



力覚を用いた遠隔ロボットシステム間の 協調作業における安定化制御の比較

田口 英次郎[†], 石橋 豊[†], 黄 平国^{††}, 立岩佑一郎[†]

[†]名古屋工業大学, ^{††}星城大学

電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会

2018年 9月 3日 名城大学

背景

力覚を用いた遠隔ロボットシステムに関する研究が注目

- 物体の形状, 柔らかさ, 重さなどを伝達することが可能であるため, 作業効率の向上や高精度化が期待
- システムを複数用いて協調作業を行うことで, 物体を運んだり手渡したりするなどの様々な作業が可能

QoS(Quality of Service)
保証のないネットワーク
を介して力覚情報を伝送

ネットワーク遅延など

- ユーザ体感品質
(QoE: Quality of Experience)の劣化
- ロボット動作の
安定性が損失

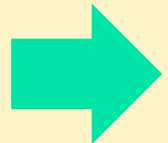
QoS制御と安定化制御が必要

目的(1/2)

- *1 有馬 他, 信学技報, CQ2017-98, Jan. 2018.
- *2 力石 他, 信学技報, MVE2017-19, Sep. 2017.
- *3 黄 他, 信学技報, CQ2017-79, Nov. 2017.
- *4 Q. Qian *et al.*, IEICE Technical Report, CQ2018-27, May/June 2018.
- *5 田口 他, 信学総大, B-11-17, Mar. 2018.

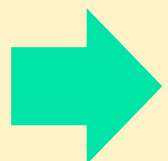
従来研究

- 力覚を用いた遠隔ロボットシステムを対象に, 柔らかさの異なるボールを押し作業に対し, システムの安定化制御として, 衝突時反力制御^{*1}, 粘性による安定化制御^{*2}, フィルタによる安定化制御^{*3}の三つの制御を比較^{*4}



柔らかさによって有効な安定化制御が異なる

- 同じシステムを二つ用いて, 一つの物体を二つのロボットアームで, 一緒に持って動かす作業に対し, ネットワーク遅延が作業に及ぼす影響を調査^{*5}



ネットワーク遅延が大きくなると, システムの不安定現象が生じる

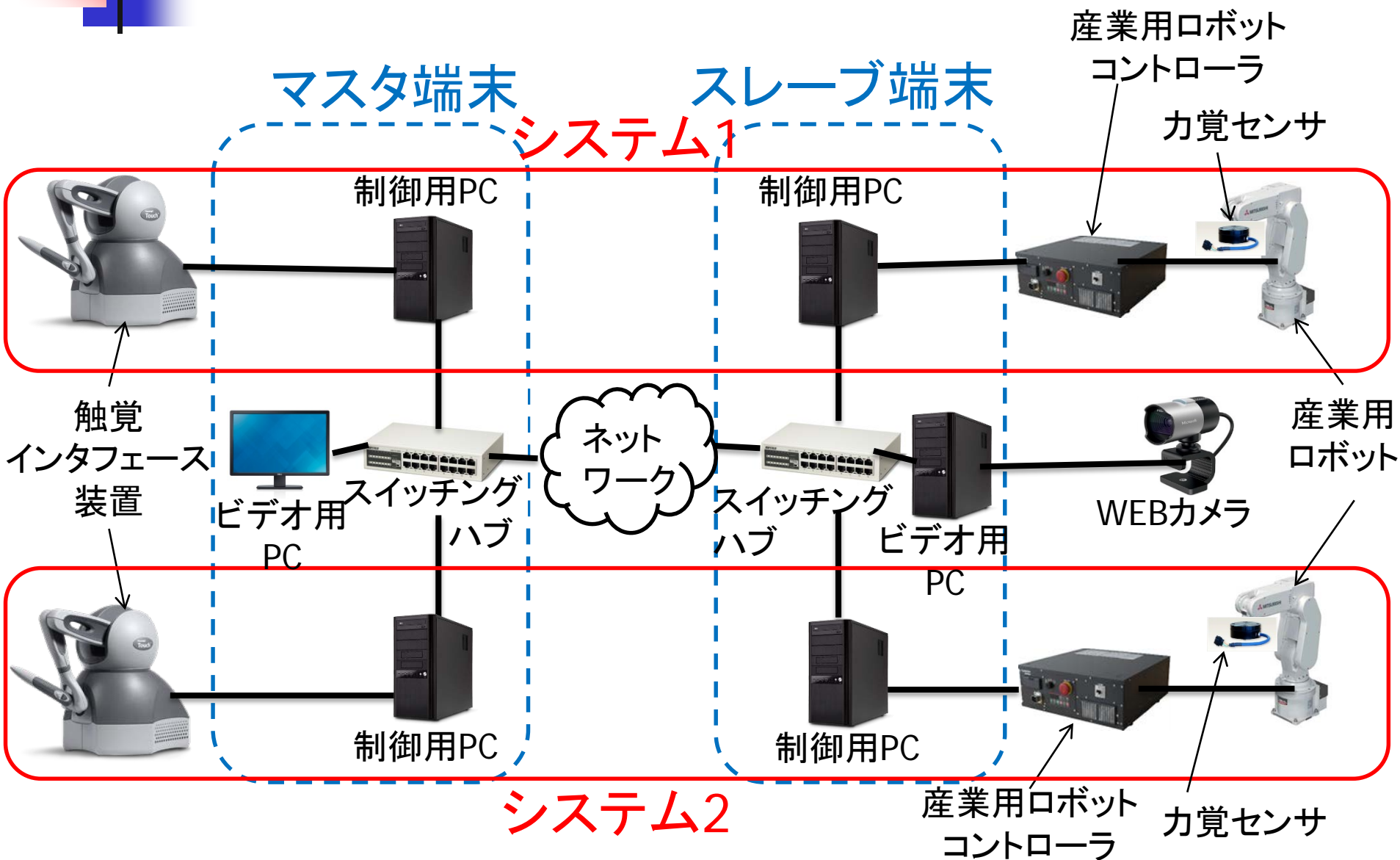


目的(2/2)

本研究

- 衝突時反力制御, 粘性による安定化制御, フィルタによる安定化制御の三つの制御を, 二つの力覚を用いた遠隔ロボットシステムに適用し, 反力を感じながら, 物体と一緒に動かす作業を扱う
- 実験によって, どの安定化制御が最も有効かを調査する

システム構成



位置と力の計算方法 (安定化制御無し)

ロボットの位置

$$\mathbf{s}_t^{(m)} = \begin{cases} \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{t-1} & (\mathbf{V}_{t-1} \leq V_{\max}) \\ \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + V_{\max} \frac{\mathbf{V}_{t-1}}{|\mathbf{V}_{t-1}|} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$\mathbf{s}_t^{(m)}$: 時刻 t (≥ 2) における産業用ロボットの位置ベクトル

\mathbf{V}_t : 時刻 t (≥ 2) における産業用ロボットの速度ベクトル

V_{\max} : 産業用ロボットの最大移動速度 (5mm/s)

マスタ端末で出力される力

$$\mathbf{F}_t^{(m)} = K_{\text{scale}} \mathbf{F}_{t-1}^{(s)}$$

力覚センサの値に、マスタ端末で一定の倍率 $K_{\text{scale}} (> 0)$ をかけて触覚インタフェース装置によって反力を提示

$\mathbf{F}_t^{(m)}$: 時刻 t (≥ 1) にマスタ端末で出力される反力

$\mathbf{F}_t^{(s)}$: 時刻 t (≥ 1) にマスタ端末がスレーブ端末から受信した力

粘性による安定化制御

ロボットの位置

$$\mathbf{s}_t^{(m)} = \begin{cases} \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{t-1} - \mathbf{C}_d \left(\mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{s}_{t-2}^{(m)} \right) & (\mathbf{V}_{t-1} \leq \mathbf{V}_{\max}) \\ \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{\max} \frac{\mathbf{V}_{t-1}}{|\mathbf{V}_{t-1}|} - \mathbf{C}_d \left(\mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{s}_{t-2}^{(m)} \right) & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

産業用ロボットの移動量を速度に比例する一定量だけ減じることによって、粘性を生じさせる

マスタ端末で出力される力

$$\mathbf{F}_t^{(m)} = K_{\text{scale}} \mathbf{F}_{t-1}^{(s)}$$

安定化制御無しと同じ

衝突時反力制御

ロボットの位置

$$\mathbf{s}_t^{(m)} = \begin{cases} \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{t-1} & (\mathbf{V}_{t-1} \leq \mathbf{V}_{\max}) \\ \mathbf{s}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{\max} \frac{\mathbf{V}_{t-1}}{|\mathbf{V}_{t-1}|} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

安定化制御無しと同じ

マスタ端末で出力される力

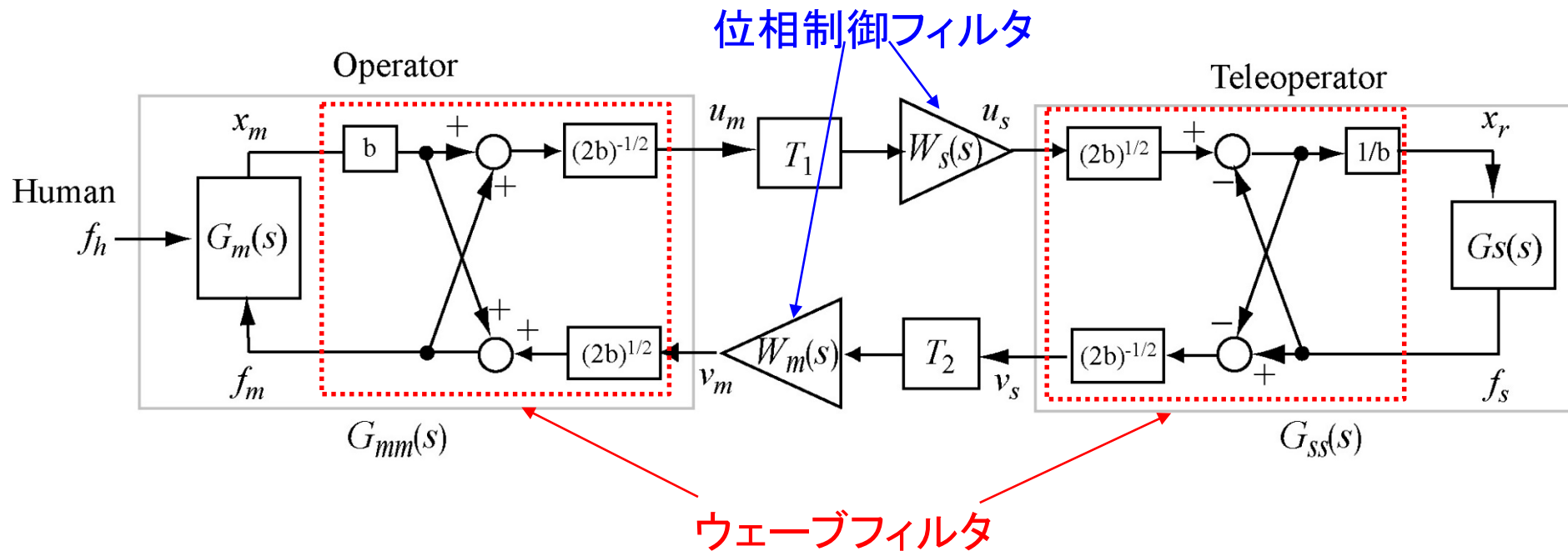
$$\mathbf{F}_t^{(m)} = \begin{cases} K_{\text{scale}} (\mathbf{F}_{t-1}^{(m)} + K_i \mathbf{F}_{\text{th}}) & (|\mathbf{F}_{t-1}^{(m)} - K_{\text{scale}} \mathbf{F}_{t-1}^{(s)}| > |\mathbf{F}_{\text{th}}|) \\ K_{\text{scale}} \mathbf{F}_{t-1}^{(s)} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

直前にマスタ端末で出力した力と、力覚センサが検知した反力の差が閾値を超える場合、触覚インタフェース装置が出力する反力の増加量を徐々に大きくして、緩やかに反力を増大しながら出力

\mathbf{F}_{th} : 閾値 (0.003 N/ms)

K_i : $1.000 + 0.001i$ ($i \geq 1$)

フィルタによる安定化制御



$G_m(s)$: マスタの伝達関数

$G_s(s)$: スレーブの伝達関数

x_m : マスタの位置

x_s : スレーブへの位置の指令値

f_m : マスタが操作者に伝える力

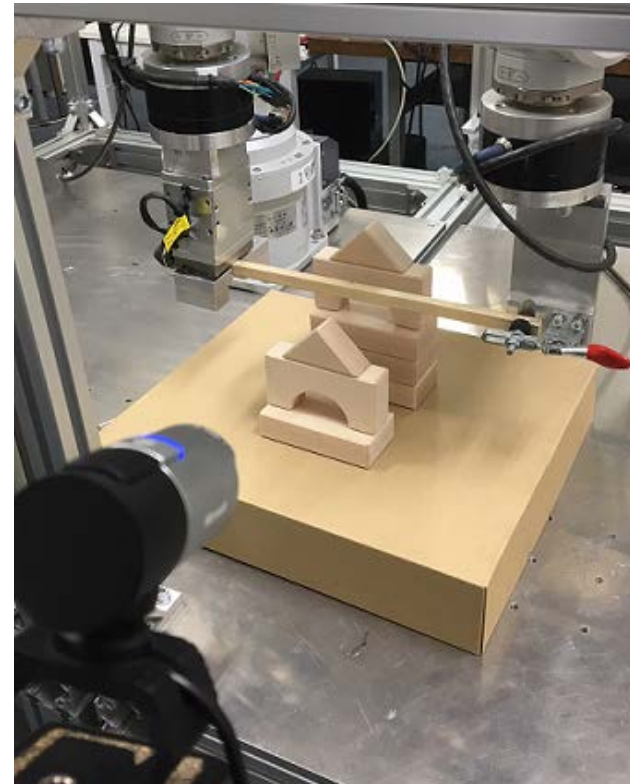
f_s : スレーブが受ける力

f_h : 操作者の意図した力

T_1, T_2 : ネットワーク遅延

実験方法(1/2)

- 右下の図のように、実験開始前に二つの産業用ロボットアームで把持された角材の初期位置の前後に積み木を積み上げ、一人の利用者が両手で触覚インタフェース装置を用いて、二つの積み木の一番上の積み木のみを押して落とす作業^{*5}
- 手前の積み木を5秒、奥の積み木を15秒の時間で落とすように、時間を計りながらできるだけ同じ速度で動かす
- より安定な動作を確保するため、産業用ロボットを左右方向には動かないように設定





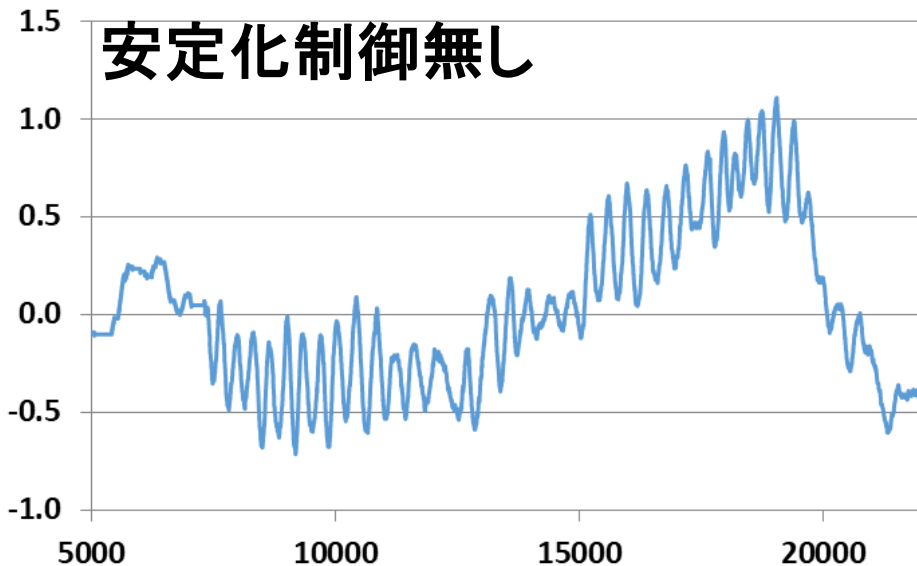
実験方法(2/2)

- 触覚インタフェース装置と産業用ロボットアームの移動距離の比率は2:1, 力の比率は1:2
- 二つのマスタ端末と二つのスレーブ端末をネットワークエミュレータを介して接続し, 転送される各パケットに対して双方向に同じ固定遅延を付加(付加遅延と呼ぶ)
- 安定化制御を行わない場合, 粘性による安定化制御, 衝突時反力制御, フィルタによる安定化制御を適用する場合に対して実験を行い, 触覚インタフェース装置で出力される反力を調査

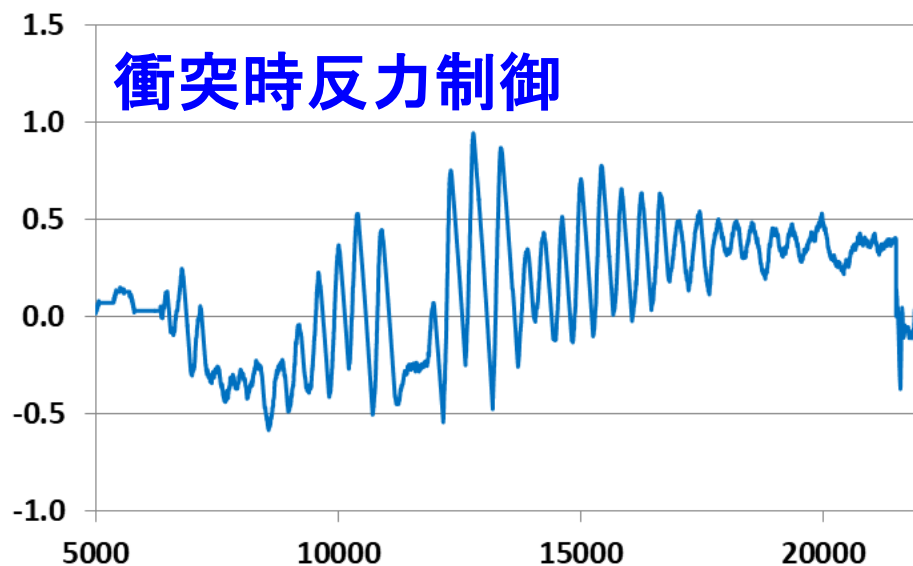
実験結果(1/2)

(経過時間[ms]に対する反力[N])

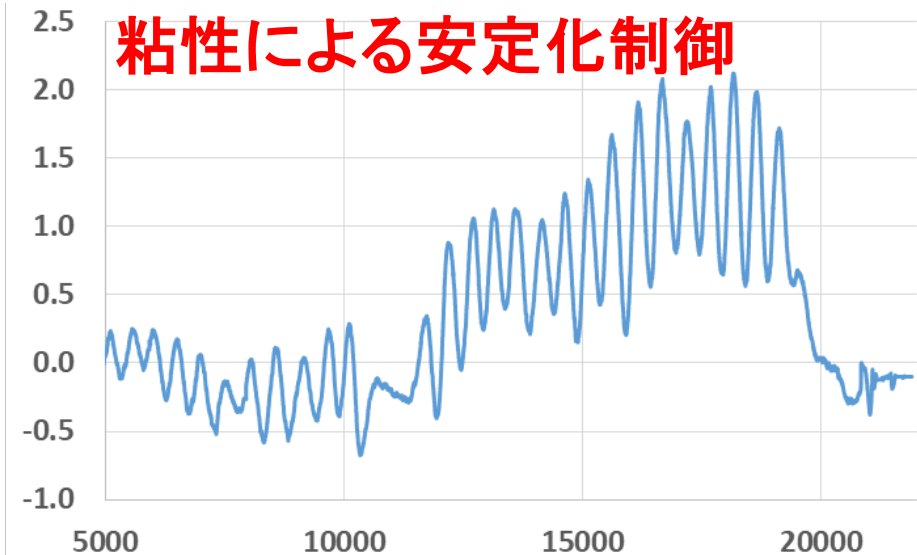
安定化制御無し



衝突時反力制御



粘性による安定化制御



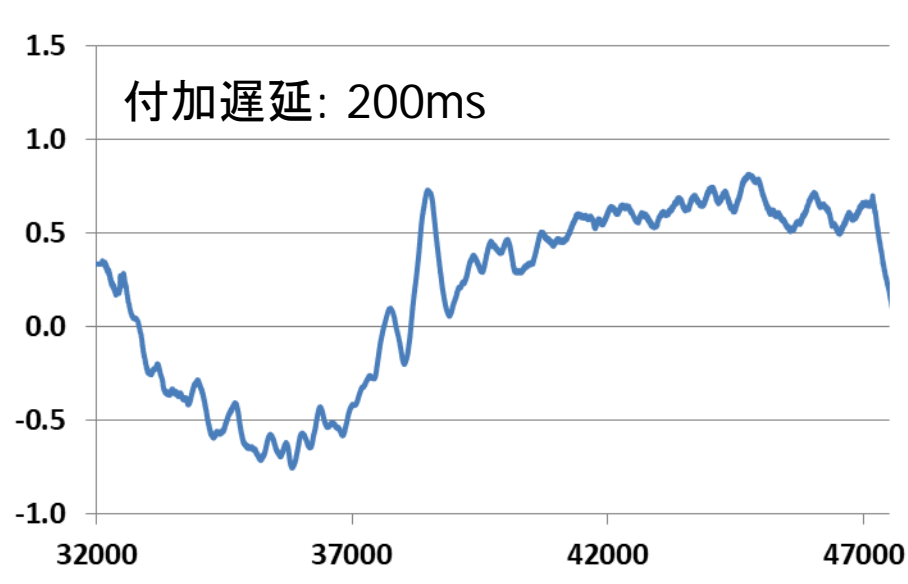
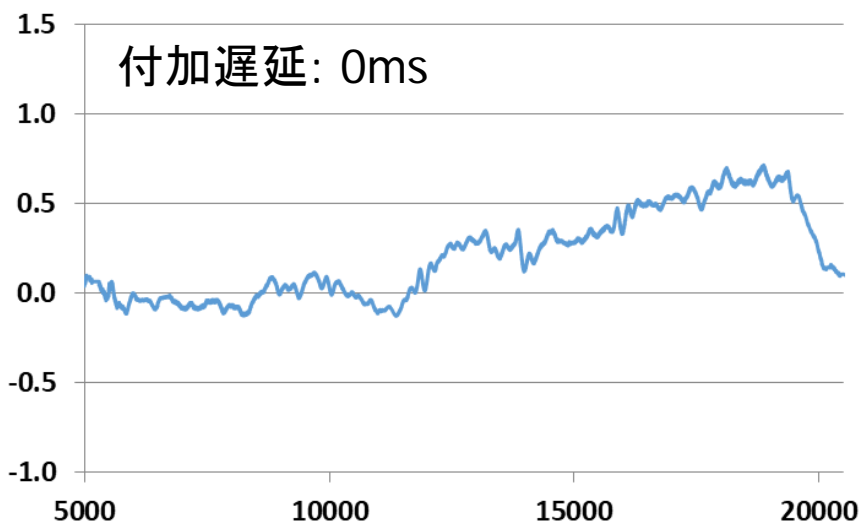
フィルタによる安定化制御



実験結果(2/2)

(経過時間[ms]に対する反力[N])

フィルタによる安定化制御



少なくとも約800msまで安定性が保たれる



結論

- 衝突時反力制御, 粘性による安定化制御, フィルタによる安定化制御の三つの制御を, 二つの力覚を用いた遠隔ロボットシステムに適用し, 反力を感じながら, 物体を一緒に動かす作業を扱った
- 実験によって, どの安定化制御が最も有効かを調査した



- フィルタによる安定化制御が最も有効である
- フィルタによる安定化制御を用いることで, ネットワーク遅延を約800msまで大きくしても安定性が保たれる



今後の課題

- ▶ 二人が別々の触覚インタフェース装置を用いて実験を行う場合の調査
- ▶ 別の作業を行う場合の調査