエータを用いたパラレルリンク型力覚ディスプレイを開発してきた。しかしながら、各油圧シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれの要因によって十分な操作感覚が得られていなかった。そこで、本報では、(1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御、(2) 位置目標値を生成し、位置フィードバックを行う制御の2種類の制御法を適用し、この問題の解決を試みた。その結果、両制御法ともほぼ同程度に各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償し、力覚ディスプレイの操作性を改善することができた。

キーワード 油圧システム, 力覚, パラレルリンク, 研磨, 外乱オブザーバ

1. まえがき

各種製造業の生産工程では、多様な自動機械が導入されたことにより、生産の合理化・効率化の進展が著しい。しかしながら、研磨、塗装、検査などの工程においては、作業者の高度な熟練と経験を必要とすることから、作業の自動化は一部の専用機を除いて進んでいないのが現状である。また、これらの工程の多くは、粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから、いわゆる3K（きつい、きたない、きけん）に関わる問題も抱いている。これらの諸課題を解決するには、作業者を作業現場から隔離する遠隔操作技術を導入することが有効であると考えられる。そこで、本研究では研磨作業を対象とした遠隔作業システムの開発を目的とする。

研磨作業のような作業者の力感覚が必要な作業を遠隔で行うためには、マスタ装置（作業者が操作する装置）は入力・指示機能の他に、作業によって生じる力を作業者に提示する機能が必要となる。このようなマスタ装置として、これまでに著者らは図1に示すような油圧式パラレルリンク型力覚ディスプレイを開発してきた[1]。本力覚ディスプレイは、アクチュエータに油圧シリンダを用いることにより大きな力の提示が可能で、かつ剛性を高くすることができる。さらに、パラレルリンク機構を採用したことから、可動範囲はやや小さくなるものの比較的簡単な構造で6自由度の動作が実現できるといった

特長を有している。

しかしながら、開発した力覚ディスプレイには各油圧シリンダの動特性が異なるため動作速度が同一ではないという問題や制御弁における中立点のずれ（通常、制御弁が中立の状態にある時、作動油の流出は停止されるが、中立位置がずれると、作動油の流出が生じる）のためピストンの位置が固定されないという問題があり、十分な操作感覚が得られていない[2]。

そこで本報では、力センサの信号に基づき開ループで駆動させていたこれまでの制御法を改め、次の2種類の手法を適用することによりこの問題の解決を試みる。

(1) 各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれを外乱として捉え、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御系を構成する。

(2) 力センサの信号から位置目標値を生成し、位置フィードバックを行う。

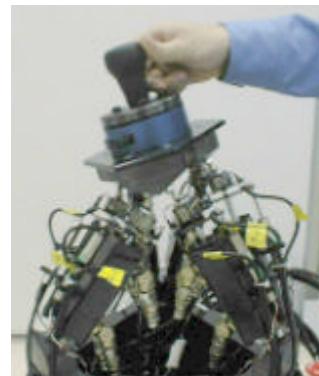


図1 パラレルリンク型力覚ディスプレイ
Fig.1 Parallel link type hydraulic force-display

*岐阜大学工学部機械システム工学科
Department of Mechanical and Systems Engineering,
Gifu University

2. 力覚ディスプレイの操作性の改善

2.1 従来の制御法

油圧サーボ系を力覚ディスプレイに用いる際に生じるバックドライバリティ性の問題を解決するために、著者らは先に図2に示すような力センサに基づくシステムの駆動法を提案した[1]。しかしながら、この手法は位置に関する閉ループを欠いているため、各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれ等の影響が直接油圧シリンダの動きに現れてしまうという問題がある。例えば、エンドエフェクタの姿勢を保ったまま真っ直ぐ上方に駆動しようとする場合でも各シリンダ速度が一定でないためにエンドエフェクタが傾いたり、力を加えない状態では各ピストンはその状態で停止すべきところ、位置がドリフトしたりする。そこでこれらの問題を解決するために次の2種類の手法を検討した。

2.2 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御

本法は、各シリンダの動特性の違いや制御弁の中立点ずれ等の要因を外乱として外乱オブザーバにより推定し、その推定量を制御入力から差し引くことにより6本すべてのシリンダの特性を理想モデルの特性に一致させる手法である。

外乱オブザーバを設計するにあたり、最初に油圧システムの理想モデルを求める。ここで、油圧システムに関して次のように仮定する。

(仮定1) 制御弁とアンプは比例要素として扱う。

(仮定2) 油の圧縮性は無視する。

この仮定により油圧システムは2次遅れ系で近似でき、システムの状態方程式は式(1)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 u(t) \\ y(t) &= C_0 x(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

$$x(t) = [x_{pt}(t) \quad \dot{x}_{pt}(t)]^T$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad C_0 = [1 \quad 0]$$

ただし、

$$C_1 = -\frac{c_p + A_p^2 K_p}{M}, \quad C_2 = \frac{K_p K_x K_v A_p}{M}$$

x_{pt} : ピストン変位, \dot{x}_{pt} : ピストン速度, A_p : ピストン

受圧面積, c_p : ピストン粘性減衰係数, K_v : 制御弁ゲイン, K_p : 圧力流量係数, K_x : 流量ゲイン, M : ピストンの負荷質量である。

実際のシステムを理想モデルに外乱 ($d_i(t)$) が重畳したものと見なすと、システムの状態方程式は以下の方

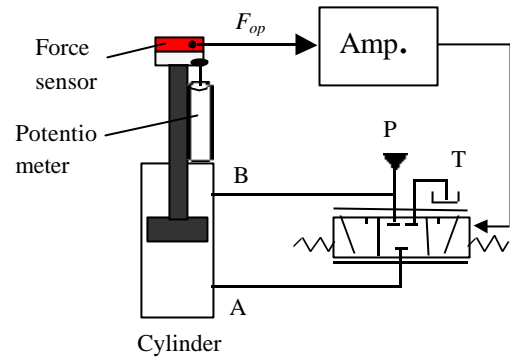


図2 力センサに基づくシリンダ駆動

Fig.2 Driving method by manual force

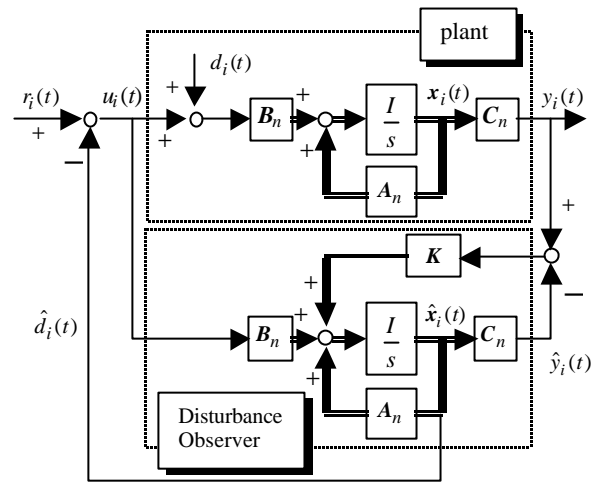


図3 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御

Fig.3 Block diagram of system with disturbance observer compensation

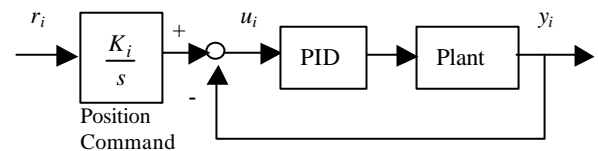


図4 位置フィードバック制御系

Fig.4 Position feedback control system

に表される。ただし、添え字の i はシリンダの番号を表している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_n x_i(t) + B_n u_i(t) \\ y_i(t) &= C_n x_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$x_i(t) = [x_{pt}(t), \dot{x}_{pt}(t), d_i(t)]^T$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & C_1 & C_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_n = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_n = [1 \quad 0 \quad 0]$$

システムの状態変数ベクトルの推定値を $\hat{x}_i(t) = [\hat{x}_{pr}(t), \hat{x}_{pr}(t), \hat{d}_i(t)]^T$ とすると、外乱オブザーバは次式で表される。

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = A_n \hat{x}_i(t) + B_n u_i(t) + K(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) \quad (3)$$

K は極配置法などにより求まるオブザーバゲインである。外乱オブザーバによる外乱推定補償制御では、式(3)で求めた外乱推定値 ($\hat{d}_i(t)$) を制御入力から差し引くことによりシステムを制御する。図3に制御系のブロック線図を示す。

C_1, C_2 は K_p, K_x のように正確な値がわからないパラメータを含んでいるため、6本それぞれのシリンダについてランダムな入力に対する出力の関係からパラメータ同定によって求めた後、6本の平均値をとって、次のように定めた。

$$C_1 = -19, C_2 = 2700$$

また、実際の設計は式(2), (3)を離散化して行った。その際、離散時間領域におけるオブザーバゲイン K は、実際に操作したときに振動が生じない範囲で z -平面上の単位円内において外乱オブザーバの極をプラントの極よりも原点に近い領域に配置して設計を行った。

2.3 位置目標値生成 + 位置フィードバック制御

本方法はカセンサの信号からシリンダの位置目標値を生成し、位置フィードバックする方法である。常に位置制御されているため、手を離れた状態でもその位置で位置制御されるため、制御弁の中立点が多少ずれていても動き出してしまうことはないと考えられる。また、閉ループ制御することで各シリンダの動作速度の違いを補償し得ることが期待できる。図4に制御系のブロック線図を示す。位置目標値生成器は図のように、積分要素で構成した。また、コントローラにはPID制御則を採用した。

ここで、 K_i および PID の各パラメータは、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御との間で、同じ大きさの入力に対するピストン速度がほぼ等しくなるように調整した。

3. 実験結果と考察

前章で設計した2種類の制御系を実際に油圧力覚ディスプレイに適用し、その制御性能を実験により検証した。実験は、最初にすべてのシリンダが中立位置（シリンダストロークの midpoint）にある状態から、入力として図5(a)に示すようなステップ状の信号を6本すべてのシリンダに与えた。これは、実際の力覚ディスプレイの操作において、エンドエフェクタの姿勢を保ったまま約1.3[N]の力で1秒間垂直上向きに持ち上げた後、手を離す動作に

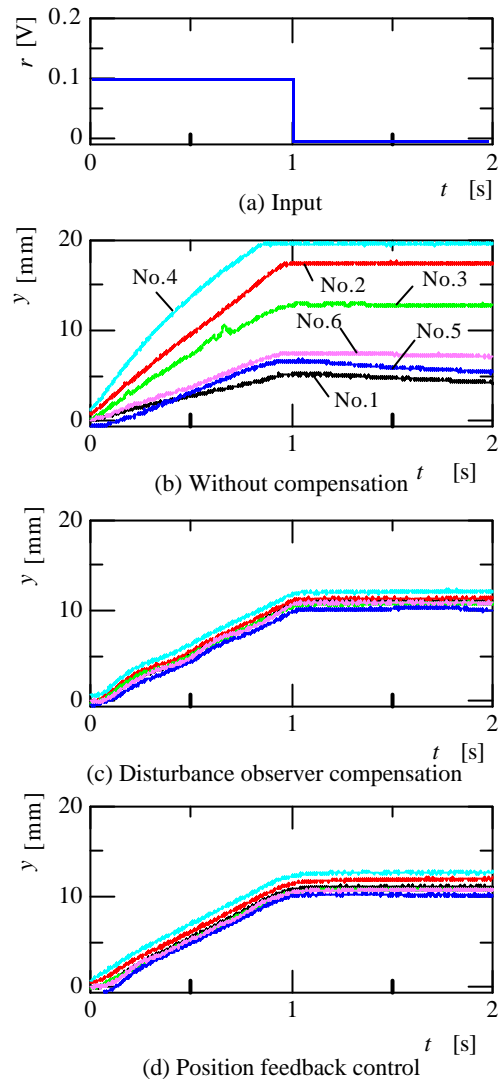


図5 ステップ応答の実験結果

Fig.5 Results of step response

相当する。

図5(b)に従来の制御法を用いたときの6本のピストン変位を示す。図によれば、各シリンダの動特性差のため、それぞれのピストン速度（0~1[s]間の曲線の傾き）が異なっている。その結果、エンドエフェクタの姿勢が傾いてしまう。また、入力が0[V]になった後、すべてのピストンが静止すべきところ、制御弁の中立点ずれにより、No.1やNo.5のシリンダで見られるようにピストンが変位している。これらの特性はシリンダのゲイン調整や制御弁の中立点調整である程度改善することはできるが、作動油の温度変化によりそれらの特性が変動すること、毎回の調整作業は煩雑であることなどの理由から実用的ではない。

図5(c)に外乱オブザーバによる外乱推定補償制御を用いたときの結果を示す。従来の制御法と異なり、6本のピストン速度はほぼ一定であり、実際の各シリンダと理想モデルとの動特性差を外乱として推定・補償した効

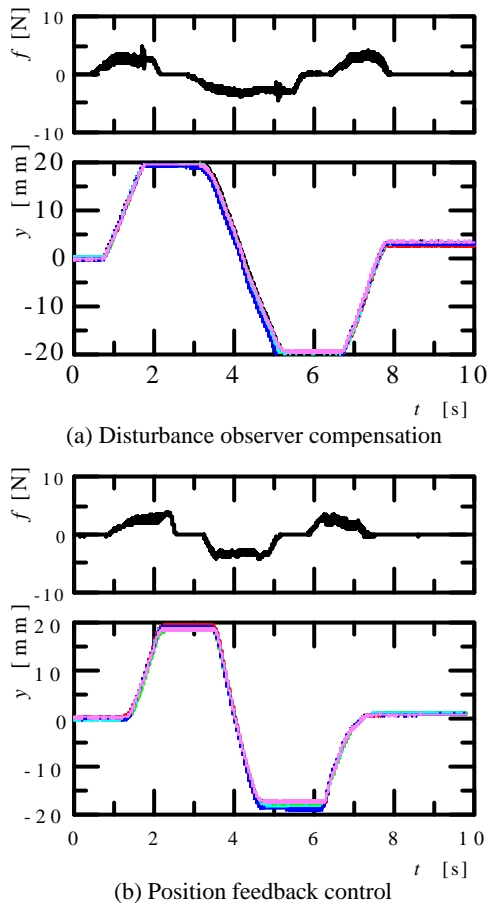


図6 力覚ディスプレイの操作結果
Fig.6 Results of force display operation

果が現れている。その結果、エンドエフェクタはほぼ同じ姿勢を保ちつつ真っ直ぐ上方に移動した。また、入力が 0[V]になった後、ピストンはほとんど動くことなく、その場で静止させることが出来た。

図5(d)に位置目標値生成 + 位置フィードバック制御を用いたときの結果を示す。この場合も外乱推定補償制御を行った場合とほぼ同様の結果になり、特性の改善が見られる。本実験によれば、2つの制御則を試みた結果はほぼ同程度の制御性能と評価された。

本実験では、比較の便宜上、コンピュータで生成したステップ信号を入力としたが、実際にグリップに力を加えて操作したときもそれぞれ良好な操作感覚が得られた。しかしながら、両制御則ともピストンがストローク端に達すると力覚ディスプレイの挙動が不安定になり操作感覚が悪化した。この原因としては、外乱推定補償制御の場合、理想モデルが線形でありストローク端のような非線形部分で実際のシステムとの相違が生じるため、正しい値が推定できないためであると考えられる。また、位置フィードバック制御系では、ストローク端に達した後も可動範囲を越えて位置目標値を生成していることが原因であると考えられる。

そこで、外乱推定補償制御の場合には、ストローク端

では外乱オブザーバによる外乱推定を行わないようにした。また、位置フィードバック制御の場合も同様に、ストローク端では、可動範囲を越えて位置目標値の生成を行わないように改めた。図6に実際にグリップに力を加え、力覚ディスプレイを操作したときの実験結果を示す。結果の表示を明瞭化するため、Z軸方向の並進動作のみ可能な状態で実験を行った。図(a)は外乱推定補償制御の場合、図(b)は位置フィードバック制御の場合である。各図とも上段にシリンダを駆動させるのに用いた操作者の力、下段に各ピストン変位を示す。両制御法の場合とも、ストローク端に到達後も6本のピストンの動きはほとんど同一（図では6本のピストン変位の波形がほとんど重なって描かれている）で、良好な操作感覚を得ることができた。

次年度は、これらの制御法をマスタ・スレーブ制御に適用し、実際に研磨作業を行うシステムを構築する予定である。

4. まとめ

本研究では、各油圧シリンダ間の動特性の違いや制御弁の中立点ずれ等により、これまで十分な操作感覚が得られていなかった油圧力覚ディスプレイに対して、その操作性を改善するため、ピストンストローク端における制御則の切替えを考慮した次の2つの制御法を適用した。

- (1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御
- (2) 位置目標値生成 + 位置フィードバック制御

その結果、両制御法とも各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償することで、動作時における各シリンダ速度をほぼ同じにすることができ、静止時におけるピストン変位のドリフトを低減することができた。これにより、力覚ディスプレイの操作性を改善することができた。

文献

- [1] 久富茂樹, 光井輝彰, 飯田佳弘, 山田宏尚, 武藤高義, “並列リンク型力覚ディスプレイの研究” 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.1, pp.47-52, 1999.
- [2] 光井輝彰, 久富茂樹, 飯田佳弘, “力覚ディスプレイによるマスタスレーブシステムの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.1, pp.53-58, 1999.
- [3] 山本敏郎, 横田真一, 田村尉, “電気油圧マニピュレータの高精度制御(外乱オブザーバを用いたモデルマッチング2自由度制御による6軸油圧マニピュレータの軌跡制御)”, 油圧と空気圧, 第28巻, 第1号, pp.108-115, 1997.
- [4] 宮崎友宏, 萩原史朗, “パイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式”, 日本ロボット学会誌, 7巻5号, pp.46-52, 1989.