

弾性要素を用いた力覚提示機構を有するマスタ・スレーブシステムの制御法

Method for Controlling Master-Slave System with Force Feedback Mechanism using Elastic Elements

学 山野 郁男 (慶大) 正 竹村 研治郎 (慶大)
正 前野 隆司 (慶大)

Ikuo YAMANO, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama
Kenjiro TAKEMURA, Keio University Takashi MAENO, Keio University

Master-slave systems have been applied to various fields including remote operation in extreme-environment and tele-surgery. Previously developed systems based on bilateral control methodology have enabled dexterous manipulation on tele-robotics by giving force feedback between slave manipulator and arbitrary object to the operator of the system. However, those mechanism and controller become complicated for controlling position and force at the same time. We propose a new type of control methodology for master-slave system in this paper. It gives passive force feedback to the operator and realizes operation with sense of force by simple mechanism and controller using ultrasonic motor, clutch and elastic elements. The methodology is based on control by switching position and force according to contact condition of slave manipulator. Driving tests and sensory evaluations using experimental devices are conducted in order to confirm the effectiveness of this method.

Key Words: master-slave system, tele-robotics, ultrasonic motor, control, haptics

1. はじめに

ヒトが操作用ロボット(マスタ)に入力した動作をそのまま作業用ロボット(スレーブ)が再現することによって、遠隔操作を行なうマスタ・スレーブロボットシステムは、これまで様々な分野に応用されてきた。特に、Fig. 1のようなバイラテラル制御方式を用いたシステムは、マスタからスレーブへの位置情報の伝達に加えて、スレーブからマスタへの力情報のフィードバックが行なわれることによって、繊細で臨場感のある操作を可能にしている。しかし、位置と力を同時に制御するために装置と制御系が複雑化することに加え、接触時に制御信号の発振が生じるという問題点があった。このため、本研究では、簡便な装置と制御系によって操作者に力情報を提示するための方法として、超音波モータ、クラッチおよび弾性要素を用いた新たな制御手法の提案を行なう。また、この制御手法を実現するシステムを構築し、その有用性を確認する。

2. 制御手法の提案

本制御手法は、Fig. 2のようにスレーブが対象物と接触する前後で位置制御と力制御を切り換えることによって、操作者に力情報を提示することを特徴とする。制御手法を適用する1自由度装置の構成をFig. 3に示す。ただし、 k_1 および k_2 は、弾性要素のねじりばね定数を表す。スレーブ装置の弾性要素 k_2 の両端の角度差($\theta_2 - \theta_3$)から、接触・非接触の状態を判断することができる。マスタ装置のクラッチは装置の回転軸を入力軸とし、出力軸は固定された状態にある。また、スレーブアームの駆

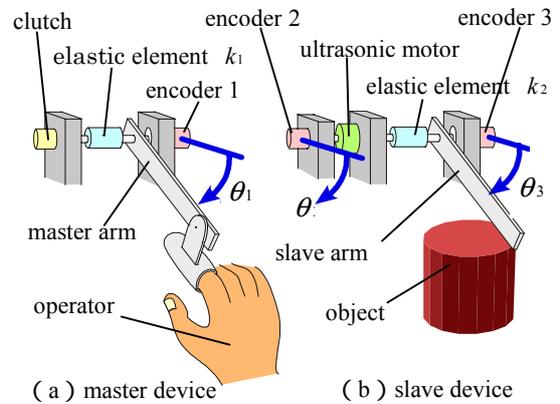


Fig. 3 Outline of proposing system

Table 1 Switching of control

	non-contact	contact
clutch	Release	hold
ultrasonic motor	controlled to $\theta_1 = \theta_3$	controlled to $k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_3) = k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3)$
control	position control	force control

動に用いる超音波モータは低速高トルク特性を有するうえ、無通電時に高保持トルクを有し、応答性に優れるため、マスタ・スレーブシステムのアクチュエータとして適しているといえる。

スレーブアームが対象物と接触していない状態では、マスタ装置のクラッチは解除されており、操作者は負荷の無い状態でマスタアームを操作することができる。この間、スレーブアームがマスタアームの動きに追従するように、スレーブ装置の超音波モータが駆動され、位置制御が行われる。スレーブアームが対象物に接触すると、接触反力によって弾性要素 k_2 がねじり変形を起こし、 θ_2 と θ_3 の間に角度差が生じる。角度差が閾値を超えると、Table 1のようにして位置制御から力制御への切り換えが行なわれる。マスタ装置のクラッチは保持状態に切り換わり、このときのマスタアームの角度 θ_1 の値が θ_1' として記憶される。マスタアームの回転がクラッチにより拘束されることにより、操作者は接触情報を得る。操作者がマスタアームをさらに変位させると、弾性要素 k_1 にねじり変形が生じ、 $k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_1')$ で表される反力が操作者に受動的に提示される。反力の大きさは同時にス

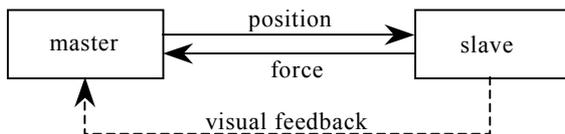


Fig. 1 Bilateral control methodology

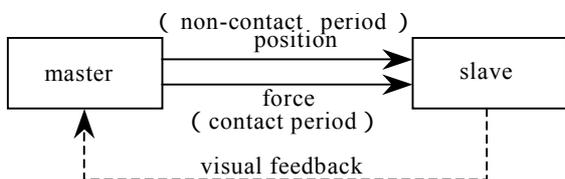


Fig. 2 Proposed control methodology

スレーブ装置への入力値となり、 $k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_1') = k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_3)$ となるように超音波モータが駆動されることにより、マスタからスレーブへの力の伝達が行われる。

このように、本制御手法は操作者に受動的に力覚を提示するため、マスタ装置にアクチュエータを必要とせず、位置と力の制御を同時に行なわないことにより、簡便な装置と制御系によって発振のない力覚提示が可能である。また、位置と力の情報がいずれもマスタ側からスレーブ側に伝達されるため、通信ネットワークを利用した遠隔操作のように時間遅れが大きいシステムにおいて、力覚提示を伴う安定した制御を可能にする。さらに、弾性要素を装置に用いることによりスレーブアームはコンプライアンスを持ち、力覚提示機構にクラッチを用いていることから、システムが暴走して操作者に危害をおよぼす危険性がなく、安全性の高いシステムであることがいえる。

3. システムの構築

2章で述べた制御手法の有用性を確認するために、システムの構築を行なった。製作した装置の外観を Fig. 4, Fig. 5 に示す。エンコーダにより得られる角度情報 θ_1 , θ_2 , θ_3 はカウンタボードを介して PC 内に取り込まれ、制御プログラムによってクラッチと超音波モータへの指令値が算出される。指令値はアナログ出力ボードを介して超音波モータ用ドライバとクラッチ用スイッチング回路に送られ、制御が実現される。製作した装置の弾性要素には、直径 1.5mm、長さ 15mm の超弾性合金の丸棒を用いた。また、出力が低速高トルクである超音波モータによるダイレクトドライブを行なうことにより、50mm のスレーブアームの先端から対象物に最大 2.0N の力を与えることができる。

4. 制御実験および官能検査

製作した装置を用いて、制御実験を行なった結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。非接触時の位置制御実験の結果、時間遅れ 20msec 以下で精度良く位置の追従が行なわれた。また、スレーブアームをアルミ材に接触させた力制御実験の結果、マスタからスレーブへ精度良く力(トルク)が伝達された。シリコンゴムを対象物とした実験においても、同様の結果が得られた。これらより、構築したシステムによって本制御手法を実現できることを確認した。本制御手法は接触時に力制御のみを行なうため、接触中のマスタアームの変位はスレーブアームの変位と一致しない。しかし、ヒトが仮想空間内での作業において対象物の剛性を認識する際、体性感覚による変位情報に対して視覚情報による変位情報が優位性をもつことが明らかにされている⁽¹⁾。このことから、本制御方式においても視覚によるスレーブアームの変位情報と体性感覚による力情報の組み合わせによって、操作者は対象物の剛性を判断できるものと考えられる。そこで、本装置を用いて、対象物の剛性の認識に関する官能検査を行なった。Fig. 8 のような 4 つの対象物を用意し、内部のばねのばね定数をそれぞれ 0.13, 0.21, 0.33, 0.83[N/mm]とした。被験者に対して、対象物を 2 つずつ提示し、視覚情報のフィードバックがある状態で、Fig. 4, Fig. 5 の装置を用いて剛性の大小の比較を行なわせた。4 つの対象物の 6 通りの組み合わせ全てについて繰り返し提示を行ない、10 人の被験者に対して計 180 回の比較を行なわせた結果、正答率は 98.8%となった。このことから、視覚情報を効果的に利用した本制御手法により、対象物の剛性の違いを認識可能であることを確認した。

5. おわりに

簡便な装置と制御系によって操作者に安定した力覚提示を行なうマスタ・スレーブシステムの新たな制御手法を提案した。また、システム装置と制御系を構築し、制御実験および官能検査を行なった結果から、本制御手法の有用性を確認した。

参考文献

- (1) M. A. Srinivasan et al.: The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments, Proc. ASME Dynamic System and Control Div., vol.58, pp. 555-559, (1996)

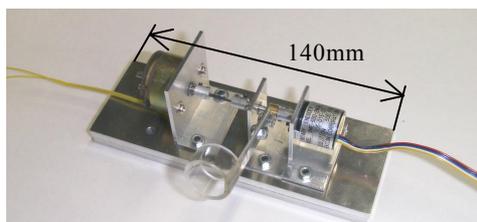


Fig. 4 Master device



Fig. 5 Slave device

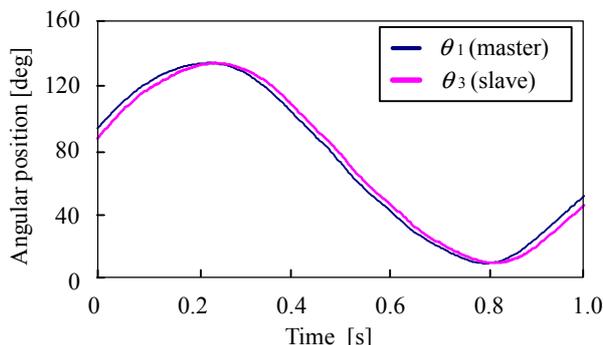


Fig. 6 Result for position control (non-contact period)

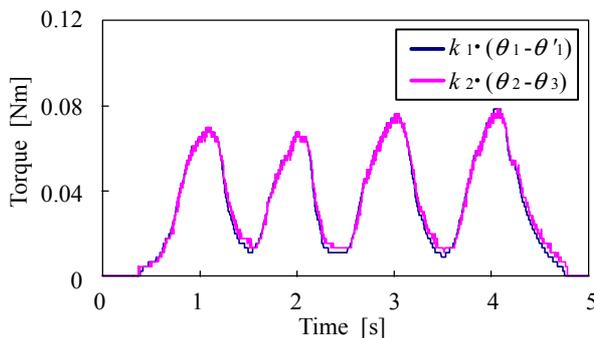


Fig. 7 Result for force control (contact period)

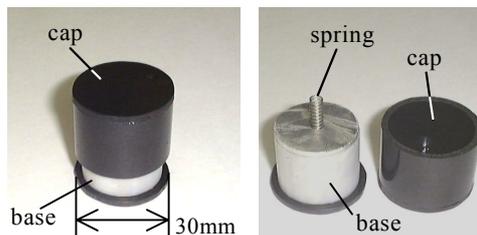


Fig. 8 Test object