

# テレグジスタンスの研究 (第43報)

- テレグジスタンス用スレーブアームのインピーダンス制御 -

東京大学 宗玄 清宏 多田隈 理一郎 梶本 裕之 川上 直樹 館 暉

## Study on Telexistence (XLIII)

- Impedance control of an anthropomorphic slave arm for telexistence -

Kiyohiro Sogen, Riichiro Tadakuma, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi

The University of Tokyo

**Abstract:** We introduce the control method of an anthropomorphic slave arm developed for the next-generation telexistence robot TELESAR (TELE-existence Surrogate Anthropomorphic Robot). It is important that master can present an exact force to an operator and slave has contact safety with human in a remote environment. Impedance control type master-slave we adopted can realize an exact presentation of force. Moreover, we can realize contact safety with human on slave, because slave has compliance by impedance control.

### 1. はじめに

テレグジスタンスマスタ・スレーブシステム[1]は操作者の姿勢を読み取るマスタシステム[2]と操作者の分身となるスレーブロボット[3]から構成される。テレグジスタンス環境下では、マスタ側では操作者への正確な力提示、スレーブ側では対人環境下における接触安全性が重要である。我々の採用したインピーダンス制御型マスタ・スレーブ制御[4]は、操作者への正確な力提示が可能であると同時に、インピーダンス制御によってアームに持たせた柔軟性により安全性も確保できる。

インピーダンス制御型マスタ・スレーブ制御を実現するためには、スレーブとマスタのそれぞれにおいてローカルにインピーダンス制御をし、スレーブとマスタのインピーダンスを一致させる必要がある。そのインピーダンス制御の制御法には大きく分けてトルク制御ベースと位置制御ベースの2つの制御法がある。本報告ではスレーブにおいて、この2つの制御法を比較し、さらに外乱オブザーバを適用した結果を示す。

### 2. インピーダンス制御理論

#### 2.1 トルク制御ベースと位置制御ベース

インピーダンス制御には大きく分けてトルク制御ベースと位置制御ベースの2つの制御法がある。トルク制御ベースは操作量として直接トルクを指令する制御法で、位置制御ベースは目標インピーダンスから計算される軌道に沿って、位置制御あるいは速度制御をする制御法である。

#### 2.2 トルク制御ベースインピーダンス制御

トルク制御ベースであり、インピーダンス制御の提唱者でもある Hogan のインピーダンス制御(以下、Hogan の手法)について説明する[5]。

目標インピーダンス ( $M_d, B_d, K_d$ ) と目標軌道 ( $\ddot{X}_d, \dot{X}_d, X_d$ ) が与えられた場合目標インピーダンス関係式は次のようになる

$$F_{EXT} = M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) \quad (1)$$

$F_{EXT}$ : 手先が受ける外力  $X$ : デカルト座標系での手先の位置・姿勢

式(1)を変形し、デカルト座標系での加速度  $\ddot{X}^*$  が求まる。

$$\ddot{X}^* = -M_d^{-1}B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) - M_d^{-1}K_d(X - X_d) + \ddot{X}_d + M_d^{-1}F_{EXT} \quad (2)$$

この加速度  $\ddot{X}^*$  をアームに持たせれば、目標インピーダンスをアームに設定できた事になる。この加速度  $\ddot{X}^*$  から

$$\ddot{\Theta}^* = J^{-1}\ddot{X}^* - J^{-1}\dot{J}\dot{\Theta} \quad (3)$$

式(3)の関係を使って角加速度  $\ddot{\Theta}^*$  を求める。この角加速度  $\ddot{\Theta}^*$  をアームに持たせるため以下のモデルを使い、アクチュエー

タへのトルクを求める。

$$\tau = \hat{M}(\Theta)\ddot{\Theta}^* + \hat{V}(\Theta, \dot{\Theta}) + \hat{G}(\Theta) - J^T F_{EXT} + \hat{I}g^2\ddot{\Theta}^* + \text{摩擦項} \quad (4)$$

$\tau$ : アクチュエータへのトルク  $\Theta$ : 関節角度 添え字^: モデル

$M(\Theta)$ : 慣性項  $V(\Theta, \dot{\Theta})$ : コリオリ・中心力項  $G(\Theta)$ : 重力項

$J$ : ヤコビアン  $I$ : 減速器入力軸の慣性モーメント  $g$ : 減速比

Hogan の手法は式(2)を見ると、 $M_d^{-1}K_d$  が PD 制御の P ゲイン、 $M_d^{-1}B_d$  が D ゲインと等価なため、目標軌道 ( $\ddot{X}_d, \dot{X}_d, X_d$ ) に

対してはフィードバック制御で追従する。しかし、加速度  $\ddot{X}^*$  をアームが持ったかどうかのフィードバック項がないため、目標インピーダンスを設定する点ではフィードフォワード制御となり、モデル化誤差に弱くなる。

#### 2.3 位置制御ベースインピーダンス制御

仮想内部モデル追従制御[6]の仮想内部モデルとして式(1)のインピーダンスモデルを使えば位置制御ベースインピーダンス制御となる。

式(1)の微分方程式を解くと、インピーダンス軌道  $X_{imp}$  が得られる。このインピーダンス軌道に沿って、位置制御系である加速度分解制御[7]を行う事で位置制御ベースインピーダンス制御となる。制御の流れは以下になる。インピーダンス軌道  $X_{imp}$  から

$$\ddot{X}^* = -K_D(\dot{X} - \dot{X}_{imp}) - K_P(X - X_{imp}) + \ddot{X}_{imp} \quad (5)$$

この加速度  $\ddot{X}^*$  から式(3)を使って角加速度  $\ddot{\Theta}^*$  を求め、 $\ddot{\Theta}^*$  をアームに持たせるため、モデルを使ってトルクを求めるのは、Hogan の手法(2.2 節)と同様である。実は Hogan の手法と加速度分解制御の違いは式(2)と式(5)の違いでしかない。Hogan の手法では、式(2)の加速度  $\ddot{X}^*$  をアームに持たせてはじめて目標インピーダンスがアームに設定されるが、仮想内部モデル追従制御で採用した加速度分解制御では、式(5)の加速度  $\ddot{X}^*$  はフィードバック制御の中間指令値でしかない。また、インピーダンス軌道  $X_{imp}$  に対してフィードバック制御で追従するため、目標インピーダンスを設定する点でもフィードバック制御となる。

#### 2.4 外乱オブザーバ

角加速度  $\ddot{\Theta}^*$  をアームに持たせるため、式(4)のモデルを使ったが、モデル化誤差による外乱が加わる。本報告で用いたスレーブアームは減速比が  $g = 50$  であるため、式(4)の内  $\hat{I}g^2\ddot{\Theta}^*$  の項が支配的となる。角加速度を実測する事で、

$$\tau_{dis} = \hat{I}g^2\ddot{\theta}^* - \hat{I}g^2\ddot{\theta} \quad (6)$$

のように外乱トルクが推定でき、次のサイクルの指令トルクに足す事でさらにモデル化誤差の影響を軽減できる[8]。

### 3. インピーダンス制御実験

#### 3.1 トルク制御ベースと位置制御ベースの比較

スレーブにおいてトルク制御ベースと位置制御ベースのインピーダンス制御を実装し、比較のため以下の実験を行った。

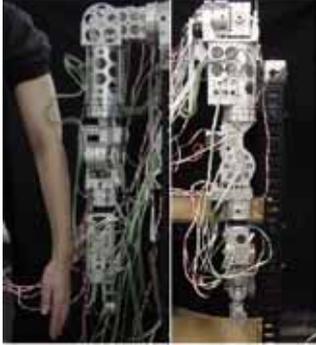


Fig.1 Anthropomorphic slave arm with seven degrees of freedom[9]

実験で用いたスレーブアーム(Fig.1)は7自由度であるが、1自由度固定し6自由度アームとして実験を行った。Fig. 2に示すように基本姿勢から肘を90[deg]曲げた姿勢を取らせ、このときのアーム先端の初期位置(Fig. 2の赤丸部分)を目標位置  $X_d$

とした。アーム先端に x 方向に力を加え、目標位置  $X_d$  から 5[cm]変位させたのち、力を 0[N]にした。力を 0[N]にした時刻を  $t = 0$  とし、アーム先端の運動を記録し、理論値と比較した。

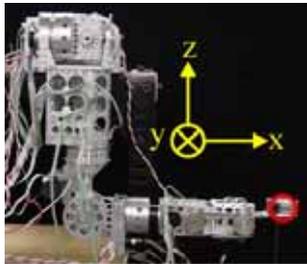


Fig. 2 Impedance control experiment of the slave arm[9]

#### 3.2 実験結果

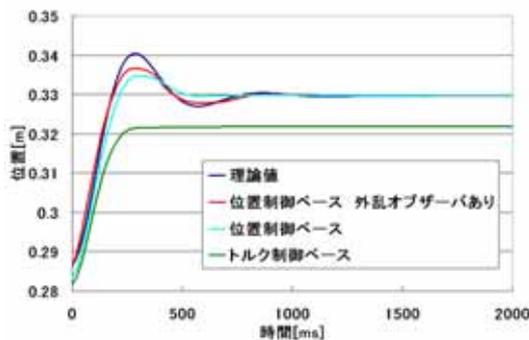


Fig. 3 Arm motion in x direction. Comparison of impedance control based on torque control and position control without a disturbance observer.

(  $M_d = 1.0[kg]$ ,  $B_d = 10[N \cdot s / m]$ ,  $K_d = 150[N / m]$  )

実験結果をFig. 3に示す。Fig. 3には位置制御ベースインピーダンス制御に 2.4 節で述べた外乱オブザーバを適用し、同様の実験を行った結果も示した。位置制御ベースの方が、トルク制御ベースに比べはるかに理論値に近い事が分かる。これは目標インピーダンスを設定する点においてトルク制御ベースはフィードフォワード制御、位置制御ベースはフィードバック制御である事の差が出ていると考えられる。本報告で用いたスレーブアームのように多自由度でハーモニックドライブというモデル化しづらい減速器を使ったアームでは、位置制御ベースインピーダンス制御の方が適していると言える。また、位置制御ベースに外乱オブザーバを適用した結果(赤色の曲線)、理論値の 2 つ目のオーバーシュート(青色の曲線の谷)まで再現出来ている事が分かる。外乱オブザーバでさらにモデル化誤差の影響を軽減した事で、インピーダンス制御の性能がさらに向上したと言える。

#### 4. まとめ

開発したトレイグジスタンス用スレーブアームにトルク制御ベース、位置制御ベースのインピーダンス制御を実装し、位置制御ベースインピーダンス制御の方がより正確に目標インピーダンスを設定できる事を確認した。さらに、位置制御ベースインピーダンス制御に外乱オブザーバを適用する事でインピーダンス制御の性能を上げる事ができた。今後、マスタに関してこの制御法を実装し、インピーダンス制御型マスタ・スレーブ制御を実現し、スレーブアームの受けた力を正確に操作者に力提示できるシステムを完成させる予定である。

謝辞 本研究は、独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究課題「トレイグジスタンスを用いる相互コミュニケーションシステム」の一環として実施された。

#### 参考文献

- [1] 館, 川上, 梶本: テレイグジスタンスの研究(第35報) 相互トレイグジスタンスロボットTELESARIIの構想. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.590-591, 2003.
- [2] 朝原, 川淵, 梶本, 川上, 館: テレイグジスタンスの研究 第37報, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.594-595, 2003.
- [3] 多田隈, 梶本, 川上, 館: テレイグジスタンスの研究 第36報, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.592-593, 2003.
- [4] 館, 榊: インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム( ), 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.3, pp.241-252, 1990.
- [5] N. Hogan: Impedance Control; An Approach to Manipulation, Part I, II, III. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.101, pp.1-24, 1985.
- [6] 古田, 小菅, 横山: ロボットの仮想内部モデル追従制御系, 計測自動制御学会論文集, Vol24, No.1, pp.55-62, 1988.
- [7] 小林他: ロボット制御の実際, 計測自動制御学会編, コロナ社, 1997.
- [8] 大西: 外乱オブザーバによるロボast・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.6-13
- [9] 宗玄他: テレイグジスタンスの研究 第40報, 日本機電学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 04講演論文集, 1P1-H-72, 2004.