

通信遅延を考慮したマルチロボット遠隔操作システムの触覚伝達性能に関する研究

A Study on Performance of Multi-robot Teleoperation System

for Tactile Communication

Taking Communication Time Delay into Account

80717954 山口朗 (Akira Yamaguchi) Supervisor: 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

近年、人間の五感の一つである触覚を遠隔地にいる多くの人々に伝えるアプリケーションが検討されている。そのアプリケーション例として触覚を用いた遠隔教育などが考えられている。本論文で想定する触覚を用いた遠隔教育システムでは、指導者、訓練者、環境の三者で各々のロボットを介して動作指導を行う。長距離間の遠隔教育については通信ネットワークを介したシステムを考慮する必要があるが、従来の研究では、通信ネットワークによって生じる遅延が考慮されていない場合が多かった。また、触覚伝達性能の評価は十分に行われていない。

本論文では、まず従来バイラテラル制御で定義されている再現性と操作性という2つの触覚伝達性能をマルチロボット遠隔操作システムに拡張する。再現性および操作性とは、それぞれ環境を操作者で再現する度合い、ロボットが環境と非接触時に操作者が感じる操作力の大きさを表す。次に、定義した再現性および操作性の評価指標を用いてマルチロボット遠隔操作システムに対する通信遅延の影響を検証し、操作性を改善する手法を提案する。

2 マルチラテラル制御系

本章では、マルチロボット遠隔操作システムの制御系として用いるマルチラテラル制御系について説明する。マルチラテラル制御とは、一対のマスターロボットおよびスレーブロボットで作用・反作用の法則に基づき力覚を双方向に伝えるバイラテラル制御を1対多もしくは多対多の力覚伝達に拡張した制御である。N台のロボットにおけるマルチラテラル制御系を図1および(1)式に示す。

$$\begin{cases} \ddot{x}_1^{ref} = C_p \left(\frac{1}{N} (x_1^{res} + x_2^{res} + \dots + x_N^{res}) - x_1^{res} \right) \\ \quad - C_f (\hat{f}_1^{rea} + \hat{f}_2^{rea} + \dots + \hat{f}_N^{rea}) \\ \ddot{x}_2^{ref} = C_p \left(\frac{1}{N} (x_1^{res} + x_2^{res} + \dots + x_N^{res}) - x_2^{res} \right) \\ \quad - C_f (\hat{f}_1^{rea} + \hat{f}_2^{rea} + \dots + \hat{f}_N^{rea}) \\ \vdots \\ \ddot{x}_N^{ref} = C_p \left(\frac{1}{N} (x_1^{res} + x_2^{res} + \dots + x_N^{res}) - x_N^{res} \right) \\ \quad - C_f (\hat{f}_1^{rea} + \hat{f}_2^{rea} + \dots + \hat{f}_N^{rea}) \end{cases} \quad (1)$$

x^{res} , \hat{f}^{rea} , \ddot{x}^{ref} はそれぞれ位置応答、力応答、加速度参照値を示す。下付き文字 i ($i = 1, 2, \dots, N$) は図1における Robot i を示す。また、図1における Robot i System はモータに加わる外乱を推定し補償する外乱オブザーバ (DOB) および力センサレスで環境反力を推定する反力推定オブザーバ (RFOB) を含んでいる。また、N台のロボットにおけるマルチラテラル制御系における目標式を(2)式および(3)式に示す。

$$x_1^{res} = x_2^{res} = \dots = x_N^{res} \quad (2)$$

$$\hat{f}_1^{rea} + \hat{f}_2^{rea} + \dots + \hat{f}_N^{rea} = 0 \quad (3)$$

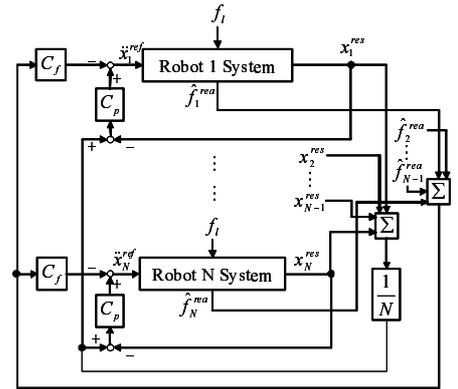


図1: N台のロボットにおけるマルチラテラル制御系

3 再現性および操作性の定義

本章では、従来バイラテラル制御で定義されていた再現性および操作性をマルチロボット遠隔操作システムに拡張する。マスターロボットが K 台、スレーブロボットが $N - K$ 台存在し、環境を Robot $K + 1$ のみに置くものとする。Robot 1 の操作者を基準としたマルチロボット遠隔操作システムにおける再現性と操作性の評価指標 P_r , P_o を(4)式で定義する。

$$F_1 = -(P_r Z_e + P_o) X_1 \quad (4)$$

X , F , Z_e はそれぞれ位置、力、環境インピーダンスを表す。任意の周波数 ω において、(5)式のように Robot 1 以外のマスターロボットの力 $F_2(\omega), \dots, F_K(\omega)$ を Robot 1 の力 $F_1(\omega)$ に対する比で表す。

$$F_i(\omega) = A_i(\omega) e^{B_i(\omega)} F_1(\omega), \quad i = 2, \dots, K \quad (5)$$

一方、スレーブロボットの力 $F_{K+1}, F_{K+2}, \dots, F_N$ は(6)式および(7)式で表される。

$$F_{K+1} = Z_e X_{K+1} \quad (6)$$

$$F_{K+2} = \dots = F_N = 0 \quad (7)$$

(2)式-(7)式より、マルチロボット遠隔操作システムにおける $P_r(\omega)$, $P_o(\omega)$ の目標値はそれぞれ(8)式および(9)式で表される。

$$P_r(\omega) = \frac{1}{1 + A_2(\omega) e^{B_2(\omega)} + \dots + A_K(\omega) e^{B_K(\omega)}} \quad (8)$$

$$P_o(\omega) = 0 \quad (9)$$

N台のマルチロボット遠隔操作システムにおいて制御系内のノミナル質量 M_n を変えた場合の解析結果を図2に示す。図2より再現性についてはどの条件においてもほとんど変化はなかったが、ノミナル質量とモータのシャフトにおける質量 M が違う場合、システム全体のロボットの台数が増大すると操作性の値が大きくなるのが分かる。

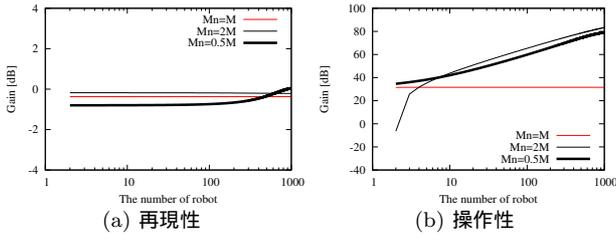


図 2: ノミナル質量を変えた場合の再現性および操作性

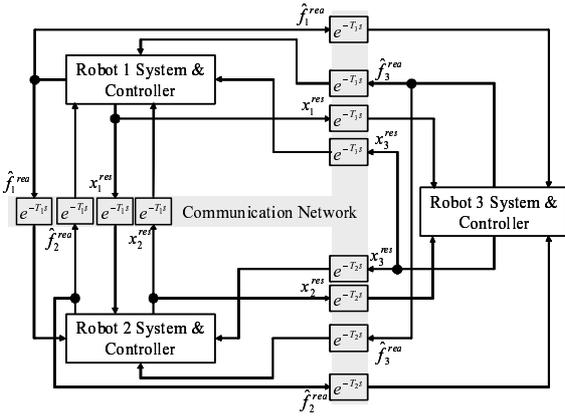


図 3: 通信遅延を含むマルチロボット遠隔操作システム

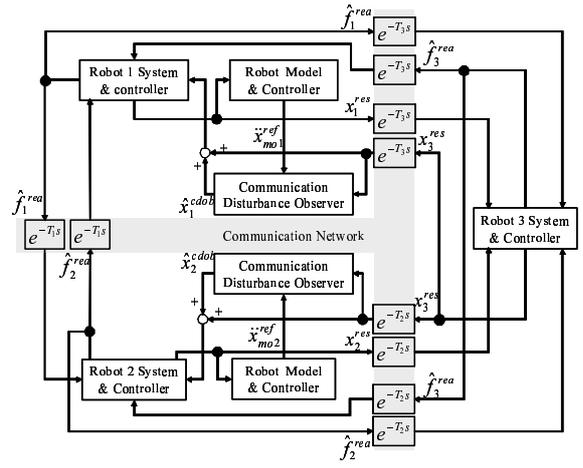


図 5: 提案手法

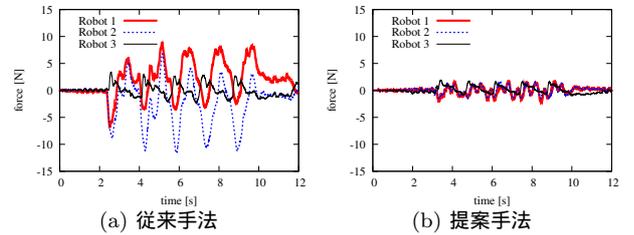


図 6: 環境との非接触時の力応答の実験結果

4 通信遅延を考慮した場合の再現性および操作性

本章では、通信遅延を考慮した場合の再現性および操作性について検証する。本章以降は、触覚を用いた遠隔教育システムを想定し、マスターロボットを 2 台 (Robot 1 と Robot 2)、スレーブロボットを 1 台 (Robot 3) とする。検証対象のシステムを図 3 に示す。図 3 で表されるシステムにおける各ロボット間の片道通信遅延の値に対する再現性および操作性の解析結果を図 4 に示す。

図 4 より、各ロボット間の片道通信遅延が大きくなる程、再現性の値は小さくなり、操作性の値は大きくなる事が分かる。

5 通信遅延を考慮した場合の操作性を改善する手法

本章では、通信遅延を考慮した場合の操作性を改善する手法を提案する。提案手法を図 5 に示す。提案手法はマスターロボットとスレーブロボット間の通信遅延を補償するために通信外乱オブザーバを用いており、さらに 2 台のマスターロボット間の位置信号を除去している。

提案手法の有効性を実験にて示す。実験では、一軸のリニア

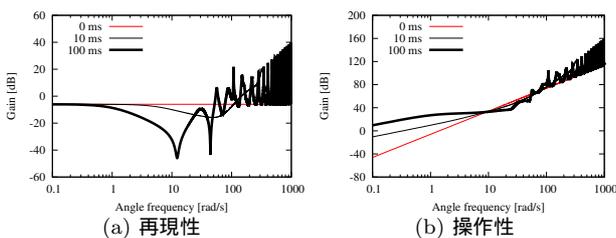


図 4: 片道通信遅延の値に対する再現性および操作性

6 結論

本論文では、従来バイラテラル制御で定義されていた再現性および操作性をマルチロボット遠隔操作システムに拡張し、通信遅延がシステムに及ぼす影響を検証した。そして、通信遅延が存在する場合の操作性を改善する手法を提案した。実験により、提案手法の有効性を確認した。本論文で提案した内容はロボット間の距離が長距離である場合の遠隔教育システム等に適用可能であると考えられる。

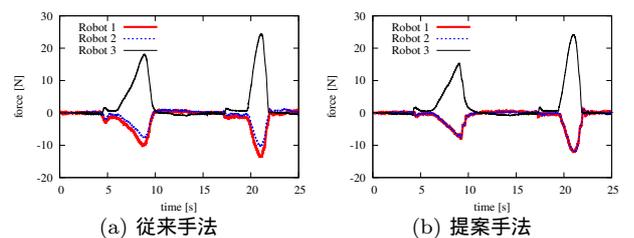


図 7: 環境との接触時の力応答の実験結果