

## Development of a Construction Telerobot System (Master-Slave Control for Tele-operation)

○ 正 山田 宏尚 (岐阜大) 正 武藤 高義 (岐阜大) 学 向田 慎二 (デンソー)

Hironao YAMADA, Takayoshi MUTO, Shinji MUKOTA, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu

In this study, we have developed a bilateral construction robot that consists of a servo-controlled construction robot, joysticks for bilateral control and a 3 degrees of freedom motion base. The motion base simulates the motion of the construction robot. We proposed a new method of master-slave control for hydraulic system which can be used for construction robot. The validity of the proposed method was confirmed by experiment and simulation.

**Key words:** Telerobotic system, Master-slave control, Construction robot, Virtual reality, Hydraulic actuator

### 1. 緒言

本研究では、遠隔操作建設ロボットにVR技術を導入し、オペレータに作業現場の十分な臨場感を与え、コンピュータの支援に基づく高度かつ精密な作業を人間に優しいインターフェースにより実現するシステムの構築を目的とする。本報では、油圧システムに対するマスタ・スレーブ制御法として、著者らにより提案された可変ゲイン位置対称型マスタ・スレーブ制御<sup>(1,2)</sup>の有効性に関して、実験とシミュレーションにより検討を行った結果について報告する。

### 2. 実験装置

Fig.1に、本研究で扱う実験システムの概略を示す。建設ロボットは、ミニショベルにステレオCCDカメラ、マイクロフォン等を取り付けて遠隔操作ができるように改造したもので、全ての油圧アクチュエータはスレーブ側コンピュータにより制御できるようになっている。操作者はステレオ視カメラから入力された画像、力覚フィードバック、音響フィードバックなどを有する臨場マニピレータより、建設ロボットを操作する。また、操作者の椅子は油圧3軸揺動装置上に設置されており、建設ロボットの動きに応じて、揺動するようになっている。これにより、操作者は、ロボットの動きをリアルに体験することができる<sup>(2)</sup>。

ジョイスティックはX-Y軸方向に操作可能である。変位は、ポテンショメータにより検出される。また、ジョイスティック下部には、DCモータが取り付けられており、DCモータのトルクをギヤ

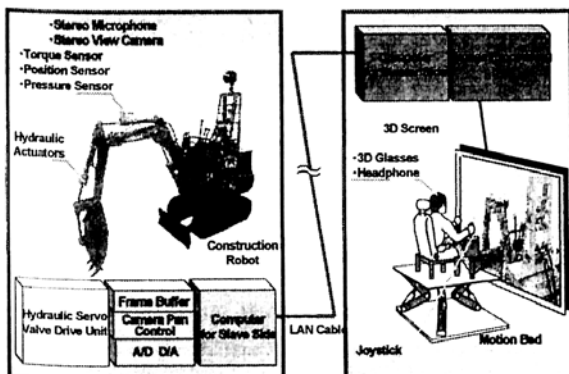


Fig.1 Tele-operation construction robot system

によりジョイスティックの変位支点に伝達し、反力を発生できる構造となっている。建設ロボットのアクチュエータは外付けされたサーボレノイド弁により駆動され、シリンダヘッド側及びシリンダキャップ側に圧力センサが設置されており、負荷圧力が検出可能となっている。

### 3. 数学モデルとシミュレーション

著者らの提案によるマスタ・スレーブ制御法に対して、様々な条件下における動作特性や安定性について検討することを目的として、シミュレーションを実施した。システムの数学モデルは、ジョイスティックを1自由度系とし、2次系で近似した。また、油圧サーボ系は、各種非線形項を線形化し、4次系で近似した(Fig.2 参照)。

### 4. 可変ゲイン位置対称型マスタ・スレーブ

上記システムに対して、ジョイスティックをマスタ、建設ロボットをスレーブとするマスタ・スレーブ制御系を構成した。予備実験として、位置対称型と力逆送型の2つのタイプのマスタ・スレーブアルゴリズムを適用したところ、①油圧システムの駆動遅れに起因して、ジョイスティックの操作感覚が重くなること。②硬い物体と柔らかい物体の区別が付きにくい点。また、③力逆送型では、安定性に問題があることが明らかとなった<sup>(2)</sup>。そこで、これらの欠点を補い、オペレータに良好な操作感覚が伝達される方法として、可変ゲイン位置対称型マスタ・スレーブ制御を提案する。以下に、その制御アルゴリズムを示す。

#### (i) マスタ制御用のアルゴリズム

$$u_m = TK_{pm}(y_s - y_m) + TK_{dm}(\dot{y}_s - \dot{y}_m) \quad (1)$$

$$T = \begin{cases} 0 & (f_e \leq f \leq f_c) \\ 0 < \frac{f - f_e}{f_{e\_max} - f_e} < 1 & (f < f_e) \\ 0 < \frac{f - f_c}{f_{c\_max} - f_c} < 1 & (f > f_c) \end{cases} \quad (2)$$

#### (ii) スレーブ制御用のアルゴリズム

$$u_s = K_{ps}(y_m - y_s) + K_{ds}(\dot{y}_m - \dot{y}_s) \quad (3)$$

ここで、 $f$ :駆動力、 $f_e, f_c$ :外乱のない状態においてサーボ弁に最大制御入力 $\pm 5V$ を与えたときの駆動力  $f_e \approx -7.5[kN]$ ,  $f_c \approx 4.8[kN]$ ,  $K_p, K_d$ :比例ゲイン、微分ゲイン、 $T$ :位置-力伝達ゲイン、 $u$ :制御入力、 $y, \dot{y}$ :変位、変位速度、添え字  $m, s, c, e, max$  はそれぞれマスタ、スレーブ、ピストン伸縮時、ピストン伸張時、最大駆動力を指す。

この  $T$  により、外乱が存在しないときは、マスタへの反力が 0 となり、外乱が存在するときは、駆動力が  $f_e \leq f \leq f_c$  の範囲を越えるため、位置偏差と駆動力に応じたマスタへの反力が発生し、良好な操作感覚を得ることが期待できる。Fig.2 に、シミュレーションにおける本マスタ・スレーブシステムのブロック線図を示す。

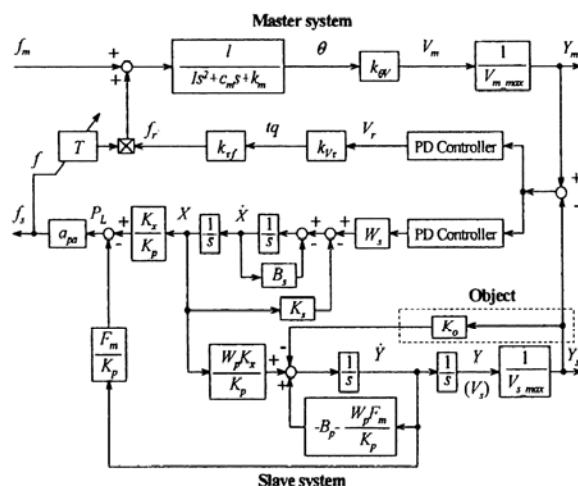


Fig.2 Block diagram of variable gain symmetric position control

Fig.3 に、硬い対象物としてコンクリートブロックをつかんだときの実験結果を示す。なお、Fig.3(c)中の細線は  $f_e$  を、破線は  $f_c$  を示す (Fig.4,5(c)も同様)。ブロックをつかんだ瞬間にジョイスティックへの反力がステップ的に発生しているため、つかんだ瞬間が明確にわかるようになり、また、反力の大きさも十分な大きさが発生しているため、硬いものをつかんでいるという感覚を得ることができた。Fig.4 に、Fig.3 に対応するシミュレーション結果を示す。ただし、図(c)中の細い曲線は、ジョイスティックへの反力を示す。シミュレーション結果は実験結果と良好な一致を示しており、Fig.2 に示した数学モデルの有効性が確認された。

Fig.5 に柔らかい対象物としてゴムタイヤをつかんだときの実験結果を示す。位置-力伝達ゲインが駆動力に応じて変化するため、反力もそれに応じて変化していることがわかる。反力の大きさもブロックと比べると小さくなく、また、徐々に大きくなっているために、オペレータは、柔らかいものをつかんでいるという感覚を得ることができた。

上記以外に、シミュレーションにおいて様々な入力波形を与えると共に、供給圧力や対象物の硬さ、ピストンの形状等を変化させた場合においても、同様に従来方式に比べ良好な結果が得られた。以上の検討により、提案されたマスタ・スレーブ制御法の有効性が確認された。

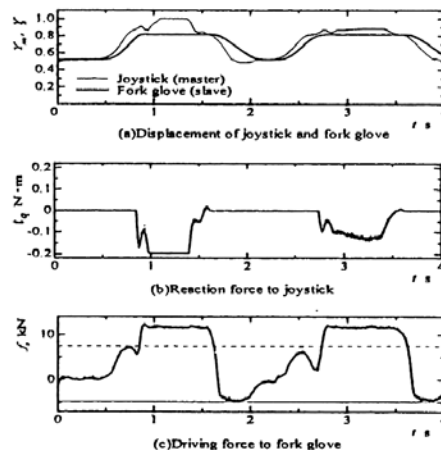


Fig.3 Grasping a concrete block (experiment)

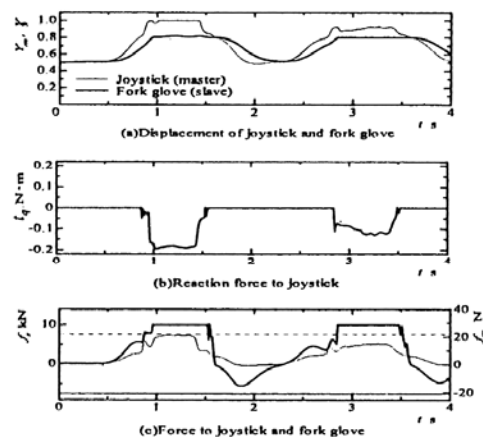


Fig.4 Grasping a concrete block (simulation)

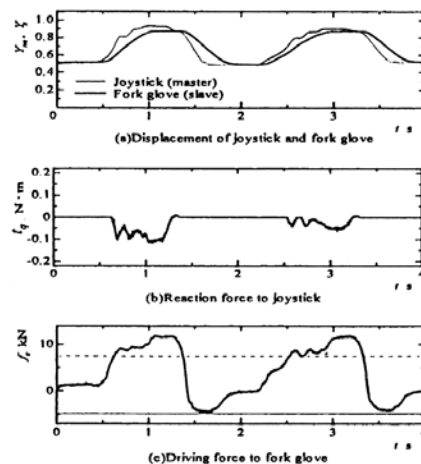


Fig.5 Grasping a tire (experiment)

## 参考文献

- (1) 山田宏尚, 武藤高義, 大橋 豪臣:遠隔操作・臨場感提示建設ロボットの研究(力覚提示に関する検討), 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 第 2 分冊, 661-662,(1998)
- (2) Hironao YAMADA, et al., "Construction Telerobot System with Virtual Reality", Proc. of VSM98, Vol.1, pp.152-157,1998