

レイグジスタンス用人型スレーブアームの 冗長自由度を考慮したインピーダンス制御 レイグジスタンスの研究(第 40 報)

Impedance control of an anthropomorphic slave arm for teleexistence
in consideration of redundant degrees of freedom
Study on Teleexistence (XL)

宗玄 清宏, 中河原 修平, 朝原 佳昭, 多田隈 理一郎, 梶本 裕之, 川上 直樹, 舘 暉
東京大学大学院情報理工学系研究科

Kiyohiro Sogen, Shuhei Nakagawara, Yoshiaki Asahara, Riichiro Tadakuma,
Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami and Susumu Tachi
The University of Tokyo

Abstract: We introduce the mechanism and control method of an anthropomorphic slave arm developed for the next-generation robot TELESAR (TELE-existence Surrogate Anthropomorphic Robot). We decided upon a slave arm with anthropomorphic seven degrees of freedom in order to realize both precise manipulation and gesture communication. Impedance control was adopted in consideration of contact safety with humans. We first evaluated the impedance control only in the slave arm. Then, we performed unilateral master-slave control. Finally, we introduce a solution for the problem of redundant degrees of freedom using a small posture sensor.

Key Words: *Impedance Control, Master-slave control, Redundant degrees of freedom, Teleexistence*

1. はじめに

レイグジスタンスマスタ・スレーブシステムは操縦者の姿勢を読み取るマスタシステムと操縦者の分身となるスレーブロボットから構成される。本報告で開発した人型 7 自由度アームはこのスレーブロボットのアームにあたる。現在開発中の次世代レイグジスタンスロボット TELESAR [1]は臨場感のある作業に留まらず、身振り動作(ジェスチャ)を用いたコミュニケーションの実現をも目指している。このため、スレーブアームは人間と同じ自由度配置とした。

人間との協調作業、コミュニケーションを実現するためには、人間との接触安全性を考えなければならない。そこで本研究では手先のインピーダンスを動的に設定できるインピーダンス制御を実装する。また、本研究と並行して研究されているマスタアーム[2]を用いたユニラテラルマスタ・スレーブ制御を試み、その制御方法について検討する。また、スレーブアームの持つ冗長自由度への対処法についても検討する。

2. 機構

2.1 スレーブアーム

製作した人型 7 自由度スレーブアーム(以下スレーブ)の外観をFig. 1に示す。正確なジェスチャの再現を可能とするため 7 自由度の人間の腕と同じ自由度配置となっている。

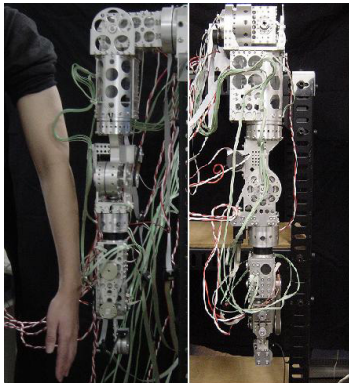


Fig. 1 Anthropomorphic slave arm with seven degrees of freedom

2.2 マスタアームと肘センサ

スレーブ 7 自由度に対し、マスタアーム(以下マスタ)も同型の 7 自由度とすれば、マスタの姿勢情報をそのままスレーブの制御に利用できるため自然である。しかしその場合、操縦者の腕関節軸とマスタ各軸の回転軸を合わせる必要から、一般に大掛かりな外骨格型システムとなってしまう。また操縦者の肘をマスタに拘束しなくてはならないため、操縦者の受ける拘束感や負担は大きくなる。そこで、マスタはFig. 2に示すように 6 自由度とした[2]。そして、操作者の腕の 7 自由度のうち手先の位置・姿勢の 6 自由度はマスタで計測可能であるが、残りの 1 自由度(肘の自由度に当たる)をFig. 3に示す小型の肘センサ[3]で計測する事とした。この肘センサは操縦者の肘に取り付け、重力加速度の方向を基に姿勢計測するもので、小型で軽量なため操縦者に拘束感を感じさせない。

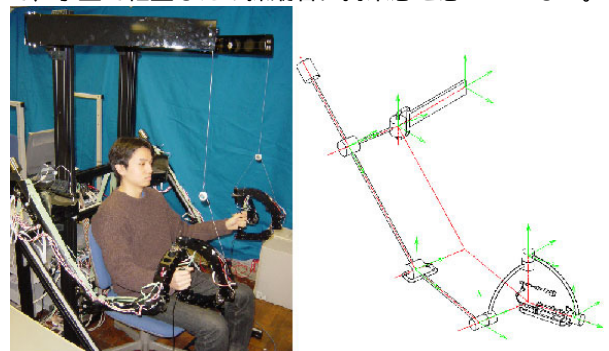


Fig. 2 Master arm with six degrees of freedom

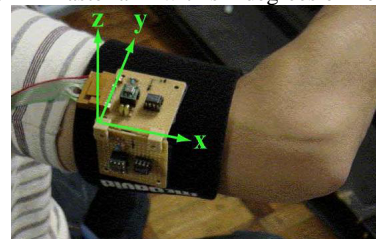


Fig. 3 Elbow sensor to measure additional degree of freedom

2. 制御理論

2.1 インピーダンス制御

アーム固有の動特性は式(1)のように表される。インピーダンス制御ではアクチュエータに与えるトルク τ を操作する事で、式(2)のように見かけ上、手先に目標インピーダンス (M_d, B_d, K_d) を動的に設定できる[4]。

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) - J^T F_{EXT} \quad (1)$$

$$F_{EXT} = M_d \ddot{X} + B_d (\dot{X} - \dot{X}_0) + K_d (X - X_0) \quad (2)$$

τ : アクチュエータへのトルク Θ : 関節角度 $M(\Theta)$: 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

F_{EXT} : 手先が受ける外力 (M_d, B_d, K_d) : 目標インピーダンス

X : デカルト座標系での手先の位置・姿勢

X_0 : 手先の目標位置・姿勢

インピーダンス制御の流れは以下の通り。

1. アームから関節角度 Θ 、関節角速度 $\dot{\Theta}$ 、手先が受ける外力 F_{EXT} を計測する。
2. 順運動学により、 Θ から手先の位置・姿勢 X を求め、 $\dot{X} = J\dot{\Theta}$ の関係から \dot{X} を求める。
3. インピーダンス関係式(2)から $\ddot{X}^* = M_d^{-1} F_{EXT} - M_d^{-1} B_d (\dot{X} - \dot{X}_0) - M_d^{-1} K_d (X - X_0)$ とインピーダンス関係式を満たす加速度 \ddot{X}^* を求める。
4. $\ddot{\Theta}^* = J^{-1} \ddot{X}^* - J^{-1} \dot{J} \dot{\Theta}$ の関係から角加速度 $\ddot{\Theta}^*$ を求める。
5. 運動情報と力情報 $(\ddot{\Theta}^*, \dot{\Theta}, \Theta, F_{EXT})$ からニュートン・オイラー法[5]を使って逆動力学計算を行い、各関節のアクチュエータに与えるトルク τ を求める。
6. τ をアクチュエータに与え、1.に戻る。

2.2 冗長自由度への対処

式(2)の手先の目標位置・姿勢 X_0 を $X_0 = X_M$ (X_M : マスタの手先の位置・姿勢) とすると、ユニラテラルマスタ・スレーブ制御を行う事ができる。しかし、本システムではスレーブが7自由度と冗長自由度を持つため、ヤコビアン J は 6×7 行列となり、正則とならない。インピーダンス制御ではヤコビアンの逆行列が必要であるため、そのままでは求まらない。そこで一般的によく使われるのが式(3)のような擬似逆行列を使った方法である。

$$\dot{\Theta} = J^T (JJ^T)^{-1} \dot{X} = J^\dagger \dot{X} \quad (3)$$

この方法を使うと手先の位置・姿勢を固定した場合 ($\dot{X} = 0, X = const$)、アームの姿勢も $\dot{\Theta} = 0, \Theta = const$ と固定されてしまう。しかし、人間は手先の位置・姿勢を固定した状態でも肘を動かす事ができるため、その肘の動きに追従できなくなる。また、擬似逆行列で求める $\dot{\Theta}$ は $\|\dot{\Theta}\|$ を最小にする解である。つまり関節をなるべく動かさないで手先の位置・姿勢を合わせる動きになる。このような動きでは、人間の身振り動作(ジェスチャ)の再現は不可能である。よって、この擬似逆行列を使う方法はレイグジスタンスロボットには不適当な方法であると考えた。そこで、本研究ではFig. 3の肘センサの情報と肩のYaw軸の関節角度と1対1対応させ、6自

由度インピーダンス制御 + 1自由度PD制御する事とした。このようにする事で、ヤコビアンは 6×6 行列と正則になる上に、操縦者の1自由度分の情報を付け加える事ができる。

3. 制御実験

3.1 インピーダンス制御実験

まずスレーブのみを用いたローカルなインピーダンス制御を実装し、確認のため以下の実験を行った。なお、肩のYaw軸の関節角度はPD制御により $0[\text{deg}]$ に固定した。Fig. 4に示すように基本姿勢から肘を $90[\text{deg}]$ 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. 4の赤丸部分)を目標位置 X_0 とした。アーム先端に x, y, z 方向のいずれか1方向に手で力を加え、目標位置 X_0 から $3[\text{cm}]$ 程度変位させたのち、手を離れた。手を離れた時刻を $t = 0$ とし、アーム先端の運動を記録した。インピーダンスパラメータ (M_d, B_d, K_d) を変化させ、アームの運動の実測値と各インピーダンスパラメータにおける理論値を比較した。

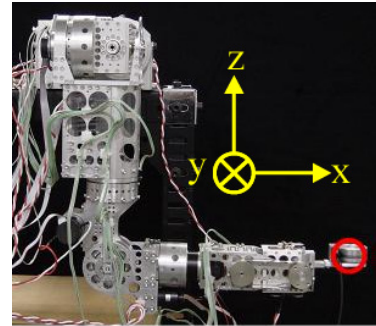


Fig. 4 Local impedance control experiment of the slave arm

3.1.1 実験結果

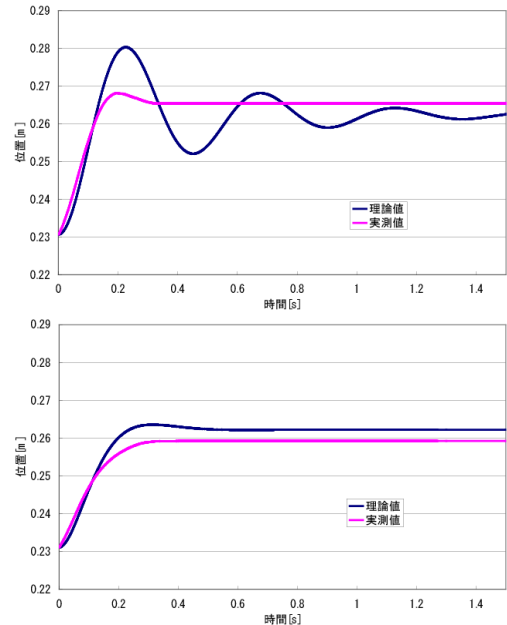


Fig. 5 Arm motion in x direction. (Top:

$M_d = 1.5[\text{kg}], B_d = 7.5[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}], K_d = 300[\text{N}/\text{m}]$

Bottom:

$M_d = 1.5[\text{kg}], B_d = 30[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}], K_d = 300[\text{N}/\text{m}]$)

x 方向について粘性 B_d を変化させた時の結果のみ Fig. 5 に示す。青色がインピーダンスパラメータから計算した理論値で、赤色が実測値である。7 自由度分のモデル化誤差の影響により、理論値に近づける事は困難であった。しかし、理論通りに Fig. 5 の上図で粘性が小さい時に見られたオーバーシュートが、Fig. 5 の下図で粘性を大きくすると消えた事からインピーダンス制御が実装できた事が確認された。

3.2 ユニラテラル マスタ・スレーブ制御実験

続いて、マスタと肘センサを用い、ユニラテラルマスタ・スレーブ制御を行った。マスタと肘センサをパッシブな情報提示装置として使い、スレーブに関しては 2.2 節で述べたように 6 自由度インピーダンス制御 + 1 自由度 PD 制御を行った。マスタの手先位置に対するスレーブの手先位置の追従性を確認した。ユニラテラルマスタ・スレーブ制御における情報の流れを Fig. 6 に示す。マスタで手先の位置・姿勢の 6 自由度を計測し、操縦者の残りの 1 自由度を肘センサで計測して、合わせて 7 自由度の位置・姿勢情報を計測する事となる。

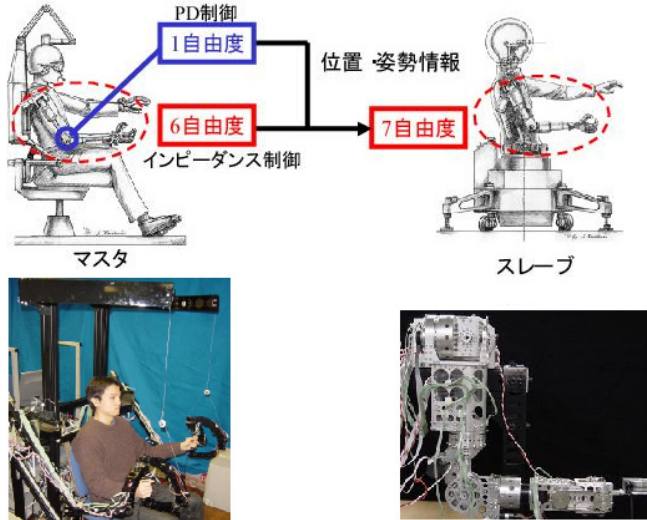


Fig. 6 Information flow in unilateral master-slave control

3.2.1 実験結果

x 方向についてのみ Fig. 7 に結果を示す。青色がマスタの手先位置、赤色がスレーブの手先位置である。

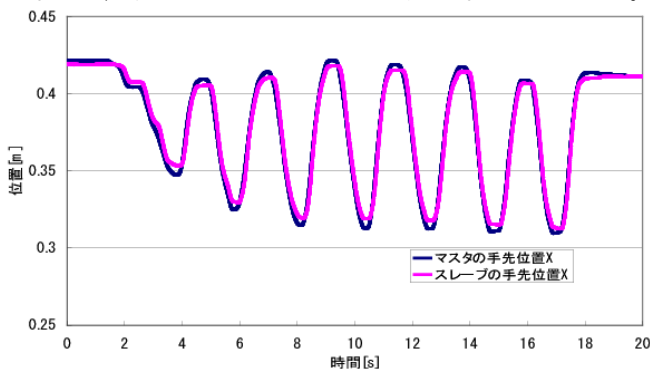


Fig. 7 Accuracy of following ability in master-slave control

位置が極値を取る所では最大 7[mm]程度のずれが生じた。これは与えるトルクの方が反転する所なので摩擦項のモデル化誤差の影響が最も大きいと考えられる。しかし、定常偏差は 3[mm]程度であり、人間はこのレベルの手先の細かな作業では視覚フィードバックを用いている事を考えると、将来的

にマスタ・スレーブシステムの視覚系を開発する事で対応可能であると思われる。また、2.2 節で述べたように、6 自由度インピーダンス制御 + 1 自由度 PD 制御する事で、操縦者が手先の位置・姿勢を固定して肘を動かした場合でも、スレーブは操縦者の肘の動きに合わせて動く事が確認できた。

4. まとめ

開発した人型 7 自由度アームにインピーダンス制御を実装し、アームの運動を確認した。ユニラテラルマスタ・スレーブ制御では、マスタに対するスレーブの追従性はトレイグジスタンスロボットとして十分であると確認できた。その中でスレーブの有する冗長自由度に対し、従来のように擬似逆行列を用いるのではなく、小型の姿勢センサの情報を使い、6 自由度インピーダンス制御 + 1 自由度 PD 制御を行った。これにより、操縦者の肘の自由度へも対応可能となった。今後、マスタとスレーブのインピーダンス値を合わせてバイラテラル制御をするというインピーダンス制御型マスタ・スレーブ制御[6][7]により、スレーブアームの受けた力を正確に操縦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] 中河原, 多田隈, 梶本, 川上, 館: テレイグジスタンスの研究 第38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.596-597, 2003.
- [4] 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.
- [5] J. J. Craig: ロボティクス, 共立出版, 1991.
- [6] 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.
- [7] 井上, 館, 荒井: マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一手法. 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.490-500, 1992.