油圧マニピュレータの高精度位置決め制御*

山本 敏郎^{*1}, 横田 眞一^{*2}Robust Control Using Disturbance Observer
of a Hydraulic Manipulator for Live-Line Maintenance

Toshirou YAMAMOTO and Shin-ichi YOKOTA

The uninterrupted supply of electric power requires that high-voltage power distribution maintenance work be done in a live-line state, and for this purpose a manipulator for power distribution line work has been developed that allows an operator to work by remote control. The manipulator must be light weight and have high output, because it is installed on a relatively unstable end of an insulated crane boom of a "cherry picker" truck and must handle heavy objects such as power distribution machinery and materials. Under such conditions, a hydraulic drive system has more advantages than an electrical drive system, but from the standpoint of control performance, a hydraulic manipulator has some characteristic problems not found in an electric manipulator. The stiffness is also low because most of it is made of plastic in order to ensure electrical insulation performance. In this research we are studying the accurate positioning of the end of the arm in terms of robustness with respect to changes in system parameters of a 6-axis hydraulic manipulator that has such unstable characteristics. In particular, cooperation among the various axes becomes important for improving the accuracy in positioning, and position disturbance estimation and compensation by an observer as well as speed disturbance estimation and compensation are applied and evaluated by independent servo system for each joint. As a result, it was verified by experiment that robust, stable and accurate positioning can always be achieved against fluctuations in the moment of inertia caused by changes in the attitude of the arm, and against the nonlinear disturbances, such as axis interference, that are characteristic of a multi-jointed arm.

Key Words: Manipulator, Hydraulic Actuator, Robust Control, Live-Line maintenance, Disturbance Observer

1. ま え が き

近年、コンピュータなどの情報機器の普及により無停電に対する要望が急速に高まるにつれて、架空配電線の保守工事も電気を止めずに行うことが要求されている。しかし、電気を止めずに工事を行う作業環境は感電事故の危険が伴い、人間にとっては負担の大きなものであり、この作業をロボットに置き換えることを目的として、人間操縦形、並びに将来的には自律形の配電作業用ロボットの開発が進められている。

この分野におけるロボットシステムは、高所作業車の電氣的に絶縁されたクレーンブーム先端の台座上に、少なくとも6軸の自由度をもつマニピュレータが双腕取付けられているのが基本的な構成である。人間操縦形のシステムにおいては、同じブーム先端の台座上に操作室を設け、作業者がマスタスレーブ操作によりマニピュレータを遠隔操作して作業を行う。このように、機械的剛性の低い高所作業車のクレーンブーム

に搭載するマニピュレータには、軽量でかつ高出力であることが要求される。

人間操作形で使用されている限りにおいては、位置決め精度はあまり重要視されないが、将来的な自律形を考えた場合、この種のマニピュレータにとって位置決め精度は重要な意味をもつ。現在開発が進められている自律作業形マニピュレータのほとんどは、産業用のロボットで実績のある電気モータで駆動されるものである^{(4)~(6)}。しかし、配電作業用のロボットアームには、

① 多関節アームの各軸間で、少なくともAC13.8 kV、5分間(乾燥状態)の電気絶縁性能が要求される。

② 配電機材などの重量物を取扱うために、先端部で少なくとも30 kg以上の可搬重量が必要である。などの特殊な性能が要求されるために、電気絶縁性能、出力/自重比の点ではかに優れている油圧駆動方式が有利である。

しかし、一方では油圧駆動特有の下記のような問題点も存在する。すなわち、

① 油温の変化、作動圧力の変動によりシステムのパラメータが変動する。

* 原稿受付 平成6年4月8日。

^{*1} 正員, 古河電気工業(株) (〒290 市原市八幡海岸通り6)。^{*2} 正員, 東京工業大学 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)。

② 電気駆動方式は一般に、減速機を介在させているために、各軸相互干渉の影響は減速比の二乗に反比例して小さくなるが、油圧駆動方式ではシリンダによる直接駆動である場合がほとんどであり、各軸相互の干渉やコリオリ力などの非線形力の影響を直接受けてしまう。そのため、マニピュレータを遠隔操作によりある一定の軌跡に沿って動作させたい場合、特にジョイスティックなどで先端の工具軸に沿って平行に動作させたい場合などは、高速になるに従って目標軌跡に対する誤差が大きくなる。

以上のような問題点が存在する中で、この種の油圧駆動マニピュレータには、自律作業を鑑みて電気駆動方式に匹敵する、高度な位置決め、軌跡精度が要求されている。各軸相互の干渉力や、コリオリの力などの非線形力を補償して高速、高精度な運動を実現させる研究は、分解加速度制御として、これまで多くの研究者によって優れた成果が得られてきたが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、モデル誤差に対してロバストでないことと、計算機に対する負荷が大きいことから、モデル変動が大きく、低コストが要求されるこの種のシステムには適さない。

そこで、マニピュレータの姿勢変化、ハンドリング負荷の有無による関節回りの慣性モーメントの変化や、高速動作時における各関節間の干渉力、その他油圧駆動に起因する非線形性などに影響されずに常に良好な制御性能を保つ、ロバストなシステムを得るための手法として、電気サーボなどで最近応用され始めている、オブザーバによる外乱の推定、補償法を6軸の油圧駆動マニピュレータのうち、最も外乱の影響を受ける3軸について適用した。この手法はモデル変動に対してロバストで、公称モデルとして簡単な形のものが使えるため、計算量を大幅に短縮させることができる。本報では、各関節で独立に目標位置 θ_r に追従する位置サーボ系において、各軸に同じ動特性をもたせたいうで、各軸について同一のモデルによりオブザーバを構成して位置外乱推定を行い、これを補償したことによる軌跡精度への効果を確認する。

2. マニピュレータの外乱補償制御

2.1 外乱オブザーバ 本節では、マニピュレータ各軸の回転角度情報から外乱を推定し、これを補償する手法について概観する。マニピュレータの動力学は一般に下記のように記述される。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (1)$$

ここに、 $\tau = [\tau_1 \cdots \tau_n]^T \in \mathbf{R}^n$ は関節駆動力ベクトル、 $\theta = [\theta_1 \cdots \theta_n]^T \in \mathbf{R}^n$ は関節ベクトル、 $M(\theta) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ は慣性行列、 $b(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbf{R}^n$ は遠心力、摩擦力、コリオリの

力を表す項、 $g(\theta) \in \mathbf{R}^n$ は重力項である。従来の計算トルク制御⁽⁷⁾⁽⁸⁾においては、遠心力、コリオリの力、重力を式(1)のようにモデル化し、動力学を逆に解くことによって、関節アクチュエータに必要なトルクを計算する。この計算トルク法では、高加速度、高速度移動が必要な区間を含む軌道に高精度で追従させたい場合には非常に優れた制御手法であるといえるが、第1章で述べたような問題がある。一方、外乱推定補償法においては、式(1)第1項での姿勢変化による慣性変動や、第2項、第3項の非線形項をすべて外乱入力とみなしてオブザーバで推定し、入力部分で補償すれば、各関節をほとんど完全に非干渉制御できる。すなわち、モデルの慣性行列を $\tilde{M}$ とおき、モデルの慣性力 $\tilde{M}\ddot{\theta}$ 以外に発生するトルクをすべて外乱トルク τ_d によるものであるとすれば、

$$\tau_d = (M - \tilde{M})\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (2)$$

とおけ、この外乱トルクを、

$$\tau + \tau_d = M(\theta)\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (3)$$

となるように入力部分に加えれば、

$$\tau = \tilde{M}\ddot{\theta} \quad (4)$$

となり、見掛け非線形な外乱入力に影響されない運動が実現できる。しかも $\tilde{M}$ については、運動方程式(1)が関節座標で表されている場合、慣性行列の対角部分のみを用いれば、非干渉化が実現できる。具体的には、入力に重畳した外乱トルク τ_d を含むシステムの状態変数ベクトル

$$x = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \tau_d \end{bmatrix}$$

を考え、マニピュレータの状態方程式が、

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

とおけると、状態変数ベクトル x の推定ベクトル $\tilde{x}$ をもって、式(6)の同次元オブザーバを計算機内部に構成する。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K(y - \tilde{y}) \\ \tilde{y} = C\tilde{x} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)をルンゲクッタ法により解いて外乱トルクの推定値 $\tilde{\tau}_d$ を算出する。

2.2 オブザーバゲインの決定 式(6)の状態方程式により、

$$\tilde{x} = (A - KC)\tilde{x} + Ky + Bu \quad (7)$$

ここで、 x と $\tilde{x}$ との差を

$$e = \tilde{x} - x \quad (8)$$

と定義すると、

$$\dot{e} = \tilde{x} - x = \{(A - KC)\tilde{x} + Ky + Bu\}$$

$$\begin{aligned} -(Ax + Bu) &= (A - KC)\tilde{x} - (A - KC)x \\ &= (A - KC)e \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。制御系の可観測性は満足されているので、オブザーバにおけるフィードバックゲイン K を適当に選択することによりオブザーバの極を自由に設定できる。この場合、 $(A-KC)$ を安定化させ、 e を零に収束させるためには、極は左平面において、実軸上のできる限り左に配置して推定時間を短縮させるのが望ましいが、左側にし過ぎると、オブザーバの微分作用によりノイズの影響を強く受け、推定誤差が大きくなってしまう。したがって極は、試行錯誤によりノイズの影響を受けない限界の値に設定している。

3. マニピュレータシステム

3・1 6軸垂直多関節形マニピュレータ 図1にマニピュレータの概観図を、また図2に単軸の駆動系の概略図を示す。

アクチュエータは、第3軸を除いてすべて油圧シリンダ+ラック & ピニオンにより直接駆動される。第3軸については、第1、2軸の慣性負荷を軽減させることを目的として、油圧シリンダを第2～3軸の軸間フレーム内部に配置し、チェーン & スプロケットで駆動される。サーボ弁は、電気絶縁を確保する目的でマニピュレータの基底部に配置され、電気絶縁性能を有する油圧ホースによって各軸に油圧動力が供給される。

図 1 油圧マニピュレータ

図 2 単軸駆動系の概略図

各軸間を構成する軸間フレームは、電気絶縁性能の確保を目的としてプラスチックで製作されており、これがアームの機械的剛性を低下させ、制御系のループゲインが上げられない要因の一つともなっている。関節の回転角度の検出は、ポテンシオメータにより行っている。図3に回転角度制御系のブロック図を示す。この制御系は基本的に1形の制御系であって、本来定常偏差が残らないはずであるが、実際には定常偏差が残ってしまう。この原因としては、サーボ弁の中立点のズレやアンプのオフセット、また機械的摺動部分の摩擦が考えられる。これらの要因もまた、油温や供給圧力の変動によって、時間とともに非線形に変化し、先に述べた多関節アーム特有の非線形力の影響に加えて希望する制御特性の得られない要因となっている。

3・2 システムのパラメータ同定 マニピュレータの状態方程式(5)における, システムのパラメータ **A** および **B** を求めるにあたり, システムのモデリングを行う必要がある。モデルは任意のものでよく, モデルからのずれはすべて外乱によるものとみなして補償することを考えているが, あまりに実態とかけはなれたモデルをたてると偏差が飽和して望みの制御性能が得られない。そこで, 下記のような仮定を設け, 簡単な二次系で近似する。

- (1) サーボ弁とサーボアンプは比例要素として扱う。
- (2) 油の圧縮性はないものとして扱う。

関節の角度制御に用いている弁はバンド幅約 120 Hz のノズルフラップ形のサーボ弁であり、案内弁の開度 z から負荷の出力 x に至るまでのブロック図は図 4 のようになる。

図 3 回転角度制御系のブロック線図

図 4 案内弁開度 z から変位 x までのブロック線図

図4により、下記の関係が成り立つ。

$$P_t = K_z \cdot z - K_p \cdot A \cdot v \quad (10)$$

$$f = A \cdot P_t - D \cdot v \quad (11)$$

$$v = \frac{f}{M_s} \quad (12)$$

$$x = \frac{v}{s} \quad (13)$$

ここで、

v : 負荷の移動速度

x : 負荷の変位

$$K_z: \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{z=z_0}$$

z : 案内弁の開度

$$K_p: \left(\frac{\partial p}{\partial q} \right)_{q=q_0}$$

P_t : 負荷圧力

A : シリンダの断面積

M : 負荷の質量

D : ダンピング定数

式(10)~(13)から、偏差 $E(s)$ から出力 $X(s)$ に至る伝達関数を求めると、

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \frac{C_2}{s^2 + C_1 s} \quad (14)$$

となる。ただし、

$$C_1 = \frac{DC_p + A^2 R^2}{MC_p} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{ARC_z k_v k_e}{MC_p} \quad (16)$$

である。オブザーバにより外乱入力を推定し、これを補償すればシステムの出力はオブザーバのモデル出力に追従するようになる。望みの軌跡精度を得るためには、各軸について同じモデルによるオブザーバを構成し、外乱推定補償を行い、見掛け上同じ動特性をもたせることが必要である。ここで、オブザーバのモデルとしては先に述べたようにどのようなものでもよいが、実験では応答の最も遅い第2軸のモデルを用いた。モデルの選択に際しては、各軸ごとに外乱推定補償を行ったときのステップ応答を測定し、モデルの応答と比較することにより偏差の飽和のないことを確認している。その結果、モデルのパラメータ C_1, C_2 は、 $C_1 = 126.1 \text{ s}^{-1}$ 、 $C_2 = 148.5 \text{ s}^{-2}$ とした。

4. 制 御 実 験

外乱オブザーバの効果を実験により明らかにするため、図1の6軸油圧マニピュレータについて、外乱推定補償を重力方向に動作する、第2, 3, 4軸について適用する。図5のように、マニピュレータの原点座標を第1軸の旋回中心とし、先端部分が xy 平面上で

円弧軌道を描くように指令を与え、各速度 ω を変化させたときの絶対位置精度を比較する。

まず、各軸の角度情報から外乱を推定するオブザーバを構成する。手先の軌道が式(17)で与えられるとき

$$r = r_0 + \begin{bmatrix} r \cos \omega t \\ r \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

各軸の位置ベクトル θ は逆運動学により容易に求めることができ、これが各軸の指令値となる。システムの状態方程式が式(5)で与えられるとき、システムの状態ベクトルは下記ようになる。

$$x = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \tau_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} C_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A = \begin{bmatrix} -C_1 & 0 & C_2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 1 \quad 0]$$

これより外乱オブザーバは、

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(\theta - \hat{\theta}) \quad (19)$$

で与えられる。ただし、 $K = (k_1, k_2, k_3)^T$ はオブザーバゲイン、また添字のハットは推定量であることを示す。ここで、オブザーバの極は -23 rad/s の三重極と

図5 マニピュレータの座標系

図6 先端の軌跡(ロバスト制御なし; $\omega = \pi/3$)

なるように設計した。

先に述べたように、オブザーバにおけるモデルは理論上どのようなものでもよいが、偏差の飽和を避ける意味で各軸のパラメータ C_1, C_2 は前述の値を用いている。各関節角のデータはサンプリング周波数約 10 kHz でコンピュータに取込まれ、CPU80486-DX2(50 MHz) で演算処理される。図 6 に $\omega = \pi/3 \text{ rad/s}$ とし、ロバスト制御を行わないで半径 17 cm の円軌道に追従させたときの先端の軌跡を、図 7 は同じ条件でロバスト制御を行ったときの結果を示す。また、図 8, 9 は、角速度 $\omega = \pi/2 \text{ rad/s}$ として、同様の実験を行ったときの結果を示している。いずれの角速度の場合も、目標とする円軌道にほぼ一致しており、ロバスト制御の効果が確認できる。特に、第 2 軸については角速度が大きくなるに従い先端軸からの干渉を受けるが、角速度が $\pi/3$ から $\pi/2$ に変化しても軌跡の精度はほとんど同じであり、式(1)右辺第 2 項の干渉項に対してロバストであることが確認できる。さらに、先端に

図 7 先端の軌跡(ロバスト制御あり； $\omega = \pi/3$)

図 8 先端の軌跡(ロバスト制御なし； $\omega = \pi/2$)

図 9 先端の軌跡(ロバスト制御あり； $\omega = \pi/2$)

図 10 先端の軌跡(先端負荷 8 kg；ロバスト制御なし)

図 11 先端の軌跡(先端負荷 8 kg；ロバスト制御あり； $\omega = \pi/3$)

図 12 目標値に対する各軸の応答(上段;ロバスト制御あり,下段;ロバスト制御なし)

約 8 kg の負荷を付けた場合の結果を図 10, 11 に示す。図 10 はロバスト制御を行わなかった場合, 図 11 は行った場合である。ロバスト制御を行わない場合は, 先端負荷が増えたことにより, 重力の影響を強く受けており, 目標軌道から大きくそれていることがわかる。しかし, ロバスト制御を行えば, 制御性能は大きく改善されることを図 11 は示している。

図 12 に目標値に対する各軸の応答の結果を示す。上段がロバスト制御を行わなかった場合, 下段が行った場合である。ロバスト制御を行うことにより, 目標値に対する応答が改善されることがわかる。

5. あとがき

システムの特性変動に対してロバストで, 常に一定の制御性能の得られる, 外乱推定・補償形ロバスト制御を, 6 軸多関節形の油圧マニピュレータのうち, 垂

直に動作する 2, 3, 4 軸について適用した。本報では, 各関節を協調させて手先軸の軌跡精度を向上させるために, 各関節軸に外乱推定補償制御を行い, その効果を評価してきた。その結果,

(1) 各関節軸について, 同一のモデルによるオブザーバを構成し, このオブザーバの出力とシステムの出力から外乱を推定し, 推定された外乱入力を補償することにより, 与えられた入力に対する先端の軌跡精度が向上することが確認された。

(2) 配電工事用マニピュレータは, 大部分がプラスチックで構成されていること, 油圧駆動であることなどから, 電気駆動のマニピュレータに比べてパラメータ変動が大きく, 安定した制御性能を得ることが比較的困難である。しかし, 想定されるいくつかの条件下で実験を行った結果, 外乱推定オブザーバにより常にロバストな制御が実現できることが確認できた。さらに, 多関節形のマニピュレータの特徴である, 各軸間の相互干渉や重力の影響に対してもロバストであることが確認できた。

文 献

- (1) 横田・小松, FHA を応用したマニピュレータアームの制御, 機論, 59-567, C(1993), 156-162.
- (2) 横田・森本・虎谷, 配電工事用油圧マニピュレータの高精度ロバスト制御, 油圧と空気圧, 25-1, (1994), 113-117.
- (3) 梅野・堀, 2 自由度制御系のパラメトリゼーションに基づくロバストサーボ系の設計, 電気学会論文集(D), 109-11(1989), 825-832.
- (4) 向田・内山・田村, 地上操作型マニピュレータシステムの開発, 電気評論, (1994-3), 20-24.
- (5) 丸山・矢可部・矢野, 半自動式活線作業ロボット車の開発, 第 12 回ロボット学会学術講演会論文集, (1994), 1117-1118.
- (6) 辰野, 保守点検ロボットの現状と自律化, 電気学会誌, 113-6(1993), 443-448.
- (7) Paul, L. W., On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102(1980), 69-76.
- (8) Paul, L. W., "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators", *IEEE Trans. Automatic Control*, 25-3(1980), 468-474.