

# 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ける ネットワーク遅延が粘弾性の適応制御 による協調作業に及ぼす影響

Yuyao GAO<sup>†</sup>, 石橋 豊<sup>†</sup>, 黄 平国<sup>††</sup>, 立岩 佑一郎<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>名古屋工業大学, <sup>††</sup>岐阜聖徳学園大学

映像情報メディア学会メディア工学研究会 (ME)

2023年12月14日 新潟大学



# 発表内容

---

- 背景
- 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
- 粘弾性の適応制御
- 実験方法
- 実験結果
- 結論と今後の課題



# 背景

力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム間の協調作業に関する研究が活発化

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  
やその揺らぎなど

- 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し、大きく振動

**QoS制御や安定化制御を行うことが必要**

# 目的(1/3)

- \*1 P. Huang *et al.*, IJCNS, pp. 99-111, July 2019.
- \*2 S. Ishikawa *et al.*, IJCNS, pp. 1-13, Mar. 2021.
- \*3 N. Hameedha *et al.*, ITE MTA, pp. 1-7, Jan. 2022.

## 従来研究

力覚フィードバックを用いた二つの遠隔ロボットシステム間の協調作業として、一つの物体を一緒に運ぶ作業を対象とし、各システム間の協調を検討

利用者ーロボット間: フィルタによる安定化制御\*1とQoS制御として力情報を用いたロボット位置制御\*2

ロボットーロボット間: QoS制御として適応型 $\Delta$ 因果順序制御\*3

それらの制御の有効性を確認する

# 目的(2/3)

\*4 阿部他, 信学論(B), pp. 38-46, Jan. 2020.

\*5 R. Ye *et al.*, ICCCI, pp. 150-155, July 2022.

## 従来研究

- 力覚フィードバックを用いた2つの遠隔ロボットシステムにおける利用者－利用者間のネットワーク遅延が粘弾性の適応制御\*4の効果に及ぼす影響を調査\*5

→ 適応型粘弾性制御は, 制御を行わない場合よりも有効

ネットワーク遅延が大きくなるにつれて物体にかかる力も増加する傾向

➤ 問題点: 調査は十分ではない



# 目的(3/3)

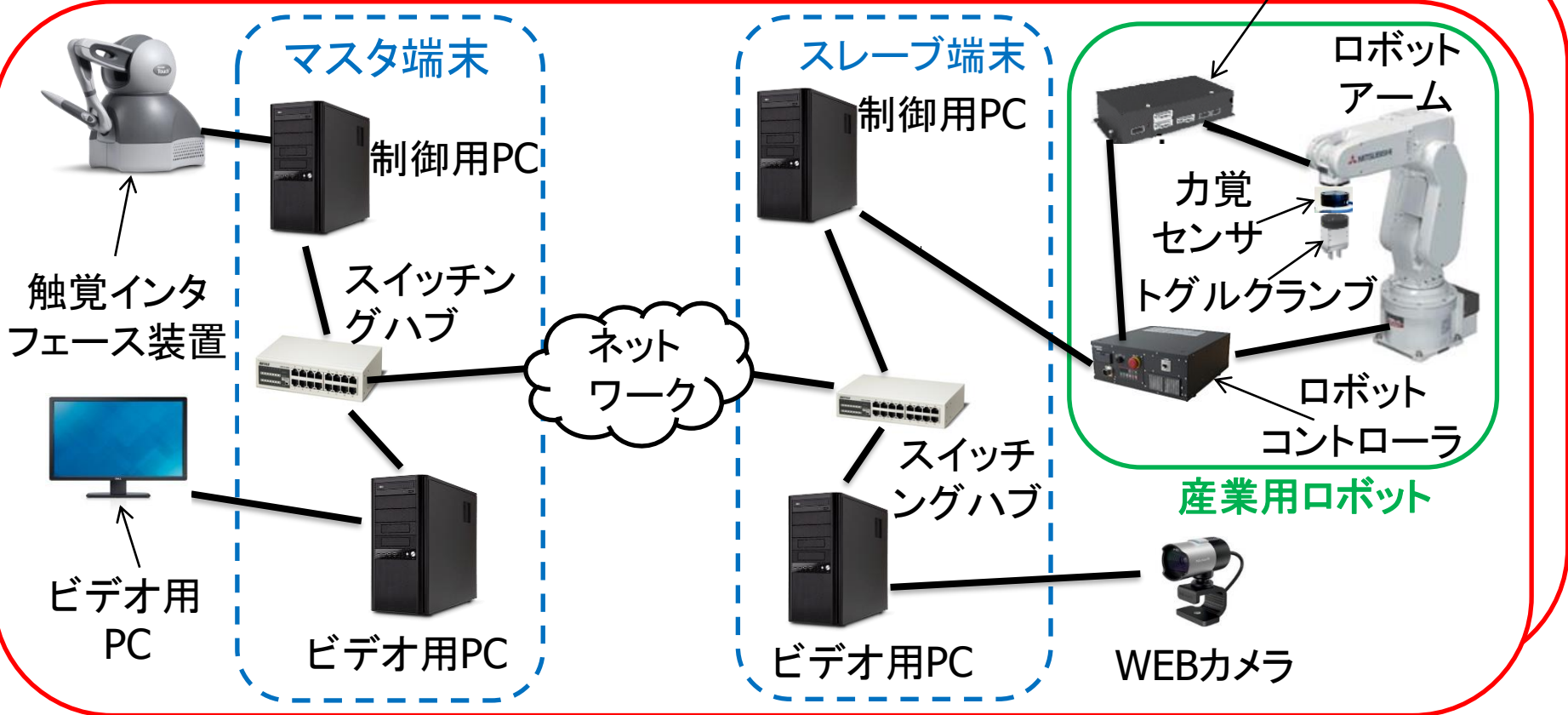
## 本研究

- ▶ 力覚フィードバックを用いた2つの遠隔ロボットシステムを使用
  - 利用者－利用者間、利用者－ロボット間、ロボット－ロボット間のネットワーク遅延が粘弾性の適応制御の効果に及ぼす影響を実験により調査

# 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム

## システム2

### システム1



# 粘弾性の適応制御(1/3)

\*5 R. Ye *et al.*, ICCCI, pp. 150–155, July 2022.

弾性の適応制御と粘性の適応制御をマスタ端末で同時に実行

$$F_t^{(u_1)} = \overset{\text{弾性による反力}}{\boxed{K_s \left( P_{t-1}^{(u_2)} - P_{t-1}^{(u_1)} \right)}} + \overset{\text{粘性による反力}}{\boxed{K_d \left( \dot{P}_{t-1}^{(u_2)} - \dot{P}_{t-1}^{(u_1)} \right)}} *5$$

二つの触覚インタフェース装置間で利用

- $P_t^{(u_i)}$ : システム*i*における触覚インタフェース装置の位置ベクトル
- $\dot{P}_t^{(u_i)}$ : システム*i*における触覚インタフェース装置の速度ベクトル
- $K_s$ : 弾性係数
- $K_d$ : 粘性係数



# 粘弾性の適応制御(2/3)

\*5 R. Ye *et al.*, ICCCI, pp. 150–155, July 2022.

## 弾性の適応制御

$$K_s = 9 / (2D + 90)^{*5}$$

ネットワーク遅延に応じて弾性係数を動的に変更

- $K_s$ : 弾性係数
- $D$ : 2つの触覚インターフェース装置間の一方方向ネットワーク遅延

# 粘弾性の適応制御(3/3)

\*5 R. Ye *et al.*, ICCCI, pp. 150–155, July 2022.

## 粘性の適応制御

$$K_d = \begin{cases} 1.02 \times 10^{-5} D + 4.2 \times 10^{-5} v - 2.03 \times 10^{-4} & (D \leq D_{\text{peak}})^{*6} \\ -6.31 \times 10^{-6} D - 2.12 \times 10^{-4} v + 2.99 \times 10^{-3} & (D > D_{\text{peak}}) \end{cases}$$

$$D_{\text{peak}} = -20v + 228 \quad *5$$

ネットワーク遅延と装置の操作速度に応じて粘性係数を動的に変更

- $K_d$ : 粘性係数
- $D_{\text{peak}}$ : 最適粘性係数のピーク時のネットワーク遅延
- $v$ : 移動速度

# 実験方法(1/5)

- 二つのシステムを使用して, 前後方向に二つのロボットアームで把持された木の角材を運ぶ協調作業
- ロボットアームを互いに平行に保ちながら, 木の角材を積み木に押し当てるように移動



# 実験方法(2/5)

- 各システムのWEBカメラのビデオを見ながら, 触覚インタフェース装置を使用してロボットアームを遠隔操作





# 実験方法(3/5)

- 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)
- $D_i$ : システム  $i$  ( $i=1$  or  $2$ ) のマスタ端末とスレーブ端末間(利用者-ロボット間)の付加遅延
  - $D_3$ : スレーブ端末間(ロボット-ロボット間)の付加遅延
  - $D_4$ : マスタ端末間(利用者-利用者間)の付加遅延それらの組み合わせを( $D_1, D_2, D_3, D_4$ )で表すことにする



# 実験方法(4/5)

\*5 R. Ye *et al.*, ICCCI, pp. 150–155, July 2022.

- 各利用者がロボット側から受ける力と他の利用者から受ける力の比率を0.5 \*5に設定
- 付加遅延と粘弾性の適応制御が行われるか否かの組み合わせ毎に10回繰り返し実験
- ロボットアームに加わる力と触覚インタフェース装置を介して利用者に提示される力を測定

# 実験方法(5/5) (実験の様子)

$(D1, D2, D3, D4) = (0, 0, 0, 0) \text{ ms}$

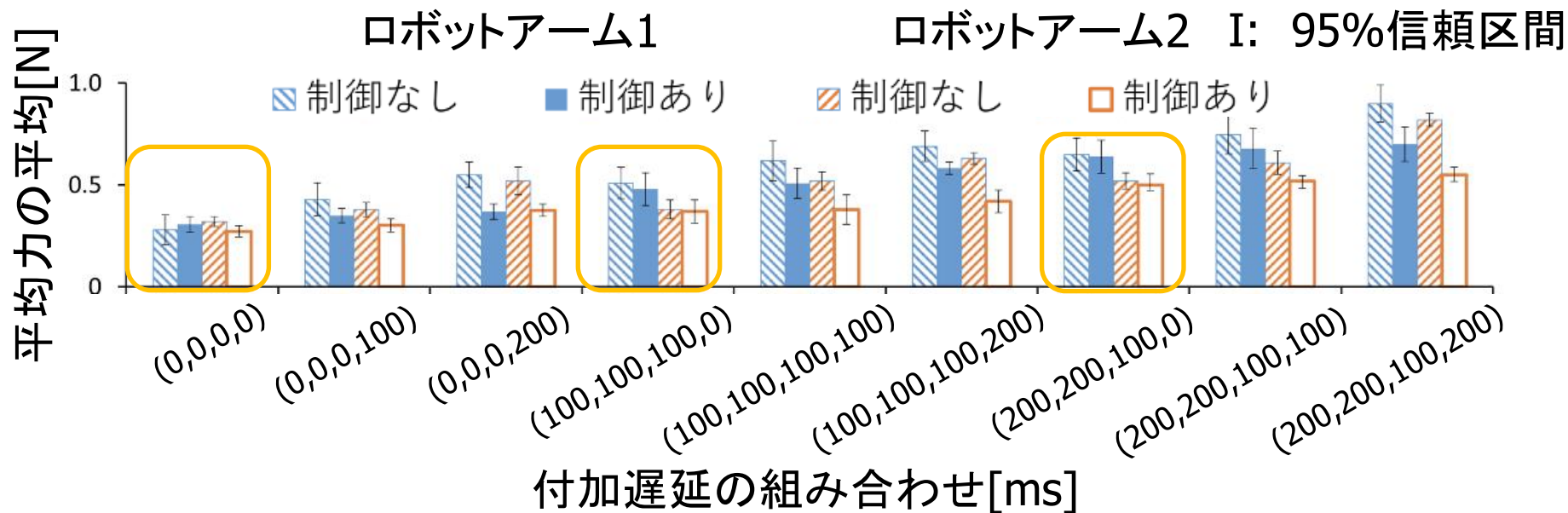
粘弾性の適応制御あり



# 実験結果(1/4)

$(D_1, D_2, D_3, D_4)$ :付加遅延の組み合わせ  
 $D_1$ :システム1の利用者-ロボット間  
 $D_2$ :システム2の利用者-ロボット間  
 $D_3$ :ロボット-ロボット間  
 $D_4$ :利用者-利用者間

制御ありの場合ほうが小さい



ロボット側の平均力の平均

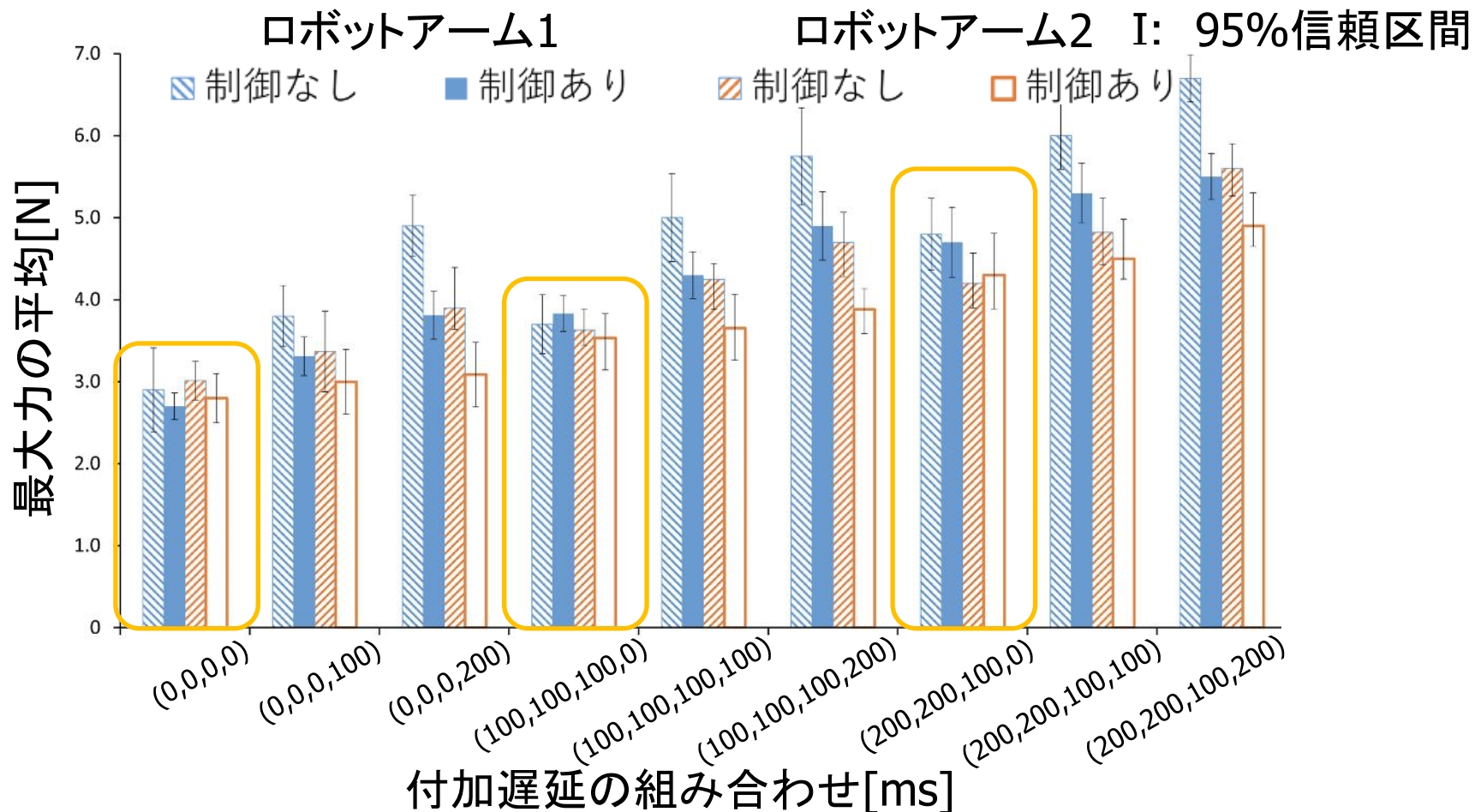
※平均力の平均:「力の絶対値の時間平均」を回数平均したもの



# 実験結果(2/4)

$(D_1, D_2, D_3, D_4)$ : 付加遅延の組み合わせ  
 $D_1$ : システム1の利用者-ロボット間  
 $D_2$ : システム2の利用者-ロボット間  
 $D_3$ : ロボット-ロボット間  
 $D_4$ : 利用者-利用者間

制御ありの場合ほうが小さい



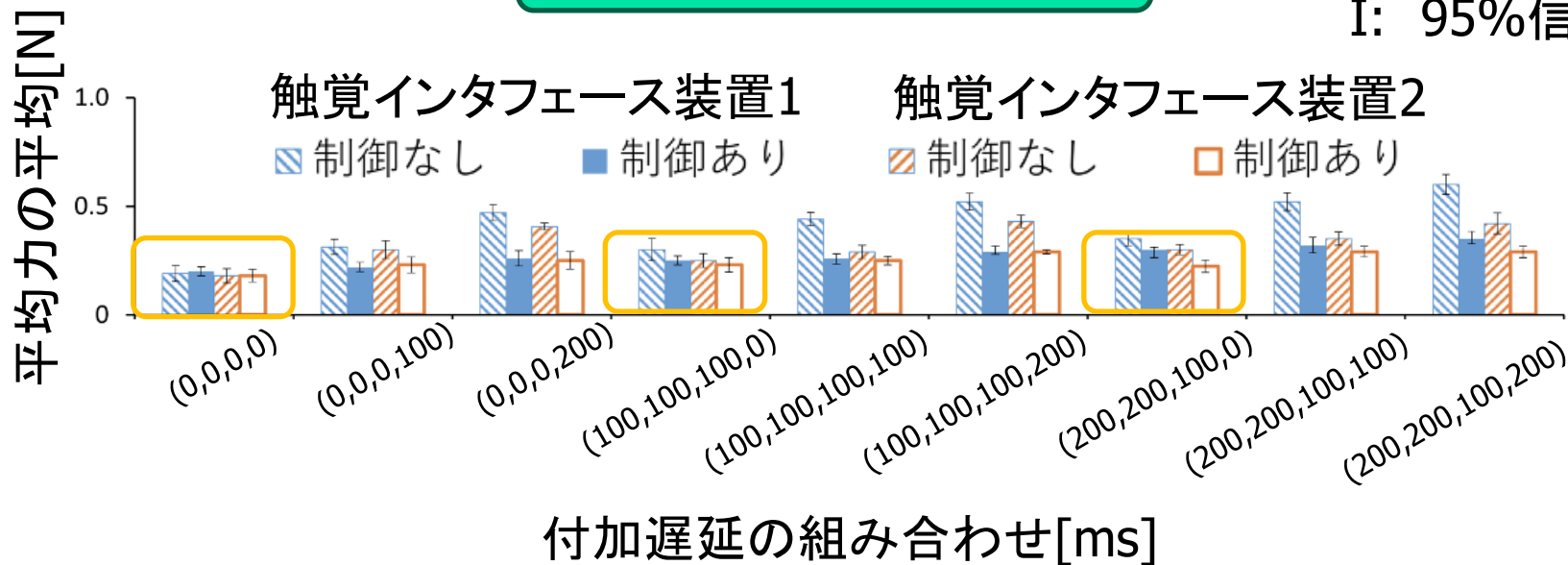
ロボット側の最大力の平均

# 実験結果(3/4)

$(D_1, D_2, D_3, D_4)$ : 付加遅延の組み合わせ  
 $D_1$ : システム1の利用者-ロボット間  
 $D_2$ : システム2の利用者-ロボット間  
 $D_3$ : ロボット-ロボット間  
 $D_4$ : 利用者-利用者間

制御ありの場合ほうが小さい

I: 95%信頼区間

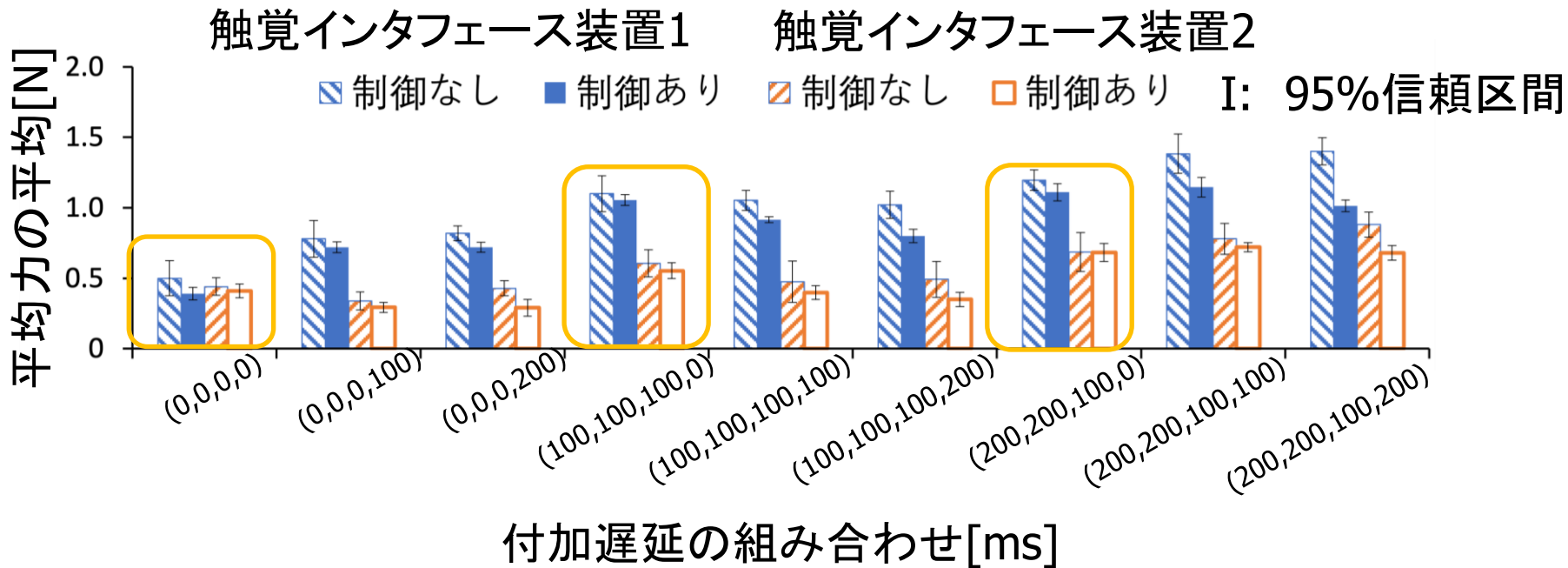


触覚インタフェース装置側の平均力の平均

# 実験結果(4/4)

$(D_1, D_2, D_3, D_4)$ : 付加遅延の組み合わせ  
 $D_1$ : システム1の利用者-ロボット間  
 $D_2$ : システム2の利用者-ロボット間  
 $D_3$ : ロボット-ロボット間  
 $D_4$ : 利用者-利用者間

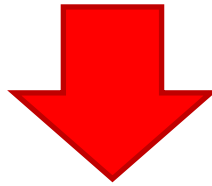
制御ありの場合ほうが小さい



触覚インタフェース装置側の平均力の平均

# 結論

- ✓ ネットワーク遅延の影響の調査
- ✓ 力覚フィードバックを用いた二つの遠隔ロボットシステムにおいて、利用者間で粘弾性の適応制御を行う場合と行わない場合とを比較



ネットワーク遅延が大きくなるにつれて、大きな力が加わるものの、粘弾性の適応制御は効果的であることが判明



# 今後の課題

---

- QoE評価によって、ネットワーク遅延の影響の調査
- ネットワーク遅延だけでなく、遅延揺らぎや、パケット欠落の影響を調べることや、劣悪なネットワーク環境での実験