

介在インピーダンスによるスレーブロボットの可動域提示 —トレイグジスタンスの研究（第52報）—

Motion Space Presentation of a Slave Robot by Intervening Impedance -Study on Telexistence (LII)-

○渡邊 孝一（東大） 宗玄 清宏（東大）
川上 直樹（東大） 正 館 暉（東大）

Kouichi WATANABE, the University of Tokyo, Kouichi_Watanabe@ipc.i.u-tokyo.ac.jp
Kiyohiro SOGEN, the University of Tokyo
Naoki KAWAKAMI, the University of Tokyo
Susumu TACHI, the University of Tokyo

Our ideal goal of the telexistence master-slave system is to operate various types of slave robot by one universal master system at will. If a master system was designed universally, singular configurations of a slave robot will be included in motion space. On the other hand, the intervening impedance appears in master-slave system. In the past, many researchers tried to remove the effect of the intervening impedance because it impairs operational feeling. Now, we try to make effective use of it. Then we proposed an avoidance method of singular configuration in a master-slave system. We maintained the parameters of intervening impedance using the manipulability ellipsoid. As a result, proposed method made the avoidance of singular configurations possible.

Key Words: Telexistence, Singular configuration, Intervening impedance, Manipulability ellipsoid

1. 緒言

我々は遠隔操縦や遠隔コミュニケーションにおいてあたかもロボットの存在する環境に居るような高度な臨場感を持つ技術をトレイグジスタンスと呼び、本技術の研究を行っている。トレイグジスタンスの理想は一つの汎用的なマスタシステムから様々な場所にある様々な形態のスレーブロボットを操作できることである。そのための汎用的なマスタシステムは、対象とする全てのスレーブロボットの可動範囲をカバーするように設計されていなければならないが、特異姿勢[1]もその可動範囲に含まれてしまう。

この特異姿勢を回避する問題は、遠隔操縦ロボットシステムに限らず、全てのロボットに生じる問題である。特異姿勢回避方法はいくつか考えられるが、回避のための情報を生成して提示するプロセスを出来るだけ効率よく行う必要がある。

マスタスレーブシステムにおいて相互に情報をやり取りするために用いるバイラテラル制御では、マスタとスレーブの間の環境境界に見かけ上のインピーダンス関係、すなわち介在インピーダンス[2]が発生する。操作者は介在インピーダンスを介して遠隔環境にインタラクションすることになり、一般的には操作性が損なわれる。よって介在インピーダンスはできるだけ現れないようにシステムを構築する必要がある。Tachi ら[3]は介在インピーダンスを制御パラメータにより調整可能な手法であるインピーダンス制御型バイラテラル制御手法を提案した。この手法により、介在インピーダンスの影響を殆ど受けないシステムを実現することが出来る。

介在インピーダンスの影響を大きくすると、操作者はスレーブロボットを動かすために大きな力が必要となり、操作が困難になる。これを利用し、特異姿勢近傍において介在インピーダンスを大きくすることで特異姿勢回避を試みる。

本稿では可操作楕円体に基づき介在インピーダンスを変化させることでスレーブロボットの特異姿勢回避を行う手法を提案する。また、本手法を実機に適用して特異姿勢回避が可能であることを示す。

2. 介在インピーダンスを利用した特異姿勢回避手法

インピーダンス制御型バイラテラル制御における介在イン

ピーダンスの関係式を以下に示す。

$$\begin{aligned} F_s - F_m &= \hat{m}\ddot{X}_{ms} + \hat{b}\dot{X}_{ms} + \hat{k}X_{ms} \\ \hat{m} &= \frac{2M_d(1-k_m)}{1+k_f}, \hat{b} = \frac{2B_d(1-k_b)}{1+k_f} \\ \hat{k} &= \frac{2K_d(1-k_k)}{1+k_f}, X_{ms} = \frac{X_m + X_s}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 X_m, X_s はマスタとスレーブの手先位置である。 M_d, B_d, K_d は設定インピーダンスパラメータ、 k_f, k_m, k_b 、および k_k は力、加速度、速度、位置ゲインであり、これらは安定性を維持しつつ自由に変更できる。これらのパラメータを調整することで介在インピーダンスを変更することが出来る。

インピーダンスパラメータを変更するためには、何らかの指標が必要となる。我々はこの指標を与えるために、可操作性楕円体[4]を利用する。可操作性楕円体の主軸の長さや方向を利用し、インピーダンス制御型バイラテラル制御における介在インピーダンスを調整する手法を提案する。具体的には主軸長は特異姿勢遠方では長く特異姿勢近傍では短くなるので、これを利用し主軸長が長いときは通常インピーダンスパラメータを与え、短くなるにつれて徐々に増加するように変化させる。また、インピーダンスパラメータを力の方向に応じて設定することで、特異姿勢からの戻り動作も実現する。

3. 実装

実装には我々の研究室で開発されたトレイグジスタンスマスタスレーブシステム“TELESARII”を利用した。マスタとスレーブはそれぞれ一組の6自由度外骨格アームと7自由度人型アームを持つ。特異姿勢を評価する際に必要なスレーブアームの上腕寸法は0.32[m]であり、前腕寸法は0.25[m]である。システム全体の構成図を図2に示す。

Yoshikawa らの手法[4]で与えられる可操作性楕円体の主軸長を利用してインピーダンスパラメータを変更する。パラメータ変更のために以下のような重み関数を利用する。

$$weight = \exp\left(\frac{k}{a^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 k は定数で、 a は楕円の主軸長を表す。

軸の長さを(2)式に入力として与え、得られた値をインピーダンスパラメータの重みとして掛け合わせる。この関数は特異姿勢遠方ではほぼ 1.0 を返すため、初期インピーダンスパラメータが適用される。特異姿勢近傍になると値が指数的に増加しインピーダンスパラメータが増加するため、操作者が特異姿勢をとることを回避出来る。

実験装置を図 2 に示す。また、座標軸を図 4 に示すように設定する。肘関節における特異姿勢を評価するため、操作者は X 方向にのみアームを動かす。力情報の評価を簡単にするため、手先の速度および加速度が出来るだけ小さくなるようにアームを動かす。

また、(1)式に現れるインピーダンスパラメータ M_d, B_d, K_d はそれぞれ 1.0[kg], 21.2[Ns/m], 50.0[N/m] とした。これらのパラメータは介在インピーダンスを決定するため、可操作性楕円の値により変化するパラメータである。また、送りあう情報にかかるゲイン k_p, k_m, k_b および k_k はそれぞれ 0.5, 0.5, 0.5, 1.0 とした。介在インピーダンスパラメータの一つである剛性 k は特に操作性に影響が大きいので、0 にする必要がある。そのため、ゲイン k_k のみ 1.0 となっている。

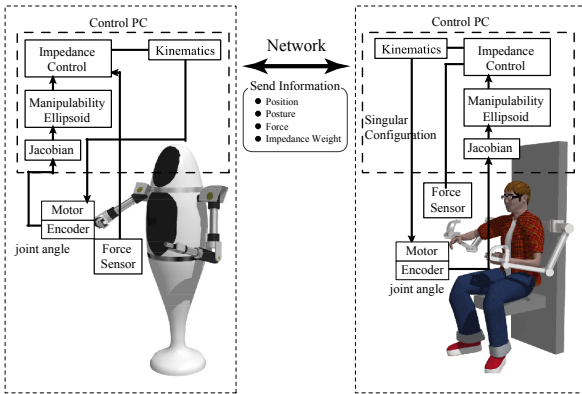


Fig. 1: System configuration

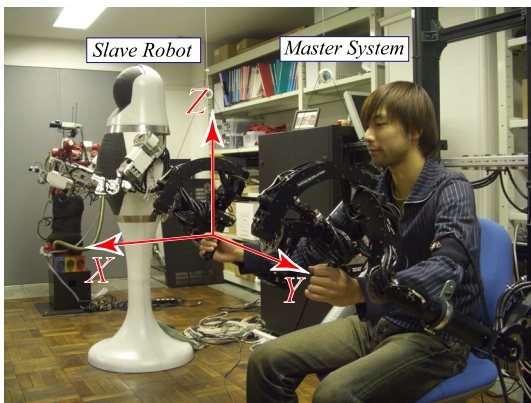


Fig. 2: Experimental setup

4. 結果

図 3 に提案手法をシステムに適用した際の特異姿勢近傍における介在インピーダンスパラメータを示す。また、図 4 に特異姿勢近傍における操作力を示す。それぞれ、横軸に手先の X 方向位置、縦軸に操作力および介在インピーダンスの値を示す。

図 3 に見られるように、介在インピーダンスパラメータ値は特異姿勢に近づくにつれて激しく増加している。その結果、図 4 に見られるように操作に必要な力は特異姿勢に近づくに

連れて大きくなっている。0.4[m]付近では必要な操作力はおおよそ 1.0[N]であるのに対し、0.53[m]付近では必要な操作力はおおよそ 14.0[N]である。スレーブアームの寸法より、腕の特異点はおおよそ 0.57[m]であるため、明らかにアームが特異姿勢に向かうことが難しくなっているといえる。一方、特異姿勢から離れるために必要な操作力は小さく一定であることがわかる。

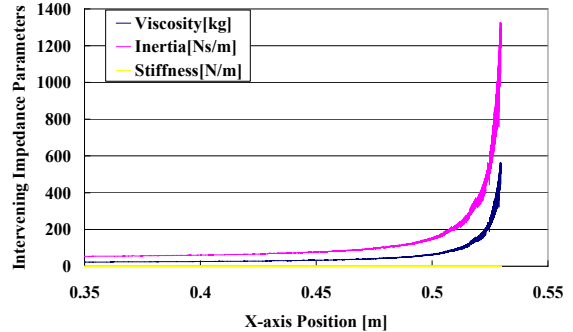


Fig. 3: Change of intervening impedance parameter

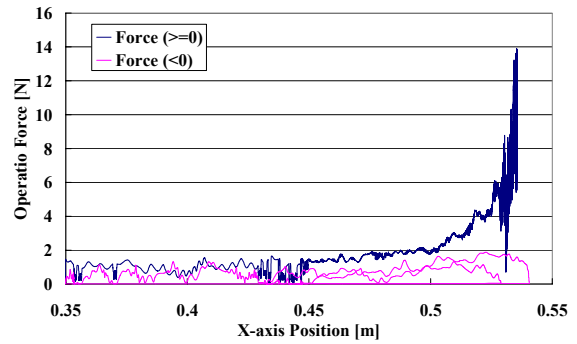


Fig. 4: Control force of the operator

5. 結論

我々はロボットの特異姿勢を回避するために、バイラテラルマスタスレーブシステムに存在する介在インピーダンスを利用する手法を提案した。本手法により、可操作性楕円体をインピーダンス制御型バイラテラル制御に適用することで特異姿勢を回避することが出来る。

本手法の有効性を検証するため、トレイグジスタンスマスタスレーブシステムに本手法を実装し動作実験を行った。その結果、介在インピーダンスパラメータが特異姿勢付近で上昇し、操作に必要な力を増加させることで、操作者が特異姿勢を回避できることを確認した。

今後は、他の特異姿勢回避手法との比較を行う必要がある。さらに汎用的マスタシステムにおける有効性をアプリケーションも含めた上で定量的に評価する。そして、人間がより自然に特異姿勢を認識できる提示手法を考えることで、汎用的マスタシステムの完成を目指す。

文献

- [1] Nazareth S. Bedrossian, "Classification Of Singular Configurations For Redundant Manipulators", In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 13-18, 1990, pp. 818-823
- [2] Yasuyoshi Yokokohji and Tsuneo Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.10, No.5, 1994, pp.605-620
- [3] Susumu Tachi and Taisuke Sakaki, "Impedance Controlled Master-slave Manipulation System. Part I. Basic Concept and Application to the System with a Time Delay", *Advanced Robotics*, Vol.6, No.4, 1992, pp.483-503
- [4] Tsuneo Yoshikawa, "Dynamic Manipulability of Robotic Mechanism", *Journal of Robotic Systems*, Vol.12, No.1, 1985, pp.113-124