バイラテラルサーボ機構の摩擦補償装置の開発†

清水 勝利*・川合 勝美**・伊藤 隆彦***
橋本 雄治****・鈴木 正憲*****

Development of Frictional Compensation of Bilateral Servomechanism

Katsutoshi SHIMIZU*, Katsumi KAWAI**, Takahiko ITO***
Yuji HASHIMOTO**** and Masanori SUZUKI*****

1. ま え が き

バイラテラルサーボ・マニピュレータでは、主動側操作力が系の摩擦分だけ増大し、主従間の力伝達が円滑に行われないという問題点があった。従来、マニピュレータの先端に力検出モジュールを装着し、摩擦をフィードバック補償した例があるが¹⁾、計算機による実時間演算を必要とし、装置が複雑になる欠点を有していた。本論文は、操作力に対する摩擦の影響の低減化を目的として、操作力の時間変化率を利用した摩擦補償法の提案と、対称型バイラテラルサーボ機構に適用した結果について述べる。

2. 摩擦補償法の原理

著者らが考案した摩擦補償法は、摩擦抵抗が常に操作の反対方向に働く性質に着目したものであり、その原理は以下のとおりである。操作力の方角を検出し、この方向に応じて、主動側電動機には操作力の働く方向にある一定トルクが生じるように補償電圧を与える。同時に従動側電動機には、操作力による主動側の運動に伴って従動側が駆動される方向に、ある一定トルクが生じるように補償電圧を与える。これらのトルクによって主動側および従動側の摩擦トルクを打ち消すというものである。

Fig. 1 Schematic diagram of a bilateral servomechanism with a friction compensator

つぎに本補償回路の各部の機能について説明する。

Fig. 1 は対称型バイラテラルサーボ機構の構成図で、一点鎖線で示した部分が補償回路である。トルク検出器はアーム上に装着されたストレンゲージを用いる。操作方向の検出には、トルク検出器の出力の微分信号を用いる。微分信号を用いることによって、直接にトルク検出器の出力を用いた場合に生じるアームの自重による影響やストレンゲージの温度ドリフトの影響をうけなくなり、正確な方向検出ができる。補償電圧の符号切換には、ヒステリシスコンパレータ（以下シュミット回路と呼ぶ） a を用いる。補償電圧の符号切換にヒステリシス特性をもたせた結果、操作力の微小変化やノイズ混入によって補償電圧の符号が切り換わりサーボ系に不安定な振動が発生することがなくなる。また、ウィンドコンパレータ b とアナログスイッチ C とからなる回路は、主動側がある速度しきい値を越えた場合に、微分信号がシュミット回路に入るのを妨げて、主動側アームの起動時にだけ補償電圧が切り換わる働きをする。この回路によって、主動側のアームが一定方向に駆動しているときには、操作力が変化しても摩擦補償の方向が反転することはない。

† 第 19 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 55・8)

* 日本原子力発電(株) 東京都千代田区 1

** 東京電力(株) 東京都千代田区内幸町 1-1-3

*** 中部電力(株) 名古屋市中区東新町

**** 中国電力(株) 広島市中区小町 4-33

***** (株)日立製作所エネルギー研究所 日立市森山町 1168

* The Japan Atomic Power Company, Chiyoda-ku, Tokyo

** The Tokyo Electric Power Co., Inc., Chiyoda-ku, Tokyo

*** The Chubu Electric Power Co., Inc., Nagoya

**** Chugoku Electric Power Co., Hiroshima

***** Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi

(Received January 31, 1981)

(Revised April 11, 1981)

Fig. 2 Operating characteristics of a bilateral servomechanism with and without friction compensation

Fig. 3 A comparison of calculated in case of no friction and experimental result with friction compensation

3. 実験結果

前章に述べた摩擦補償回路を含む実験装置を製作し、摩擦抵抗の低減効果を調べた。

力伝達比を変化させたときの無負荷操作トルクの測定結果を Fig. 2 に示す。製作したバイラテラルサーボ機構では、無負荷操作トルクは $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 前後必要であった。しかし、本補償回路を付加することにより約 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ に低減する結果を得た。

摩擦補償回路を付加しない場合の無負荷操作トルクが力伝達比の増加に伴って増加する理由は、従動側の摩擦抵抗が力伝達比だけ増倍されて主動側に伝えられているからである。一方、摩擦補償回路を付加した場合に、この現象が現れないことは、従動側の摩擦抵抗が、100% 補償されていることを意味する。

つぎに、摩擦補償回路を付加したときのトルク伝達特性の測定結果を Fig. 3 に示す。本補償回路を付加した場合の力伝達比 T_o/T_L は、摩擦を考慮しない場

合の理論的な力伝達比に比べて約 3.5 倍大きい値を示す。以下にこの原因について考察する。系の摩擦トルクが外部から系に加えられたトルクに比例すると仮定し、主動側および従動側に対する比例定数をそれぞれ μ_1, μ_2 とする。従動側の負荷トルク T_L と主動側の操作トルク T_o が平衡状態にあるとき、系に摩擦のないときの力伝達比を g 、摩擦のあるときのそれを g_i とし、次式が成り立つ。

$$T_o = g_i T_L = g(1 + \mu_1)(1 + \mu_2) T_L$$

したがって、 g_i と g の比は、次式で与えられる。

$$g_i/g = (1 + \mu_1)(1 + \mu_2)$$

本実験の場合、摩擦の主な原因は減速機の伝達損失なので、その伝達効率 η は $1/(1 + \mu)$ に等しくなる。主動側および従動側に使用した減速機の伝達効率は、カタログ値より、それぞれ $1/(1 + \mu_1) = 0.5$ 、 $1/(1 + \mu_2) = 0.6$ である。このとき、 $g_i/g = 3.3$ となり、操作トルク測定に約 10% の誤差が含まれる実験結果と測定誤差の範囲内で一致する。このことから、力伝達比の増加原因は、負荷トルクに比例して生じる摩擦抵抗にあると推測できる。したがって、本補償法のように、バイラテラルサーボ機構の無負荷操作力に対して摩擦を補償した場合、負荷時の伝達特性は、摩擦のない系の特性と比べて、力伝達比が一定比率増倍した特性を示すことになる。力伝達比は、サーボ系の定数によって定まり、実用上は任意の値に設定できるので、上に述べた特性は容易に補正できる。

4. 結 言

機械的摺動部の摩擦に起因する操作力の増大を抑えるため、操作力の時間変化率を利用した補償法を考案した。これをバイラテラルサーボ機構に適用した実験により、1) 無負荷操作力を補償しない場合のその 10% 以下に抑えることができた、2) 負荷に対する主従間の力伝達特性は、摩擦によって力伝達比が一定比率だけ増倍する特性を示し、この補正は容易にできる、という結果を得、その効果が十分にあることを実験によって実証した。

参 考 文 献

- 1) C.R. Flatau: Force Sensing in Robots and Manipulator, Theory and Practice of Robots and Manipulators, 2nd CISM-ISToMM Symposium, Warsaw, Poland, 294/306 (1976)