



遠隔ロボット操作のための力覚による 利用者間の協調方法の比較

石川 哲[†], 石橋 豊[†], 黄 平国^{††}, 立岩 佑一郎[†]

[†]名古屋工業大学

^{††}岐阜聖徳学園大学

電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会(CQ)

2021年 3月 3日



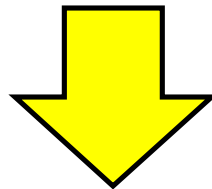
発表概要

- 背景
- 問題点と目的
- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム
- 一緒に物体を運ぶ作業
- 利用者間の協調方法
- 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
- 複数の利用者がそれぞれシステムを用いることで、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

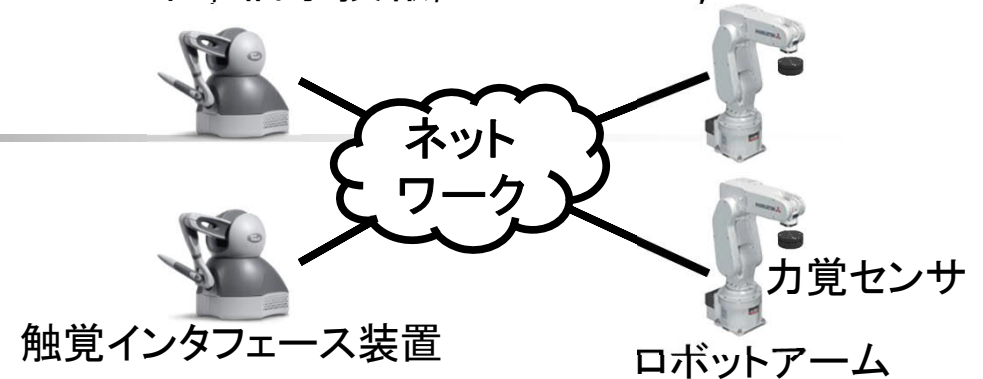
- ユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) が大きく劣化
- ロボット動作が不安化

QoS制御 & 安定化制御

問題点(1/2)

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

*2 石川 他, 信学技報, CQ2020-18, June 2020.



従来研究

- 一人の利用者が、二つのシステムを用いて、一緒に物体を運ぶ協調作業を対象
- フィルタによる安定化制御^{*1}と力情報を用いたロボット位置制御^{*2}を適用

➡ 制御により物体に加わる力を減少

問題点

- 二人の利用者で作業を行う場合、一人の場合よりも大きな力が物体に加わる可能性

問題点(2/2)



従来研究

- 二人の利用者がそれぞれ触覚インタフェース装置を操作して、**仮想空間**内の一つの物体と一緒に運ぶ協調作業を対象^{*3}
- 視覚および力覚情報を用いて利用者間で意思(動かす方向や速度など)を伝達

➡ 意思伝達により作業効率が改善

問題点

- **実空間**のシステムで意思伝達を行う検討は十分ではない

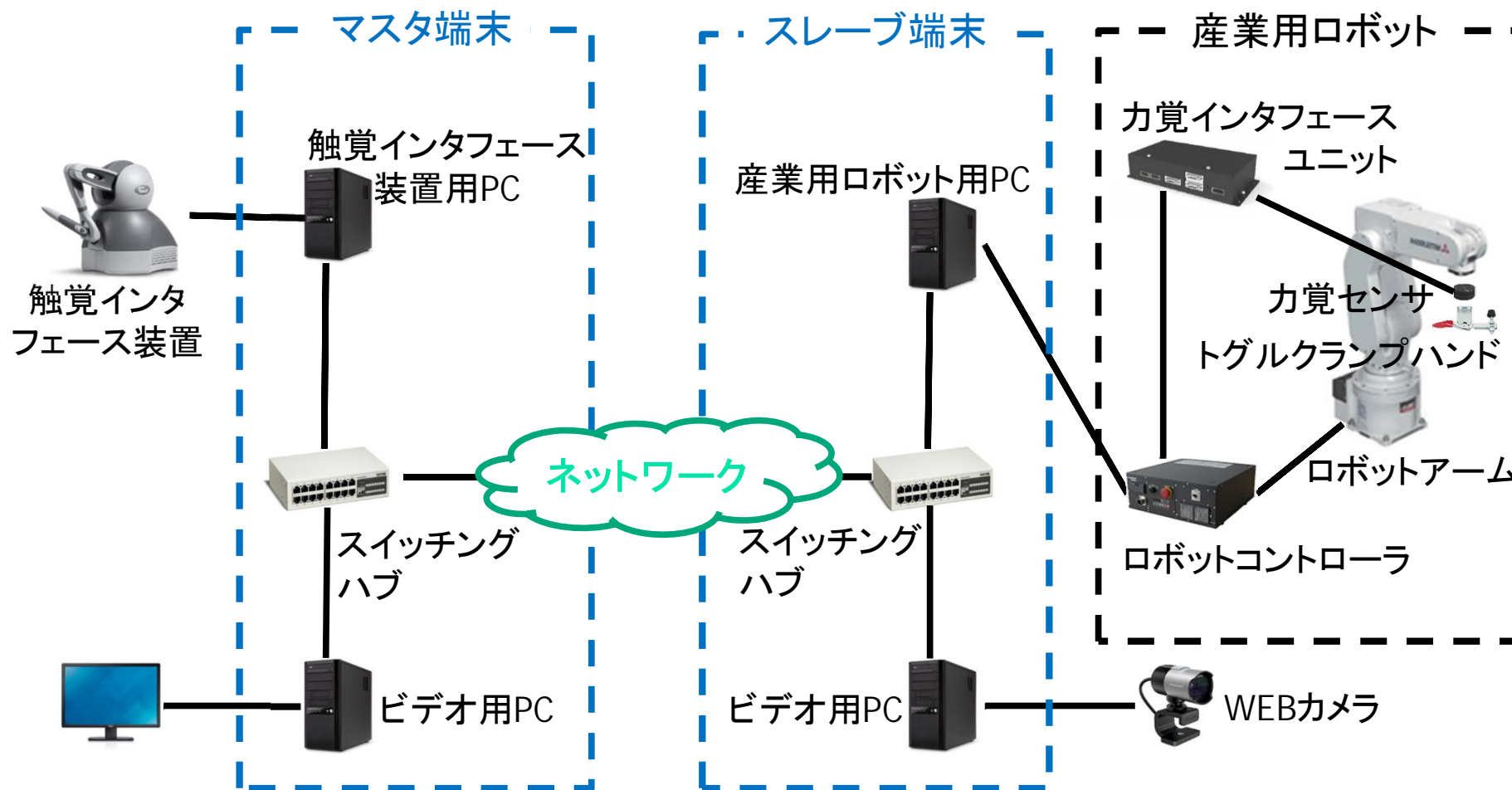


目的

本研究

- 二人の利用者が、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を用いて、一緒に物体を運ぶ協調作業を対象
- 力覚情報を用いて二人の利用者間における意思の伝達方法を検討
- 利用者間協調のための反力と力覚センサが検知した力の比率を変化させ、どの程度の比率が好ましいかを調査

力覚フィードバックを用いた 遠隔ロボットシステムの構成



実験では、二つのシステム(システム1および2)を使用



反力の計算方法

*2 石川 他, 信学技報, CQ2020-18, June 2020.

マスタ端末で出力される反力

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

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

$\mathbf{F}_t^{(s)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末がスレーブ端末から受信した力

力覚センサの値に, マスタ端末で一定の倍率($K_{\text{scale}} = 0.33^{*2}$)
をかけて触覚インタフェース装置によって反力を提示



位置の計算方法

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

ロボットアームの位置

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{M}_{t-1} + \mathbf{V}_{t-1} \quad (2)$$

\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
($|\mathbf{V}_t| \leq V_{\max}$)

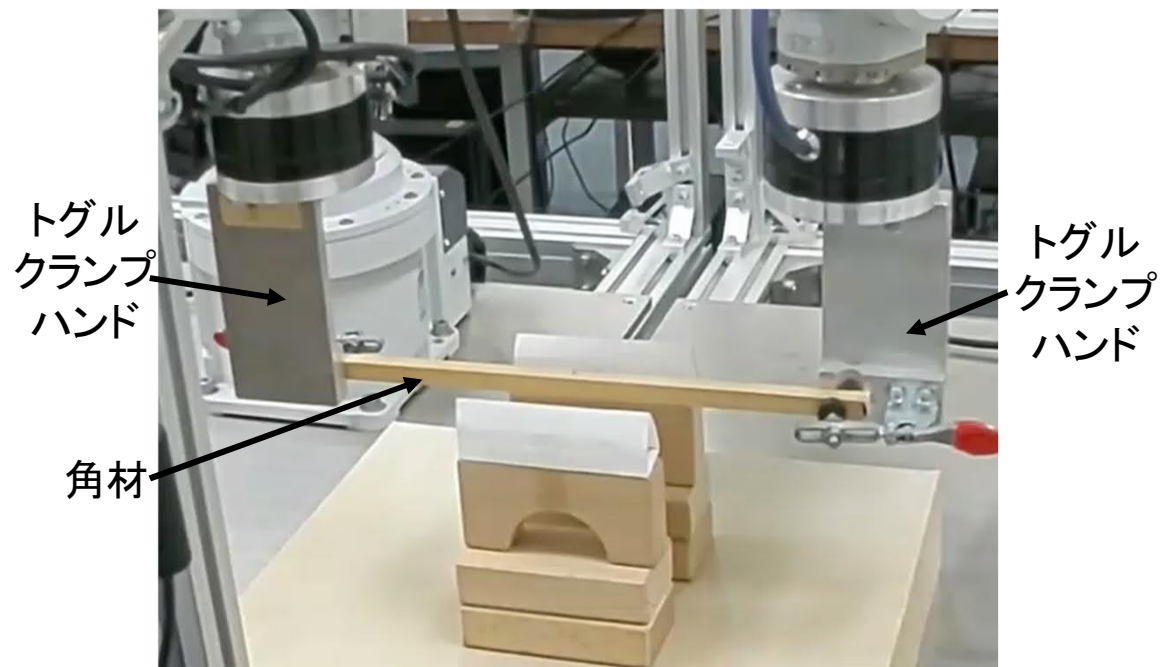
V_{\max} : ロボットアームの最大移動速度(5mm/ms^{*4})

一緒に物体を運ぶ作業

- 一人の利用者が二つの触覚インタフェース装置を両手で操作したり, 二人の利用者がそれぞれ一つずつ触覚インタフェース装置を操作したりして, 角材を一緒に運ぶ

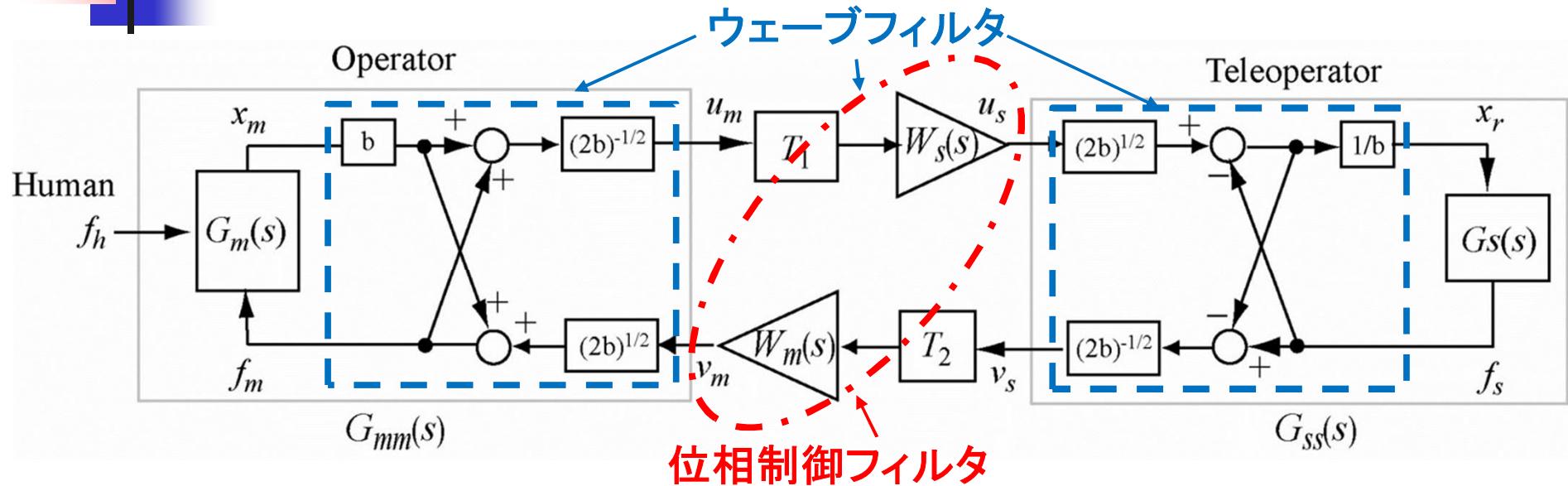


マスタ端末側



スレーブ端末側

フィルタによる安定化制御*1



- ウェーブフィルタに位相制御フィルタを組み合わせた制御
- ネットワーク遅延が大きい場合においても、安定した力覚フィードバックを実現

力情報によるロボット位置制御*2

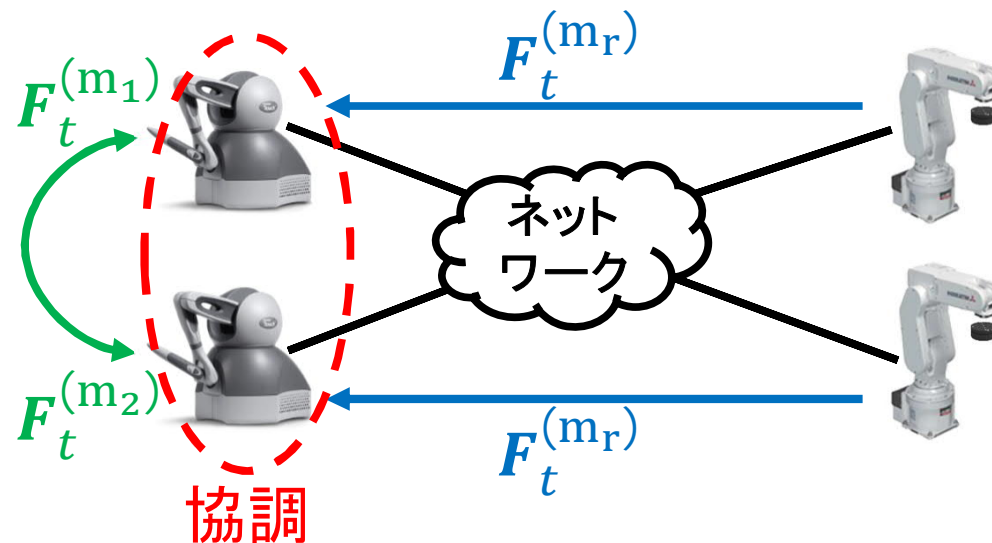
- 力情報によるロボット位置制御は, 角材に加わる力を軽減するためにロボット位置を微調整する制御
- 時刻 $t (> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル $\widehat{\mathbf{s}}_t$ を式(2)で得られる \mathbf{s}_t に \mathbf{P} を加えた値とする

$$\widehat{\mathbf{s}}_t = \mathbf{s}_t + \mathbf{P} \quad (3)$$

\mathbf{P} : 二つのロボットアームの位置ベクトルの差を小さくするような値を有するベクトル*2

利用者間の協調方法(1/3)

- 力覚を用いて利用者間で意思(動かす方向や速度など)の伝達を行うことで, 作業が高効率化^{*3}
- 意思伝達のために, システム間の触覚インタフェース装置の位置ベクトルから計算される反力 $F_t^{(m_1)}$, $F_t^{(m_2)}$ を利用
- $F_t^{(m_1)}$, $F_t^{(m_2)}$ と力覚センサの値から計算される力 $F_t^{(m_r)}$ の比率を変えて, 利用者に提示



利用者間の協調方法(2/3)

利用者間協調のために, システム1のマスタ端末で時刻 $t (> 0)$ に出力される反力 $F_t^{(m_1)}$ は次式*6で計算

$$\underline{F_t^{(m_1)}} = K_S \left(\underline{P_{t-1}^{(m_2)}} - \underline{P_{t-1}^{(m_1)}} \right) \quad (4)$$

$\underline{P_t^{(m_1)}}$, $\underline{P_t^{(m_2)}}$: 時刻 t にシステム1のマスタ端末が有するシステム1
および2の触覚インタフェース装置の位置ベクトル

K_S : 弾性係数 ($K_S = 0.1$ *6)

利用者間の協調方法(3/3)

- 二つの力の比率を変えて，利用者に提示
- システム1のマスタ端末で時刻 $t (> 0)$ に出力される反力 $F_t^{(m)}$ における比率は $\alpha_1 : (1 - \alpha_1)$ とする ($0 \leq \alpha_1 \leq 1$)

$$F_t^{(m)} = \alpha_1 \left\{ \underline{F_t^{(m_1)}} \right\} + (1 - \alpha_1) \left\{ \underline{F_t^{(m_r)}} \right\} \quad (5)$$

触覚インタフェース装置間の
位置ベクトルから計算される
反力

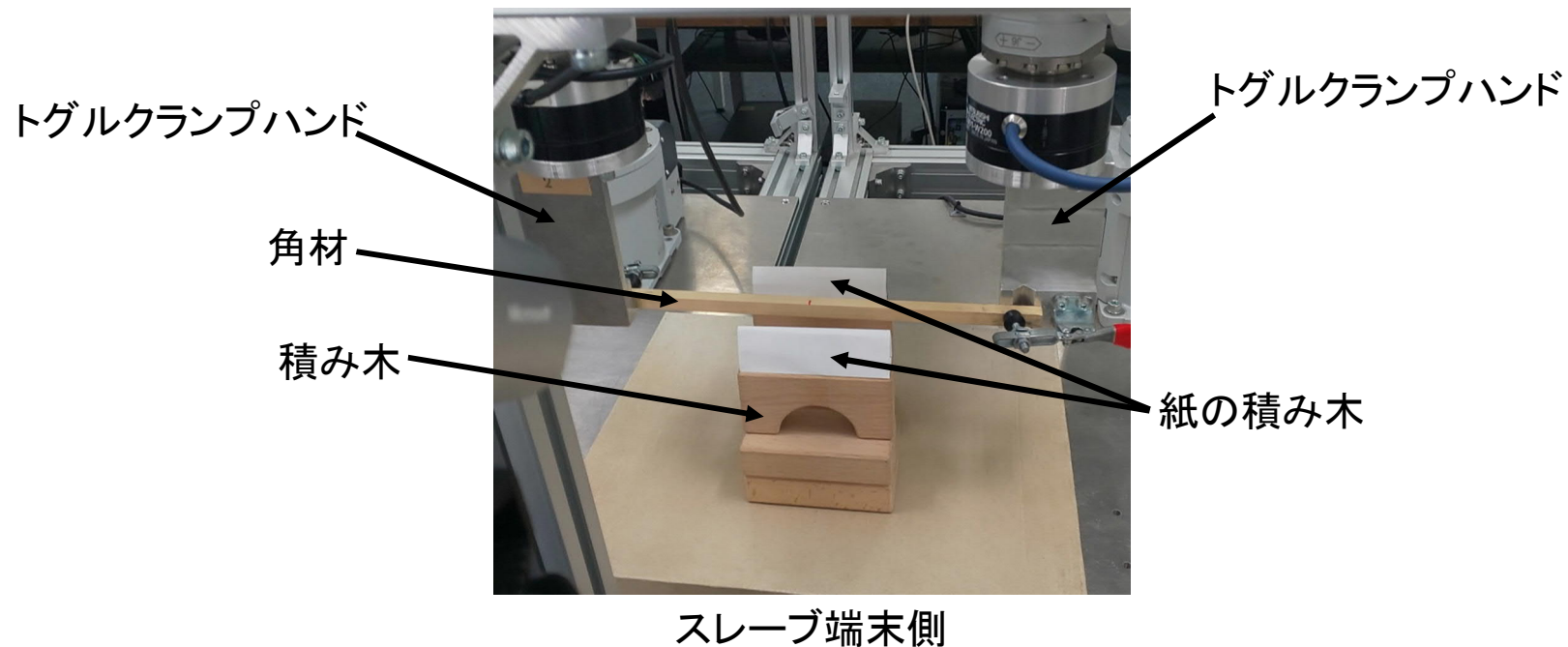
力覚センサの値から
計算される力

$\alpha_1 = 1.0$ の場合，反力のみを利用者に提示するが，
ロボットの力を感じるできないため，好ましくない

システム2における比率は $\alpha_2 : (1 - \alpha_2)$ とする ($0 \leq \alpha_2 \leq 1$)

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
- 二人の利用者がそれぞれ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





実験方法(2/3)

*1 P. Huang *et al.*, IJCNIS, July 2019.

*2 田口 他, 信学総大, B-11-1, Mar. 2019.

- 二人の利用者はお互いの動きが見えない場所で作業を実施
- 効率のため, 作業開始時に, 声を掛け合い, 動き出しの時間をある程度揃えた



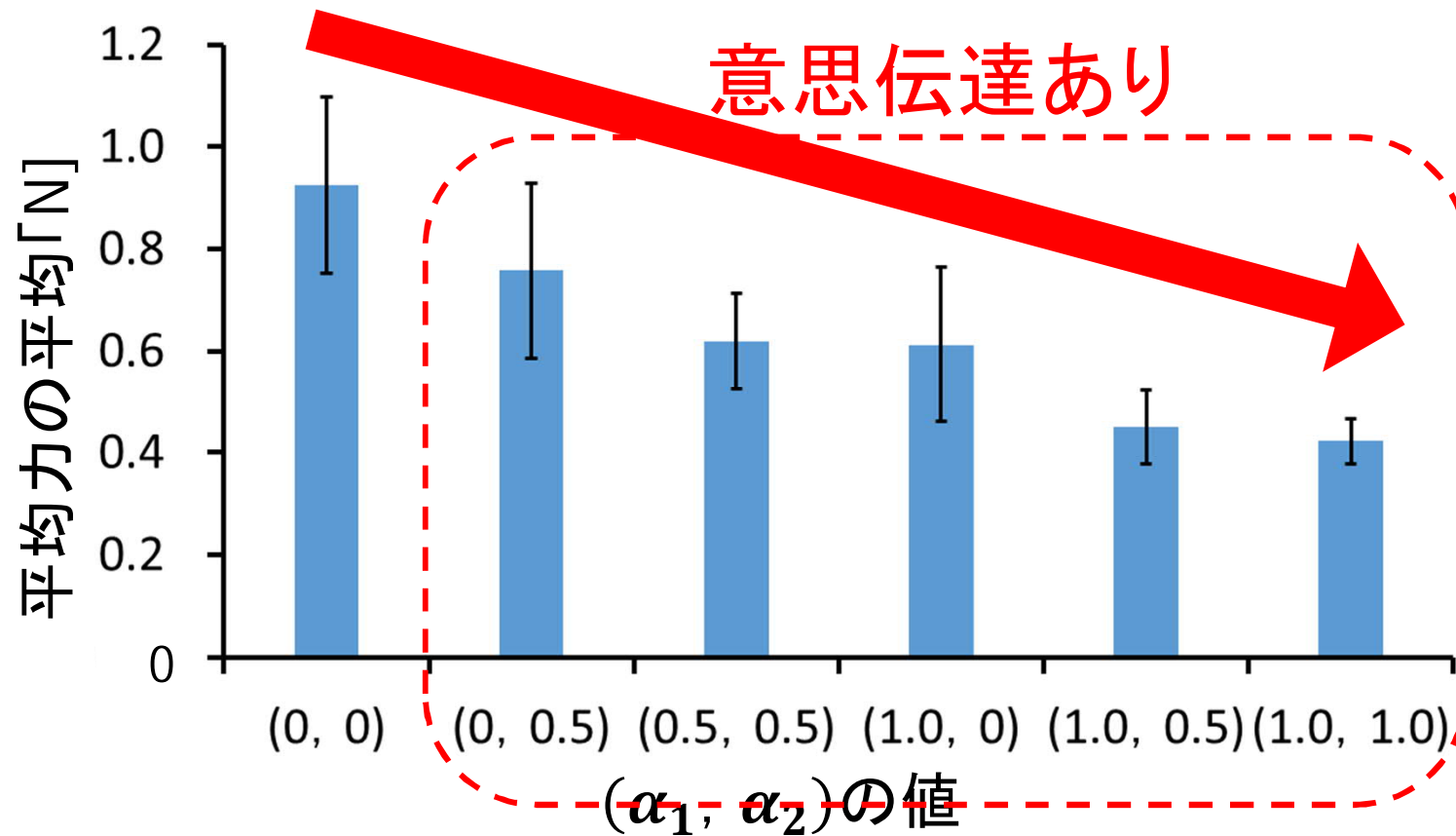
実験方法(3/3)

- α_1, α_2 の値を変化させ, 作業を実施
(α_1, α_2)
= $\{(0, 0), (0, 0.5), (0, 1.0), (1.0, 0), (1.0, 0.5), (1.0, 1.0)\}$
- 6通りをランダムな順番で10回ずつ行い, 各作業において角材に加わった力の平均と最大を測定
- 10個の力の平均と最大からそれぞれ平均(平均力の平均, 最大力の平均)を計算

実験結果(1/5)

平均力の平均

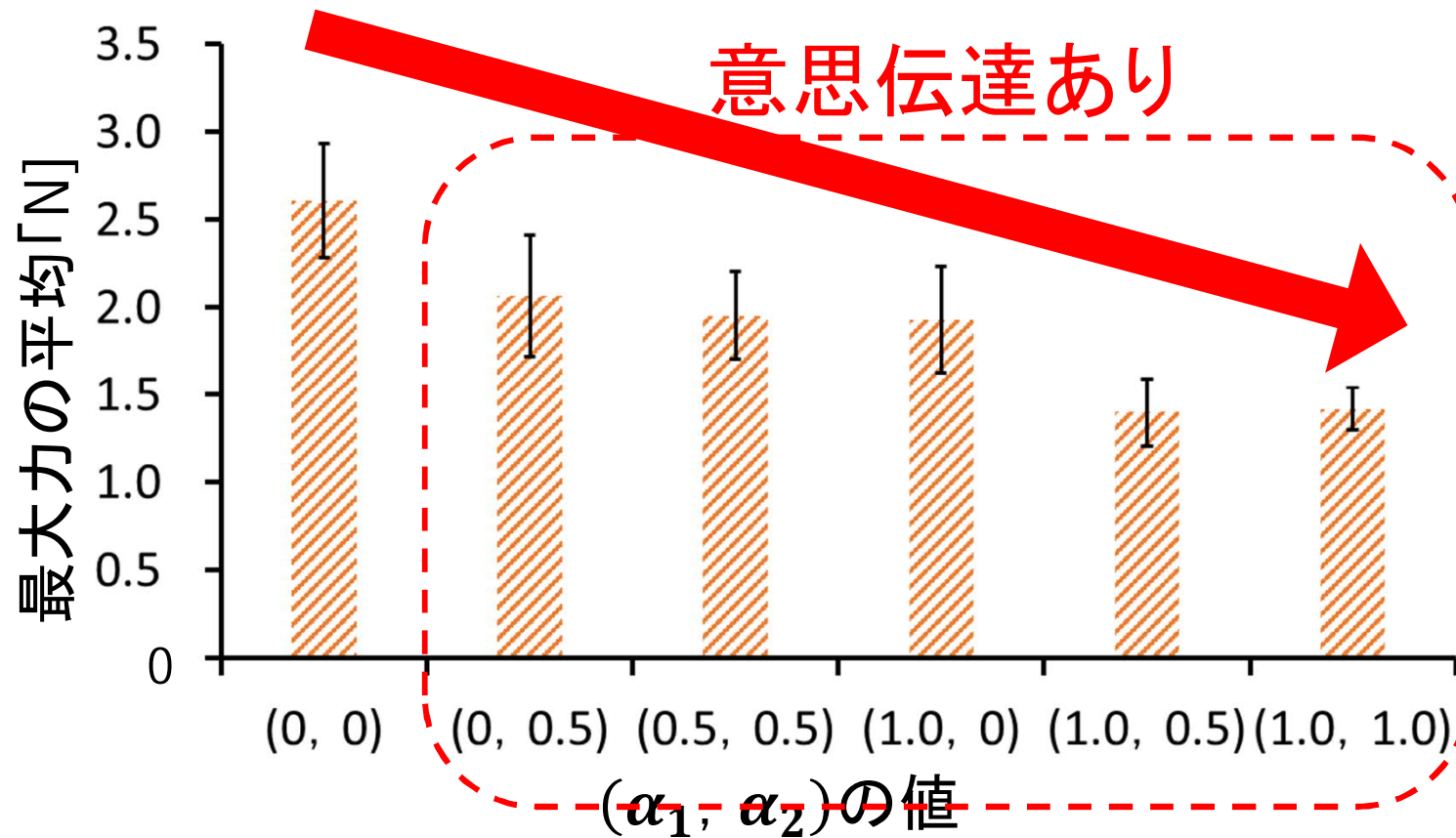
I : 95%信頼区間



実験結果(2/5)

最大力の平均

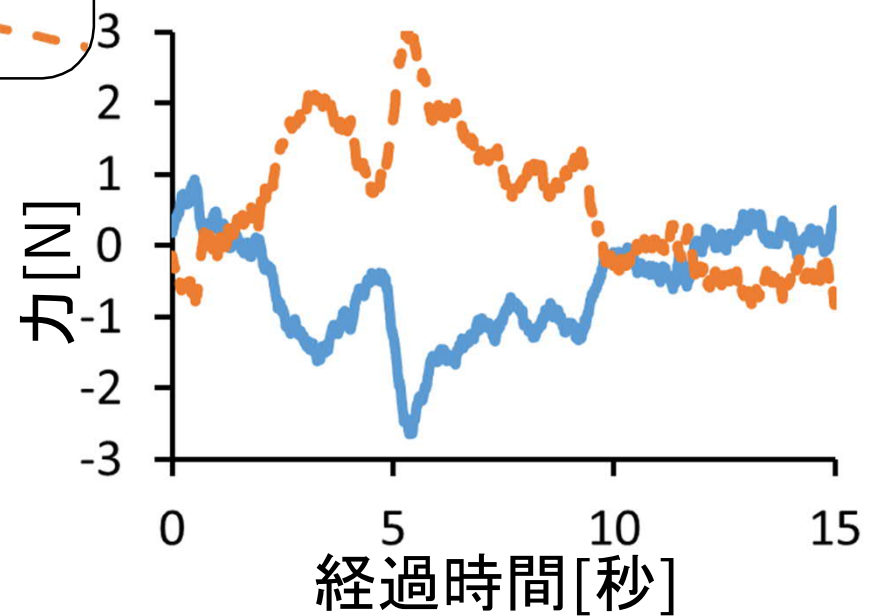
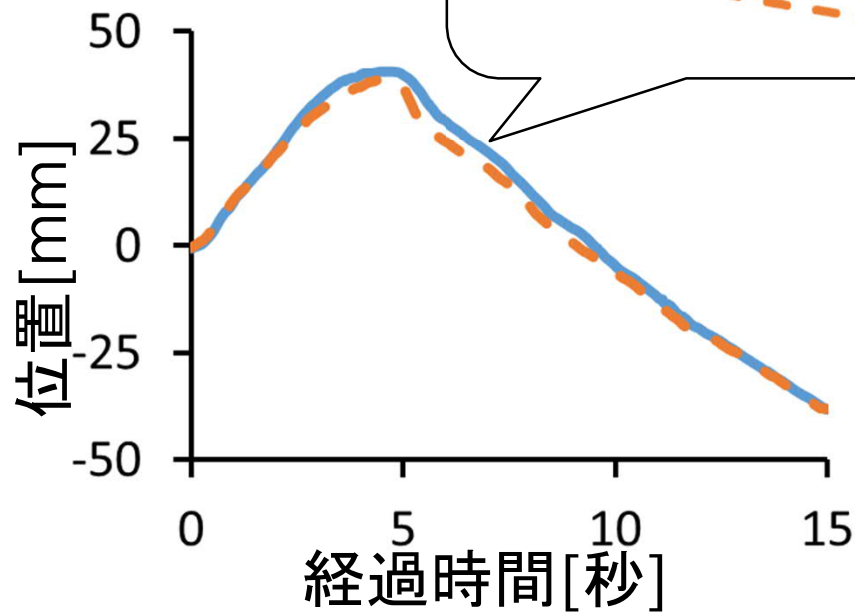
I : 95%信頼区間



実験結果(3/5)

経過時間に対する位置の例

— ロボットアーム1
- - - ロボットアーム2

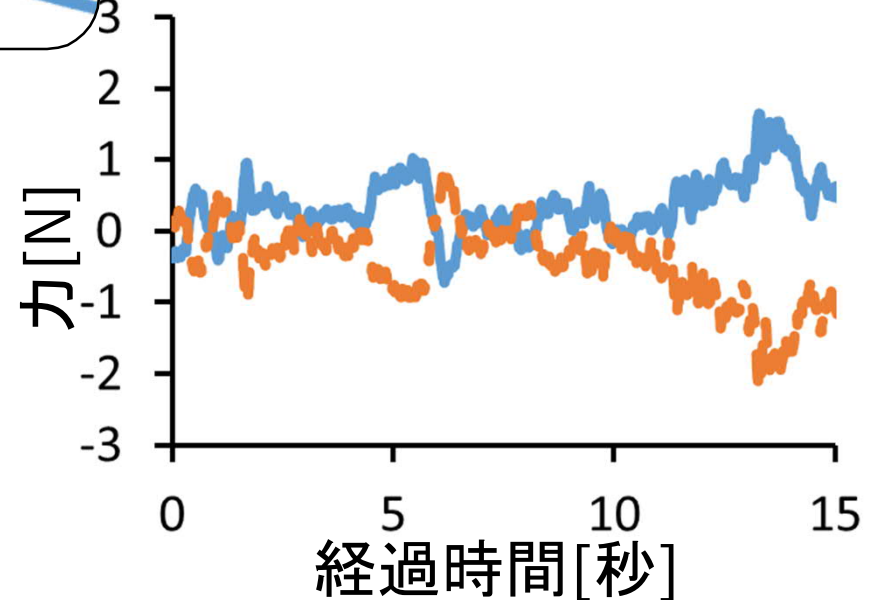
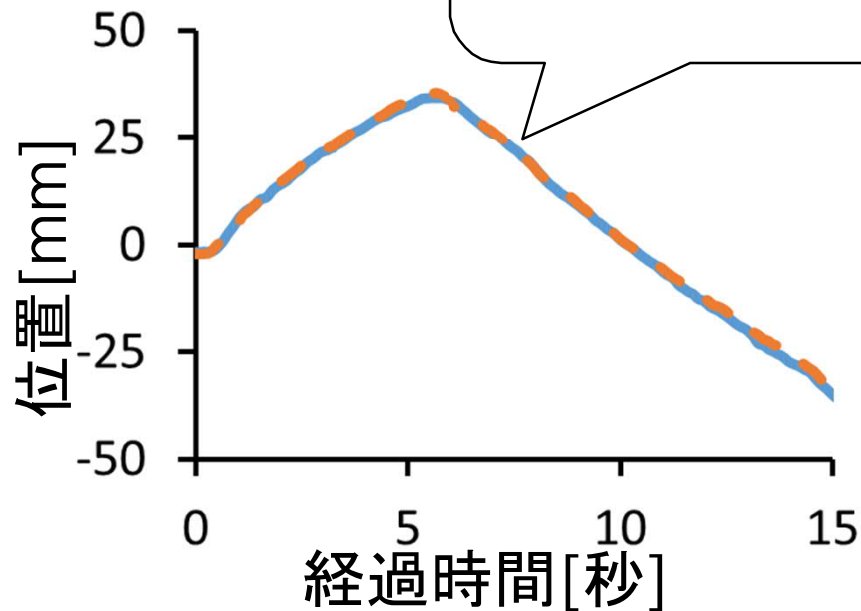


$(\alpha_1, \alpha_2) = (0, 0)$ の場合

実験結果(4/5)

経過時間に対する位置の例

— ロボットアーム1
- - - ロボットアーム2



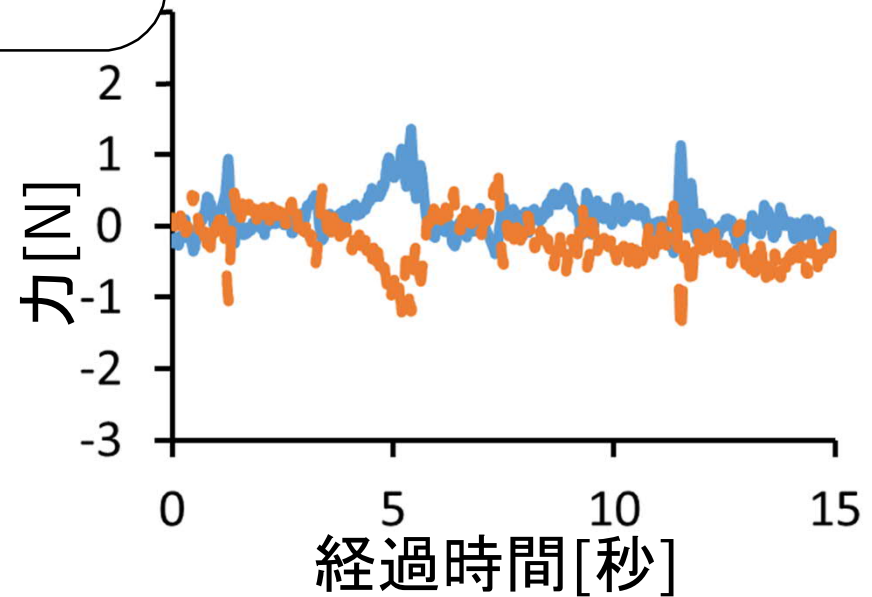
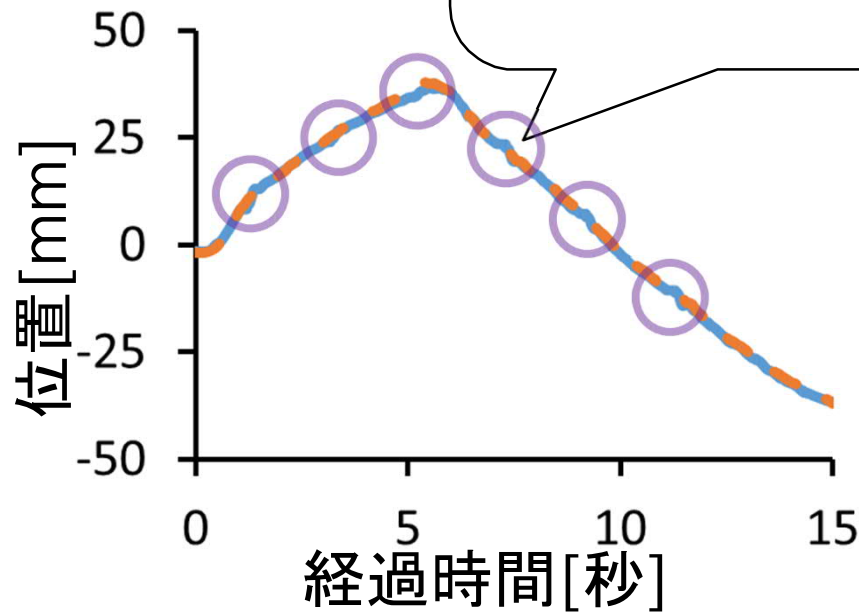
$(\alpha_1, \alpha_2) = (0.5, 0.5)$ の場合

実験結果(5/5)

経過時間に

列

— ロボットアーム1
- - - ロボットアーム2

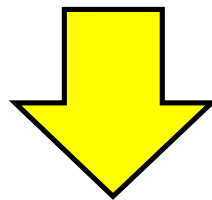


$(\alpha_1, \alpha_2) = (1.0, 1.0)$ の場合



結論

- 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を用いて、一つの物体を一緒に運ぶ作業を対象
- 二人の利用者がそれぞれ触覚インタフェース装置を用いて、ロボットアームを遠隔操作
- 利用者間の協調のために、触覚インタフェース装置間の位置ベクトルから計算される反力と、力覚センサが検知した力の比率を変化させ、利用者に提示



二つの力を感じる事ができる場合が好ましい



今後の課題

- 触覚インタフェース装置間のネットワーク遅延などの影響を調査
- 反力の計算に用いるパラメータと二つの力の比率の最適化
- 視覚情報を用いるなどをしてし、意思伝達の精度を向上
- 一人の場合と同程度に物体に加わる力を軽減