

遠隔ロボットシステムにおける 力覚フィードバック方法の比較

石川 哲¹, 石橋 豊¹, 黄 平国², 三好 孝典³

¹名古屋工業大学

²岐阜聖徳学園大学

³長岡技術科学大学

電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ(CQ)研究会

2020年 11月 27日



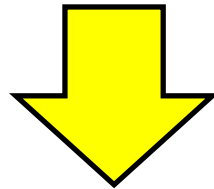
発表概要

- 背景
- 従来研究と問題点
- 目的
- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム
- 反力の計算方法
- フィルタによる安定化制御
- 実験方法
- 実験結果
- 結論と今後の課題

背景(1/2)

力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムに関する研究が注目

- 力覚フィードバックを用いることで、物体の形状、柔らかさ、表面の滑らかさ、重さを感じる事が可能
- システムを複数用いることで、多様な協調作業（物体を一緒に運んだり、手渡したり）が可能



作業の高効率化や高精度化が期待

背景(2/2)

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

ネットワーク遅延やその揺らぎ、
パケット欠落など

- ユーザ体感品質(QoE: Quality of Experience)が大きく劣化
- ロボット動作が不安化

QoS制御 & 安定化制御

従来研究*1

*1 S. Ishikawa *et al.*, ICCO, Dec. 2020.

- 物体を一緒に運ぶ協調作業のために、**二つのロボットアームを一つの触覚インタフェース装置で操作するシステム**を提案し、ネットワーク遅延が作業に与える影響を調査
- ロボットアームには力覚センサが取り付けられており、力覚センサで検知された値を触覚インタフェース装置に送信(力覚フィードバック)
- 触覚インタフェース装置で出力される反力の計算方法として、**両方の値**を用いる場合と、**片方の値**のみを用いる場合を比較



- ✓ 触覚インタフェース装置と二つのロボットアーム間のネットワーク遅延が同じ場合は、二つのロボットアームの時空間同期を達成し、物体に加わる力を減少
- ✓ 反力の計算方法は、**両方の値**を用いる方が安定な作業を実現



問題点

問題点

- ✓ 安定化制御が適用されていないため、ネットワーク遅延が大きく異なる場合は、ロボットアームの同期が崩れ、不安定現象が発生
- ✓ ネットワーク遅延が大きく異なる場合は、物体に大きな力が加わり、物体が破損する危険性がある



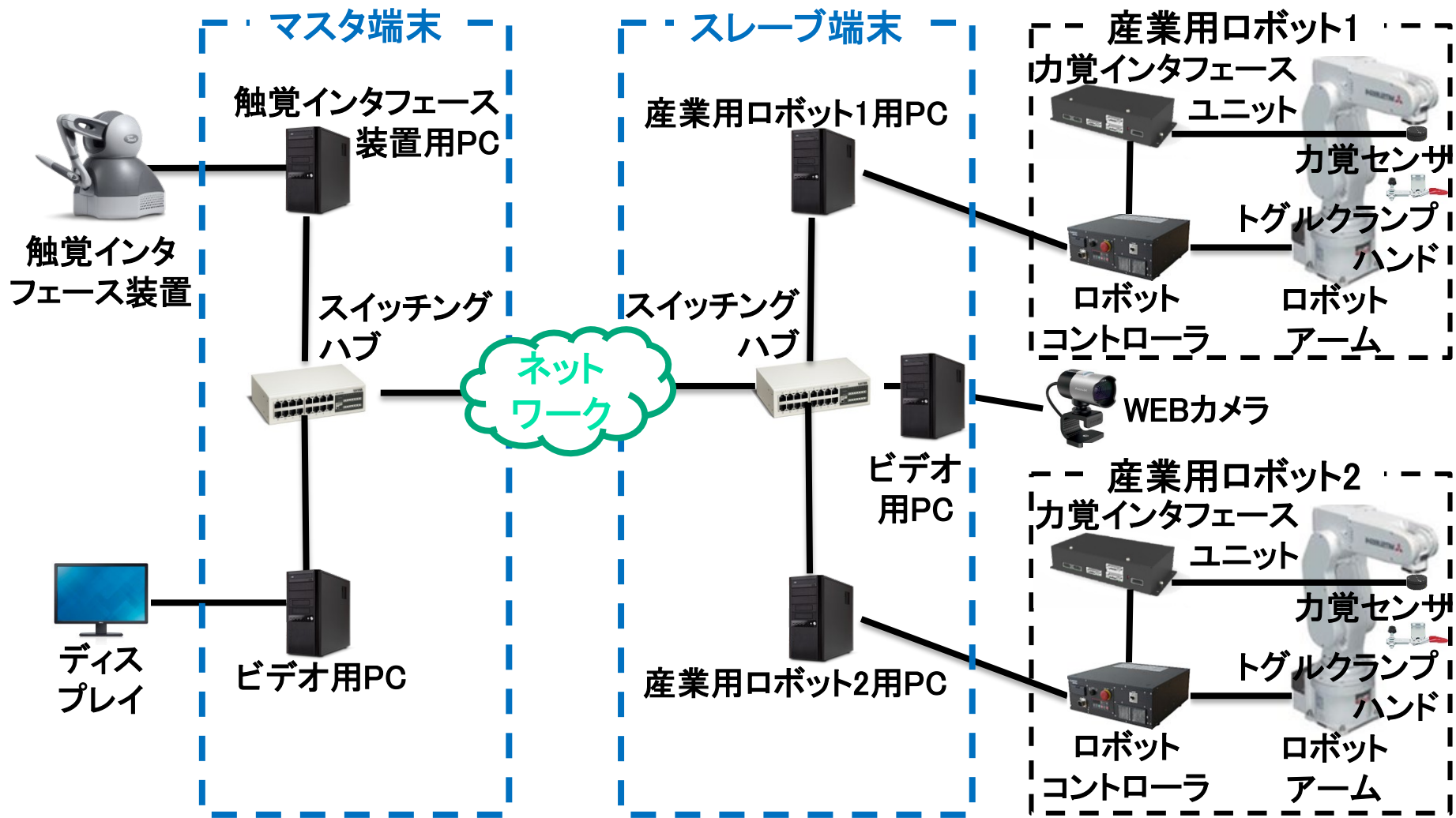
目的

*2 P. Huang *et al.*, IJCNS, July 2019.

本研究

- 二つのロボットアームを一つの触覚インタフェース装置で操作するシステムにフィルタによる安定化制御*2を適用
- ロボットアームは二つあるので、安定化制御を両方のロボットアームに対して行う場合と、片方のロボットアームに対して行う場合を比較
- 安定化制御を両方で行う場合、触覚インタフェース装置で出力される反力の計算方法として、二つの力覚センサの値のうち、両方の値を用いる場合と、片方の値のみを用いる場合を比較

力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムの構成



位置の計算方法*3

*3 K. Suzuki *et al.*, Prof. GCCE, Oct. 2015.

ロボットアームの位置

$$\mathbf{S}_t = \begin{cases} \mathbf{M}_{t-1} + \mathbf{V}_{t-1} & (\text{if } |\mathbf{V}_{t-1}| \leq V_{\max}) \\ \mathbf{M}_{t-1} + V_{\max} \frac{\mathbf{V}_{t-1}}{|\mathbf{V}_{t-1}|} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

\mathbf{S}_t : 時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル

\mathbf{M}_t : 時刻 $t(> 0)$ にスレーブ端末がマスタ端末から受信した
触覚インタフェース装置の位置ベクトル

\mathbf{V}_t : 時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの速度ベクトル

V_{\max} : ロボットアームの最大移動速度(5mm/ms)

反力の計算方法(1/2)

*2 P. Huang *et al.*, IJCNS, July 2019.

マスタ端末で出力される反力

二つの力覚センサから送られてくる値のうち、**両方**を用いる場合

$$\mathbf{F}_t^{(m)} = K_{\text{scale}} \frac{\mathbf{F}_{t-1}^{(s_1)} + \mathbf{F}_{t-1}^{(s_2)}}{2} \quad (2)$$

$\mathbf{F}_t^{(m)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末で出力される反力

$\mathbf{F}_t^{(s_1)}, \mathbf{F}_t^{(s_2)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末が産業用ロボット1用PCと産業用ロボット2用PCから受信した値

$$K_{\text{scale}} = 1.0^{*2}$$

反力の計算方法(2/2)

*2 P. Huang *et al.*, IJCNS, July 2019.

マスタ端末で出力される反力

二つの力覚センサから送られてくる値のうち、**片方**を用いる場合

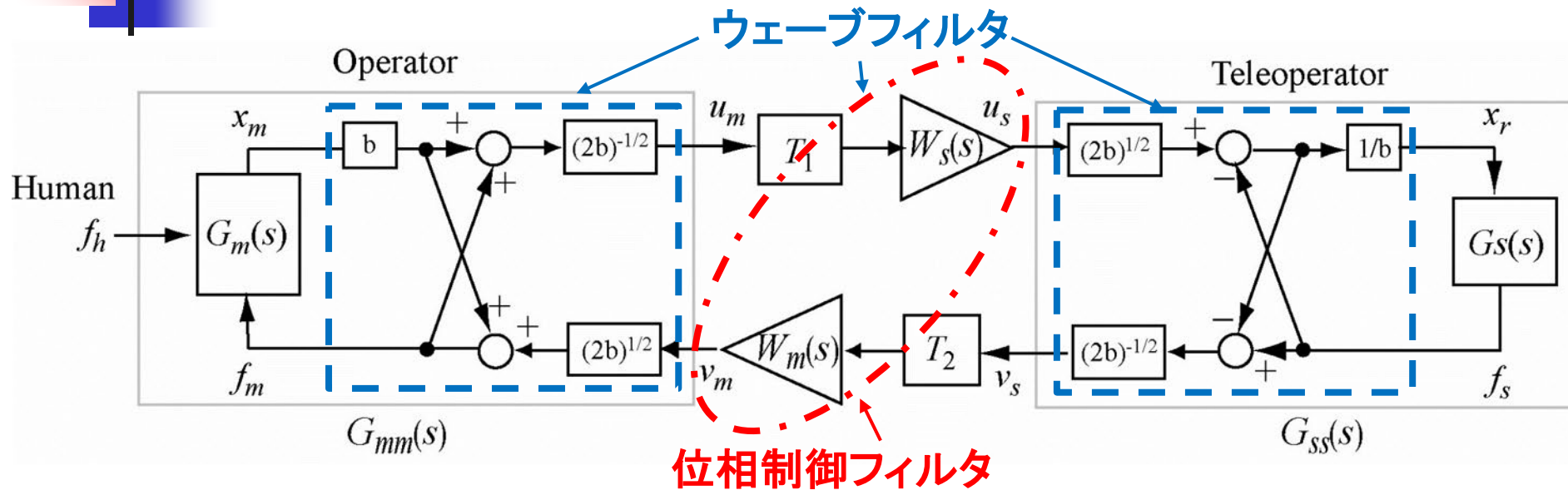
$$\mathbf{F}_t^{(m)} = K_{\text{scale}} \mathbf{F}_{t-1}^{(S_2)} \quad (3)$$

$\mathbf{F}_t^{(m)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末で出力される反力

$\mathbf{F}_t^{(S_2)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末が産業用ロボット2用PCから受信した値

$$K_{\text{scale}} = 1.0^{*2}$$

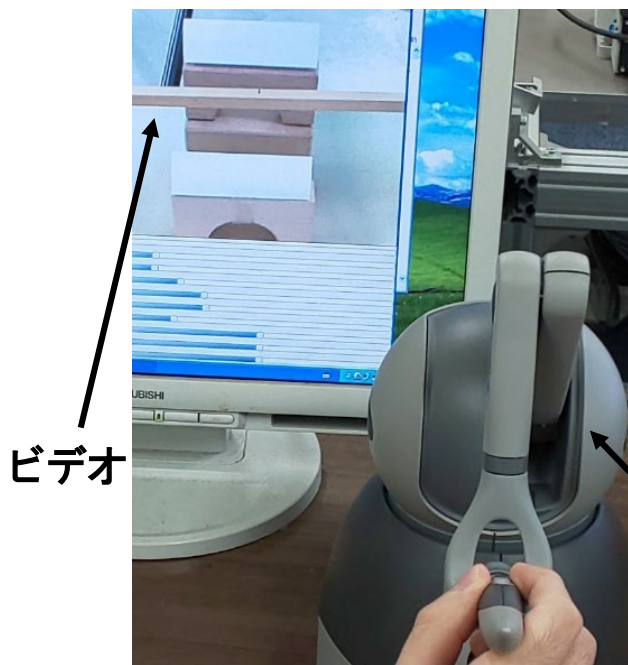
フィルタによる安定化制御*2



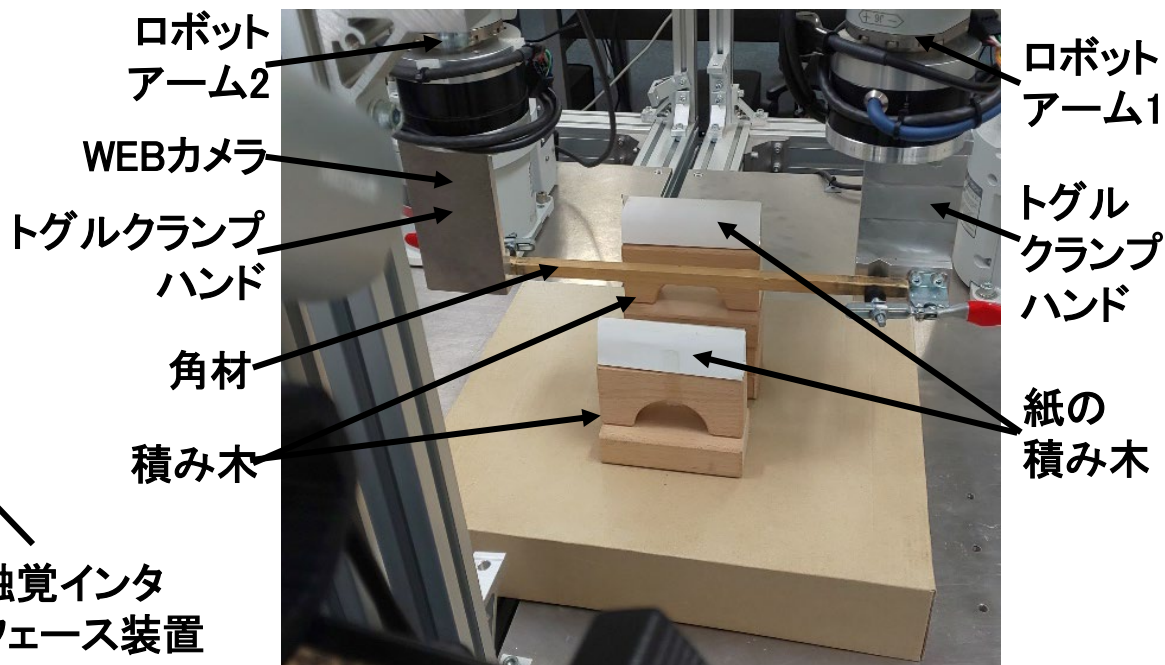
- ウェーブフィルタに位相制御フィルタを組み合わせることにより, 安定した力覚フィードバックを実現
- 両方のシステムに適用する場合は, 上記のブロック図を二つ用いるが, オペレータ側の f_m と x_m は一つのみである
- f_m の計算方法として, 式(2)または式(3)を使用

実験方法(1/3)

- 二つのロボットアームで一つの角材を把持し、一緒に運ぶ作業
- 利用者はビデオを見ながら、一つの触覚インタフェース装置を操作
- 動かし方を統一するために、角材の初期位置の前後に積み木と紙の積み木を配置



マスタ端末側



スレーブ端末側

実験方法(2/3)

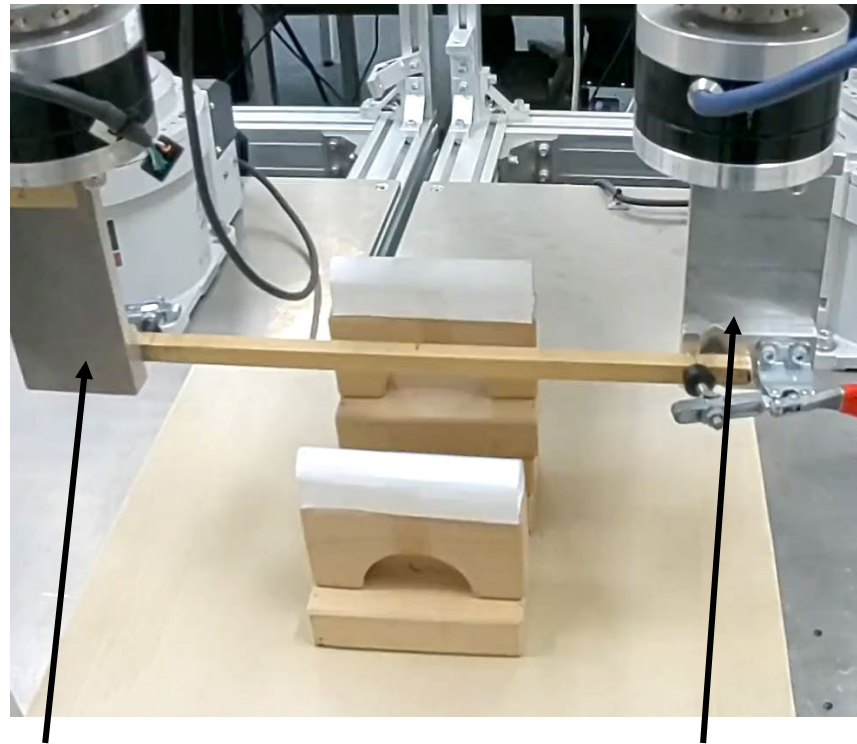
- 安定な操作を確保するために、ロボットアームは左右方向(y軸)に動かないように制限
- 角材はできるだけ一定の速さで、作業開始から約5秒で手前の紙の積み木まで、約15秒で奥の紙の積み木まで運ばれた
- 触覚インタフェース装置とロボットアームの移動距離の比率は $2:1^{*2}$
- ネットワークエミュレータ(NIST Net)を用いて、双方向に同じ固定遅延を付加
 - ✓ 触覚インタフェース装置用PCと産業用ロボット1用PCの片道の固定遅延(付加遅延1と呼ぶ): 0ms, 200ms, 400ms
 - ✓ 触覚インタフェース装置用PCと産業用ロボット2用PCの片道の固定遅延(付加遅延2と呼ぶ): 0ms, 200ms, 400ms

実験方法(3/3)

- 安定化制御を触覚インタフェース装置と**両方**の産業用ロボットに適用する場合と、触覚インタフェース装置と**片方**の産業用ロボットのみ適用する場合を扱う
- 反力の計算方法は、安定化制御を両方に適用する場合は二つの力覚センサの**両方の値**(式(2))と**片方の値**(式(3))を、安定化制御を片方のみ適用する場合は**片方の値**(式(3))を使用
- 作業はランダムな順番で10回ずつ行い、各作業において角材に加わった力の平均を測定
- 10個の力の平均から平均(**平均力の平均**)を求め、比較

実験結果(1/4) 安定化制御の効果

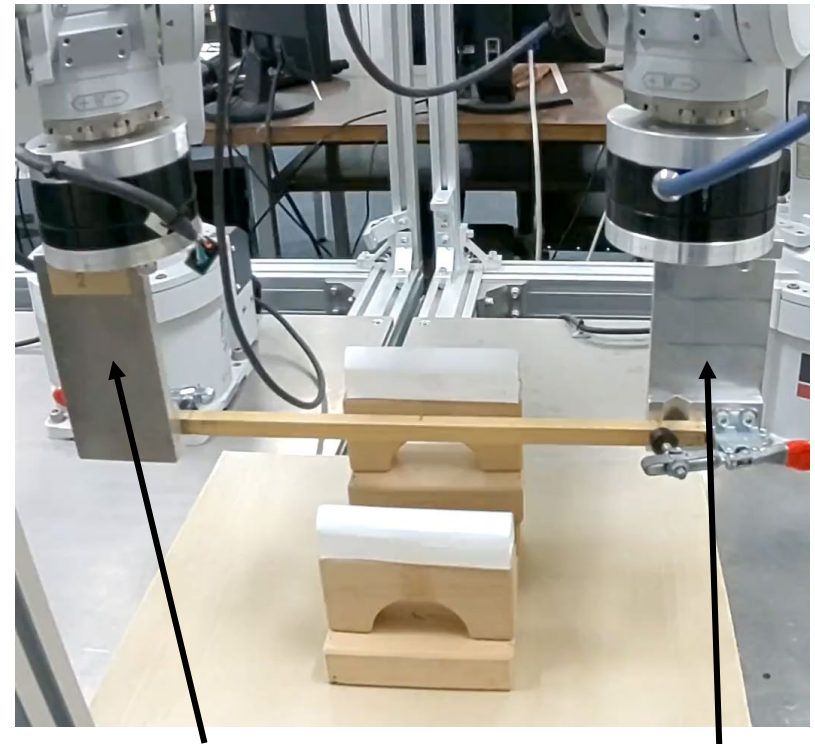
安定化制御なし



ロボットアーム2

ロボットアーム1

安定化制御あり



ロボットアーム2

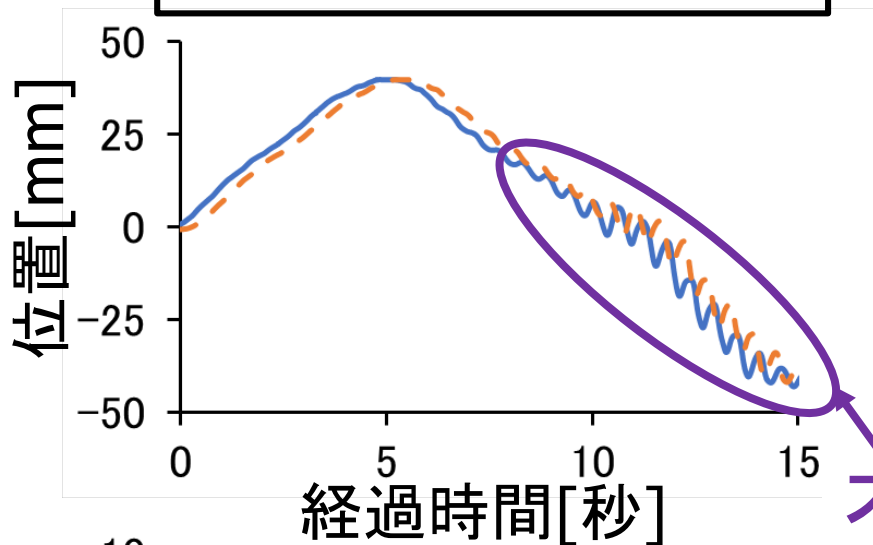
ロボットアーム1

付加遅延1: 0ms, 付加遅延2: 400ms

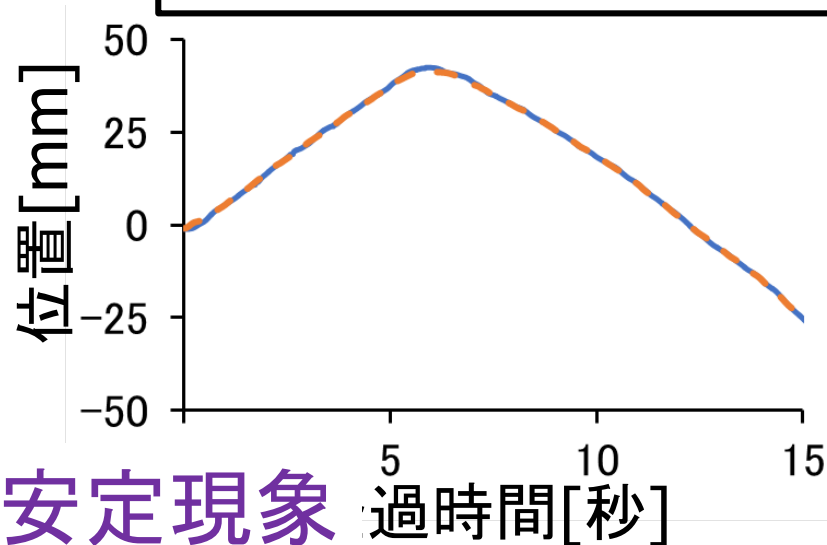
実験結果(2/4) 安定化制御の効果

— ロボットアーム1
- - - ロボットアーム2
付加遅延1: 0ms
付加遅延2: 400ms

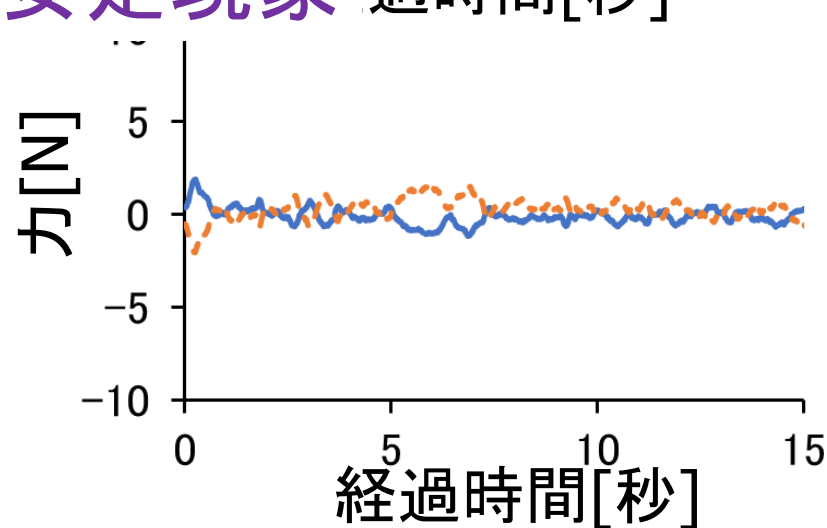
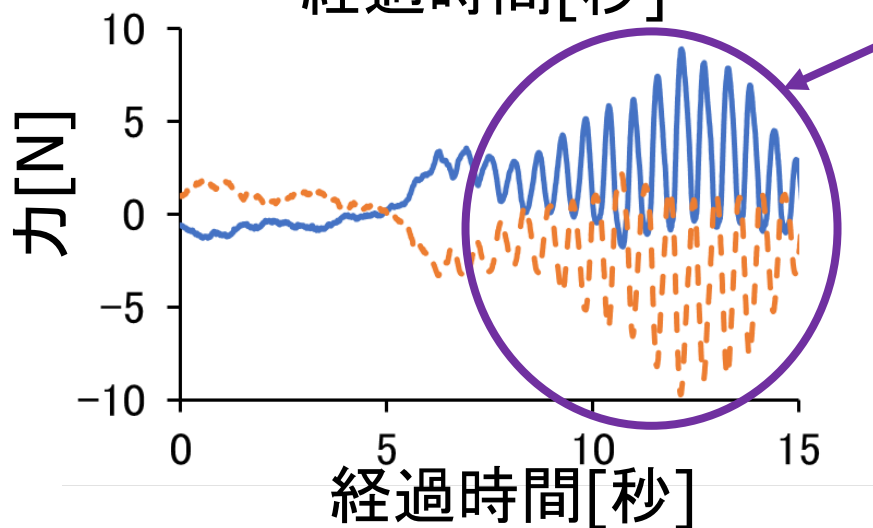
安定化制御: なし



安定化制御: あり

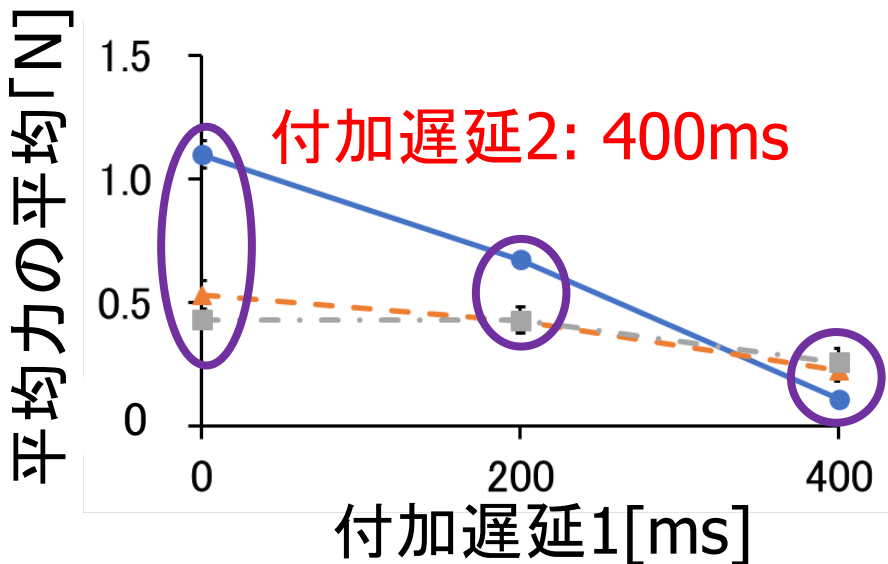
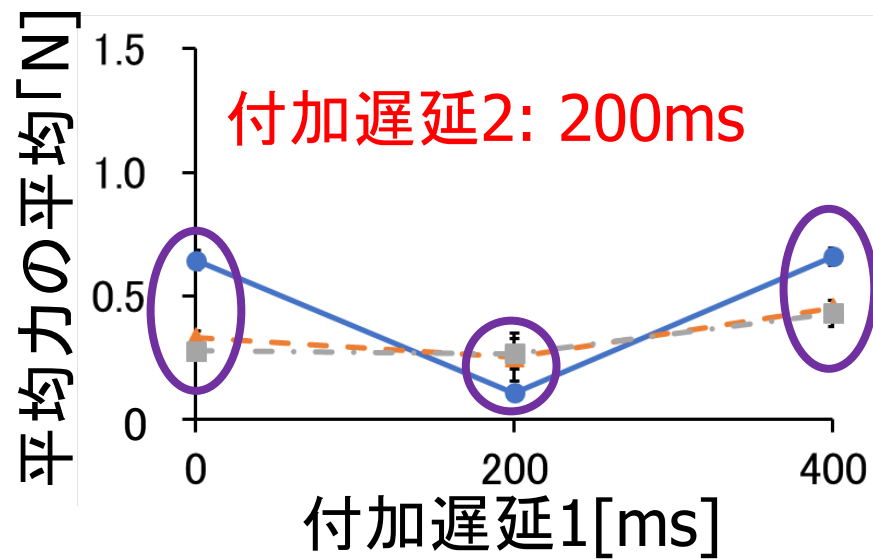
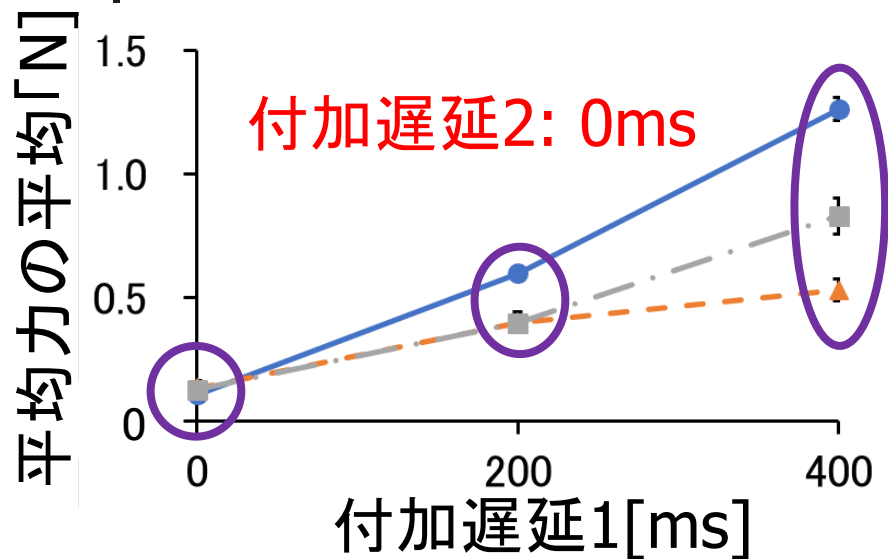


不安定現象



実験結果(3/4)

平均力の平均

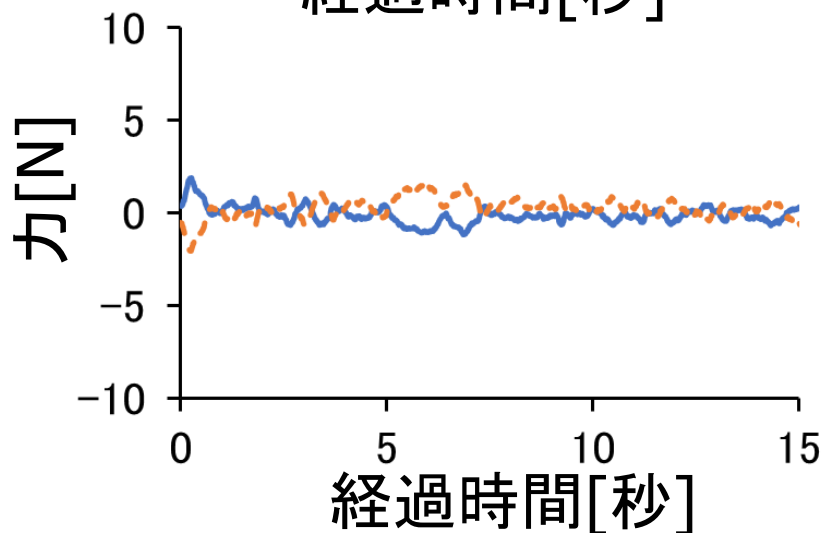
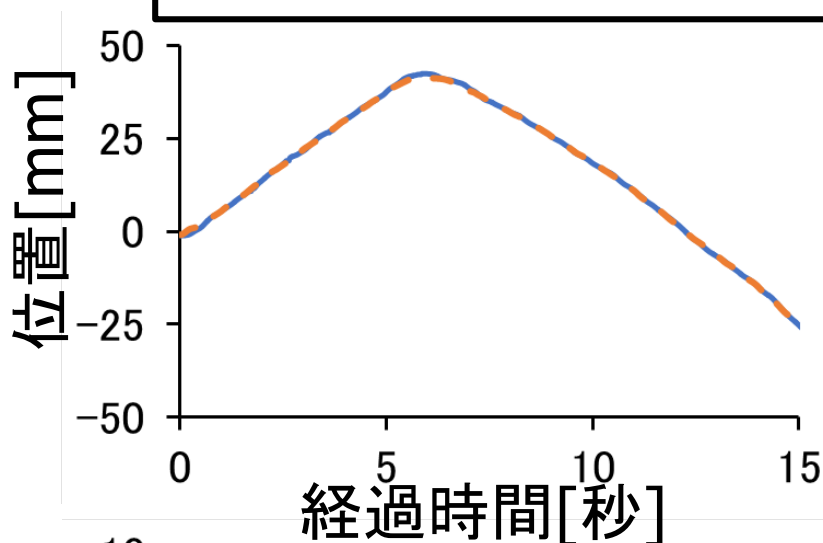


- 安定化制御: 片方, 反力: 片方の値
 - ▲ 安定化制御: 両方, 反力: 両方の値
 - 安定化制御: 両方, 反力: 片方の値
- I : 95%信頼区間

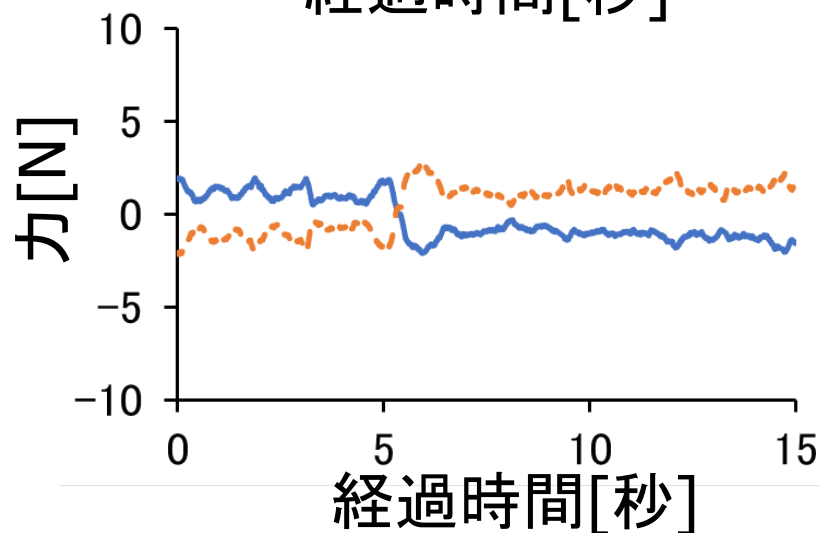
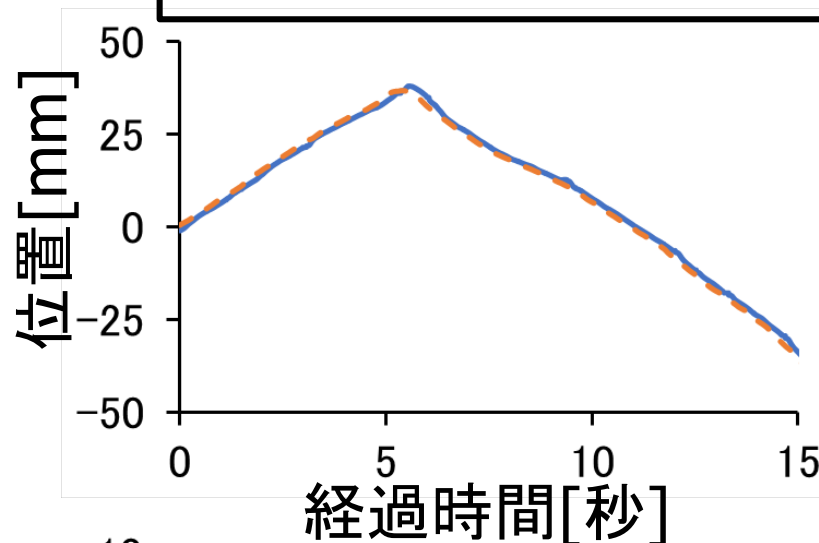
実験結果(4/4)

- ロボットアーム1
- - - ロボットアーム2
- 付加遅延1: 0ms
- 付加遅延2: 400ms

安定化制御: 両方

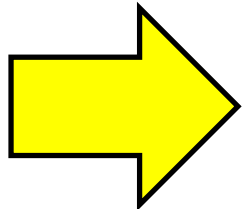


安定化制御: 片方



結論

- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムにおいて、一つの触覚インタフェース装置によって、二つの産業用ロボットを操作して、協調作業を行い、ネットワーク遅延の影響を調査
- フィルタによる安定化制御を触覚インタフェース装置と両方のロボットアームに対して適用する場合と、触覚インタフェース装置と片方のロボットアームのみに対して適用する場合を比較



- ✓ ネットワーク遅延の差が**同じ**場合は、安定化制御を**片方**のロボットのみで行うことが有効
- ✓ ネットワーク遅延の差が**大きい**場合は、制御を**両方**のロボットで行うことが有効



今後の課題

*4 K. Kanaishi *et al.*, NS2019-119, Oct. 2019.

- QoS制御として、ネットワーク遅延の差を吸収し、ロボット間の時空間同期を達成するための適応型 Δ 因果順序制御*4を適用
- ロボットが動作する軸の数を増加させた場合にも安定性を確保