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及ぼす通信品質の変化の影響

西依 航太[†], 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

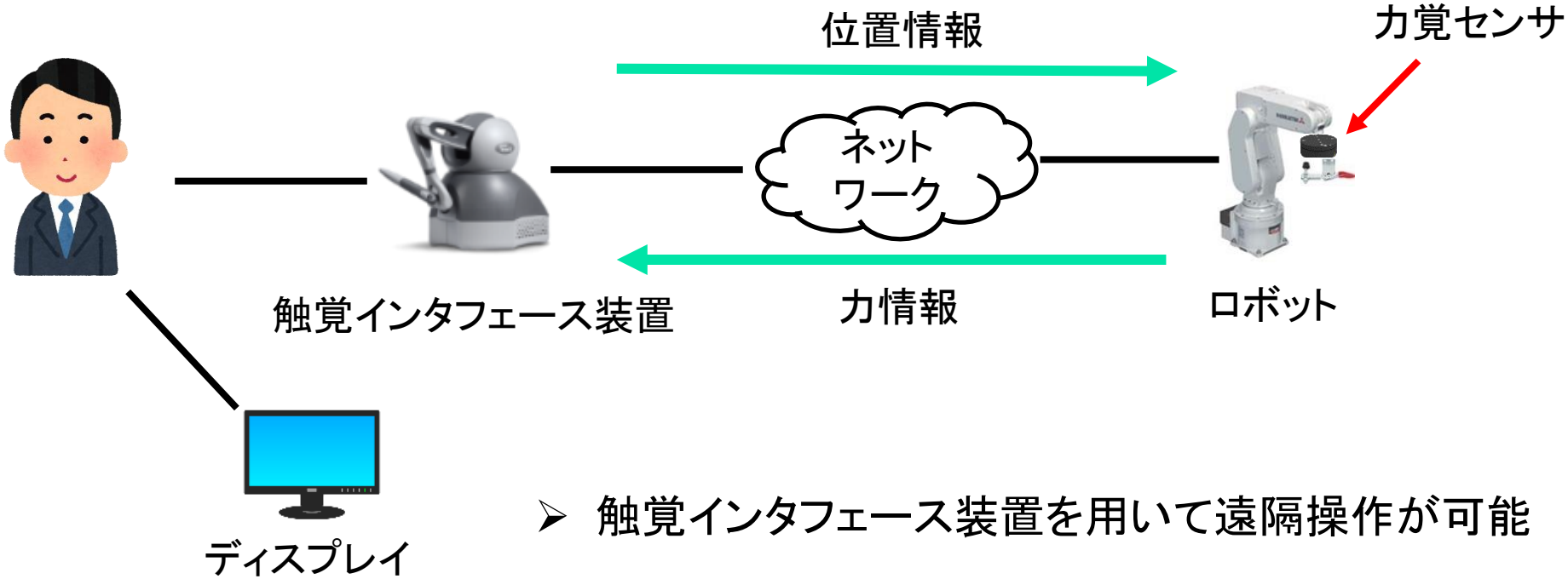
映像情報メディア学会研究会
2022年 12月 7日

発表内容

- 背景
- 従来研究
- 本研究
- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム
- マスタ・スレーブシステム
- 力情報を用いたロボット位置制御
- 実験内容
- 実験結果
- 結論
- 今後の課題

背景(1/3)

力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム

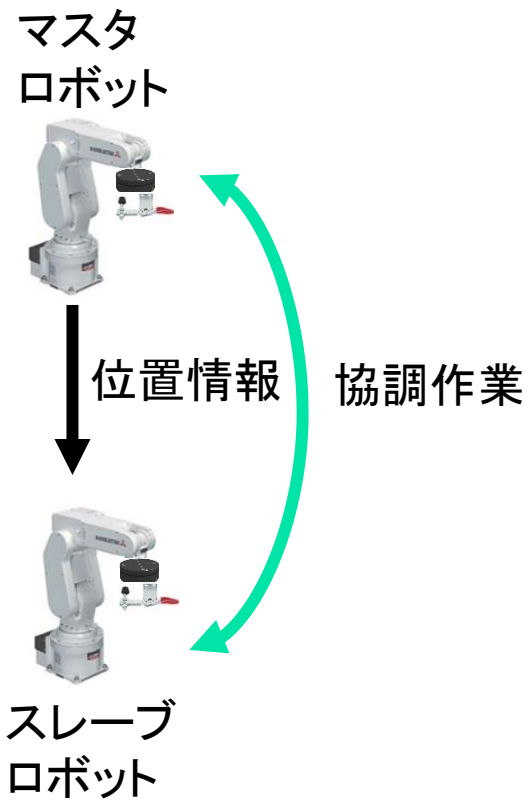


- 触覚インタフェース装置を用いて遠隔操作が可能
- 力覚センサから得られた力情報を触覚インタフェース装置に出力

背景(2/3)

遠隔ロボットシステムを複数用いることで、協調作業が可能

マスタ・スレーブの関係がロボット間にある場合は、マスタロボットの位置情報をスレーブロボットに送信することで追従



背景(3/3)

通信環境が劣悪になると様々な不具合が発生する可能性

ロボット間通信が困難な場合に、力情報を用いたロボット位置制御

従来研究

二つの力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムを使用して, 角材を把持して一緒に運ぶ協調作業

↓

二つのロボットに、マスタ・スレーブの関係を持たせ、適応型Δ因果順序制御の提案*1

劣悪な通信環境を想定して力覚センサからの力情報のみを用いたロボット位置制御の提案*2

*1 Y. Hara *et al.,* Proc. NetGames, Nov. 2022.
*2 Y. Ishibashi *et al.,* Proc. IEEE ICCE-TW. July 2022.

本研究

従来研究の問題点

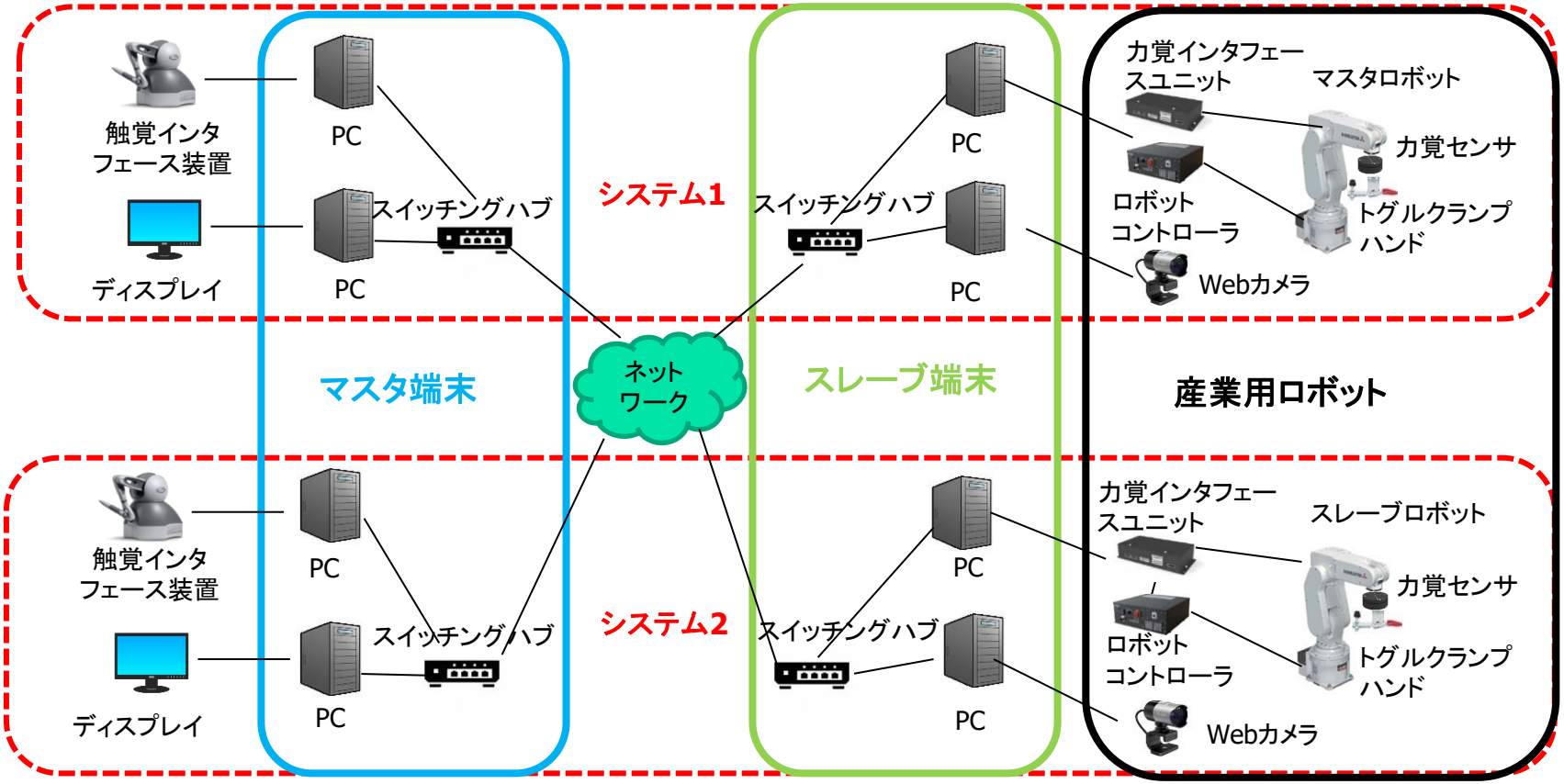
実際に通信品質が変化した時に力情報を用いたロボット位置制御への切り替えの検討が行われていない

↓

本研究

通信品質の変化に応じて制御の切り替えを行い、その効果を調査

システム構成


触覚インタ
フェース装置
ディスプレイ
PC
PC
スイッチングハブ
システム1
スイッチングハブ
PC
PC
力覚インタフェー
スユニット
マスタロボット
力覚センサ
ロボット
コントローラ
トグルクランプ
ハンド
Webカメラ
マスタ端末
ネット
ワーク
スレーブ端末
産業用ロボット
触覚インタ
フェース装置
ディスプレイ
PC
PC
スイッチングハブ
システム2
スイッチングハブ
PC
PC
力覚インタフェー
スユニット
スレーブロボット
力覚センサ
ロボット
コントローラ
トグルクランプ
ハンド
Webカメラ

マスタ・スレーブシステム(1/2)

*1 Y. Hara *et al.,* Proc. NetGames, Nov. 2022.

位置情報を使用する場合

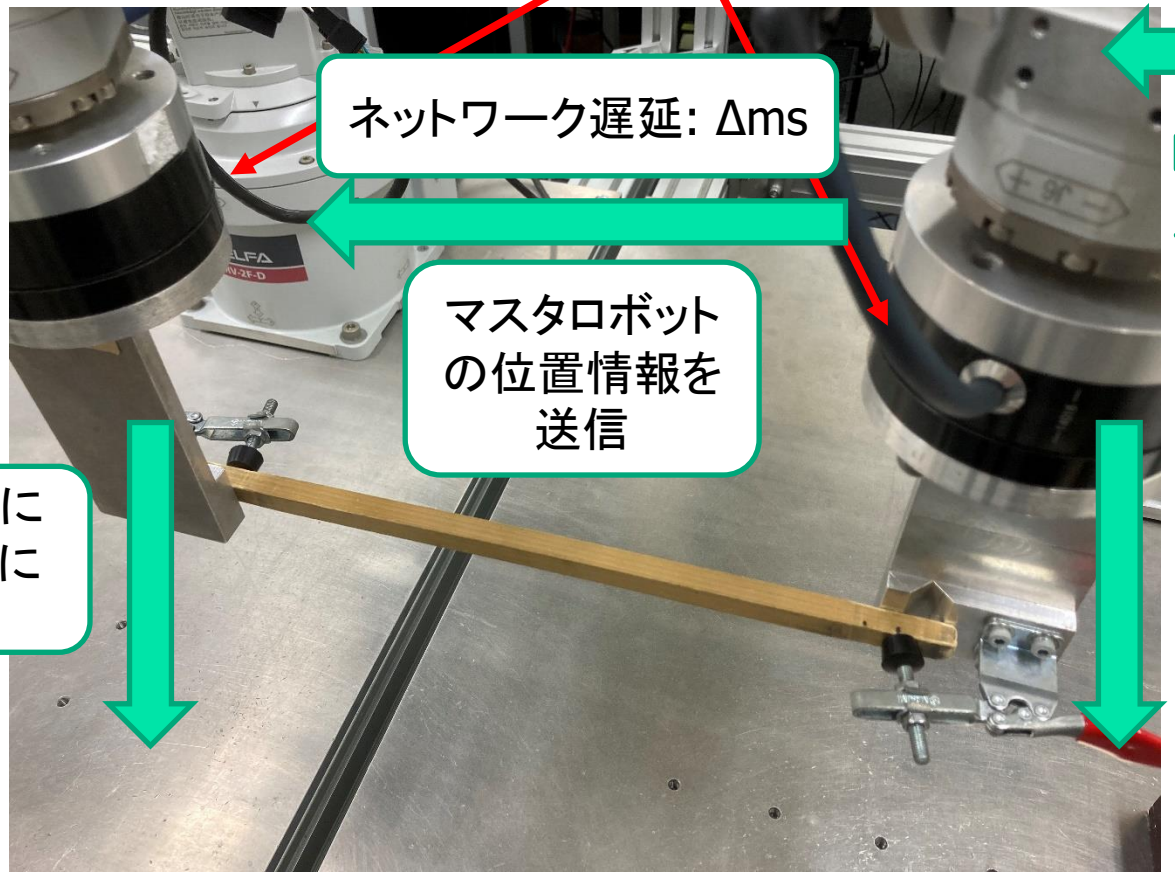
適応型Δ因果順序制御*1

触覚インタフェース装置

力覚センサ

マスタロボット

スレーブロボット



ネットワーク遅延: Δms

位置情報を送信

マスタロボットの位置情報を送信

Δms送信を遅らせる

位置情報を元にマスタロボットに追従

ロボットを動かす

マスタ・スレーブシステム(2/2)

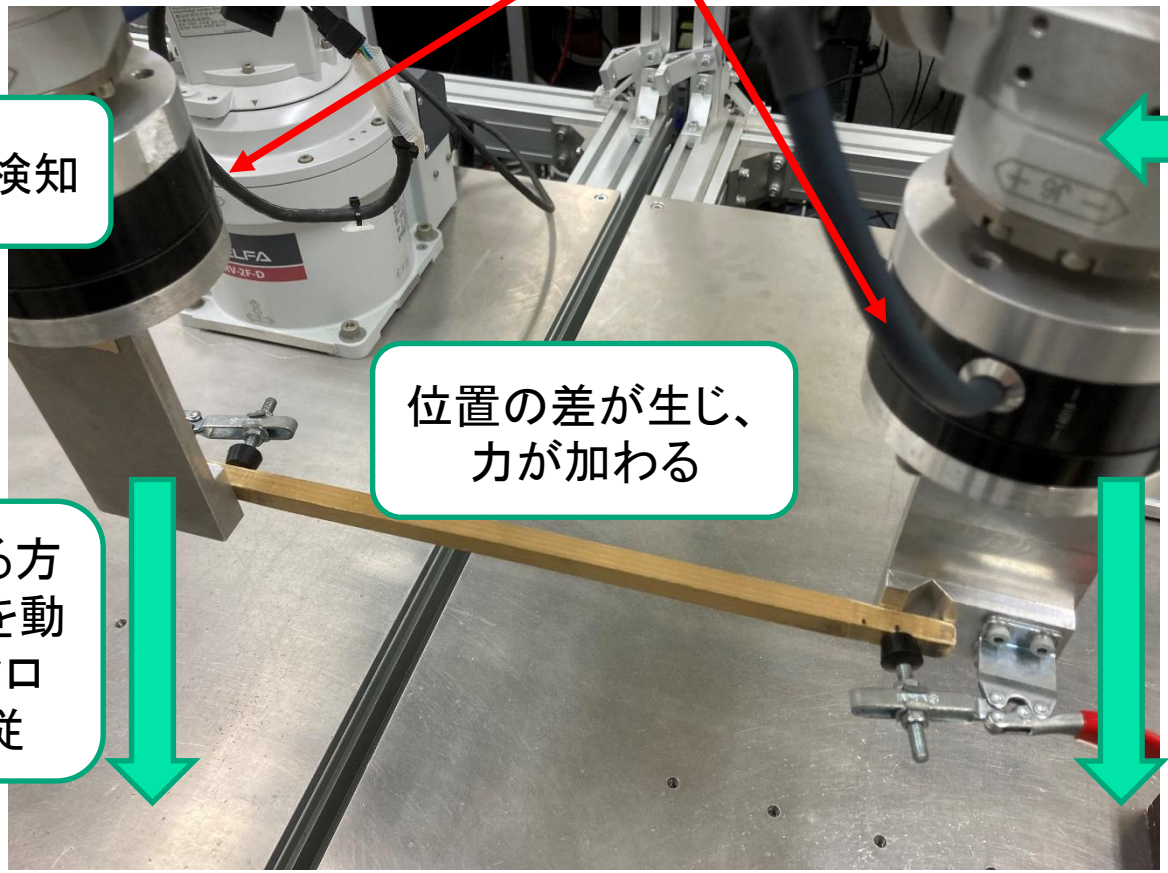
力情報を使用する場合

触覚インタフェース装置

力覚センサ

スレーブロボット

マスタロボット



加わった力を検知

位置情報を送信

位置の差が生じ、力が加わる

力が減少する方向にロボットを動かしてマスタロボットに追従

ロボットを動かす

反力の計算方法*2

*2 Y. Ishibashi *et al.,* Proc. IEEE ICCE-TW. July 2022.

$$\boldsymbol{F}_t^{(\mathrm{m})} = K_{\mathrm{scale}}^{(\mathrm{F})} \boldsymbol{F}_{t-1}^{(\mathrm{s})} \qquad (1)$$

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

$\boldsymbol{F}_t^{(\mathrm{s})}$: 時刻$t$(ms)にスレーブ端末から取得した値

$K_{\mathrm{scale}}^{(\mathrm{F})}$: $\boldsymbol{F}_{t-1}^{(\mathrm{s})}$にかける倍率（=0.5）

位置の計算方法*2

*2 Y. Ishibashi *et al.,* Proc. IEEE ICCE-TW. July 2022.

$$\boldsymbol{S}_t = K_{\mathrm{scale}}^{(\mathrm{P})}\left(\boldsymbol{M}_{t-1} + \boldsymbol{V}_{t-1}\right) \quad \left(|\boldsymbol{V}_{t-1}| < V_{\mathrm{max}}\right) \qquad (2)$$

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

$\boldsymbol{M}_t$ ： 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

$\boldsymbol{V}_t$ ： 時刻$t(>0)$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速度（=5mm/ms）

$K_{\mathrm{scale}}^{(\mathrm{P})}$: （$\boldsymbol{M}_{t-1} + \boldsymbol{V}_{t-1}$)にかける倍率（=0.5）

力情報を用いたロボット位置制御

*2 Y. Ishibashi *et al.,* Proc. IEEE ICCE-TW, July 2022.
*3 S. Ishikawa *et al.,* Proc. WSCE, Dec. 2019

運動方程式による制御*2

$$\boldsymbol{P}_t = \begin{cases} 0.9\boldsymbol{P}_{t-1} + 0.279\boldsymbol{F}_t \ (\text{if } |\boldsymbol{P}_{t-1}| \geq 0.1\text{mm}) \\ 0.279\boldsymbol{F}_t \ (\text{Otherwise})^{*3} \end{cases} \quad (3)$$

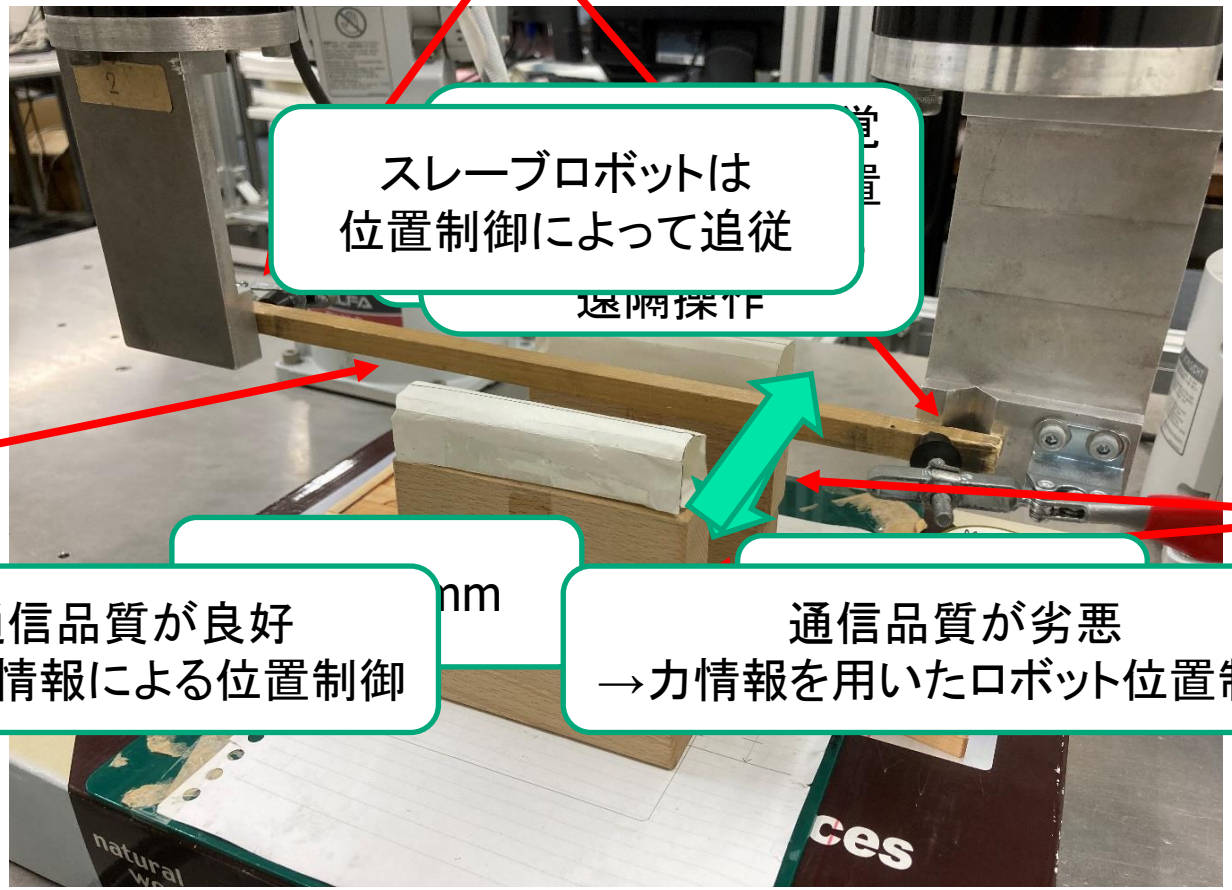
$\boldsymbol{P}_t$: 時刻tにおけるロボットアームの位置調整ベクトル
$\boldsymbol{F}_t$: 時刻tにおける角材に加わる力

実験内容(1/3)

トグルクランプ
ハンド

スレーブロボット

マスタロボット



スレーブロボットは
位置制御によって追従

角材

積み木

通信品質が良好
→位置情報による位置制御

通信品質が劣悪
→力情報を用いたロボット位置制御

実験内容(2/3)

実験1

- 折り返し(5秒後)の直前、中、直後の2秒間通信が途絶する
- 制御を切り替えない場合と切り替える場合の角材に加わる力を比較

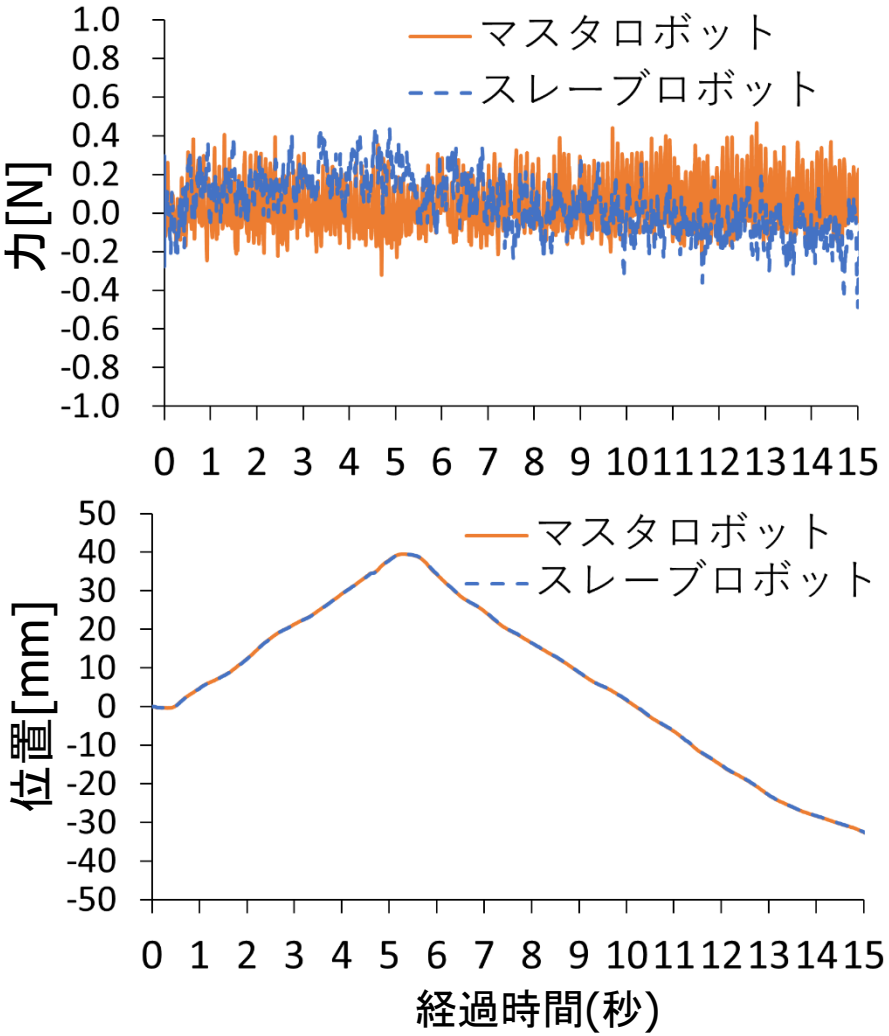
実験内容(3/3)

実験2

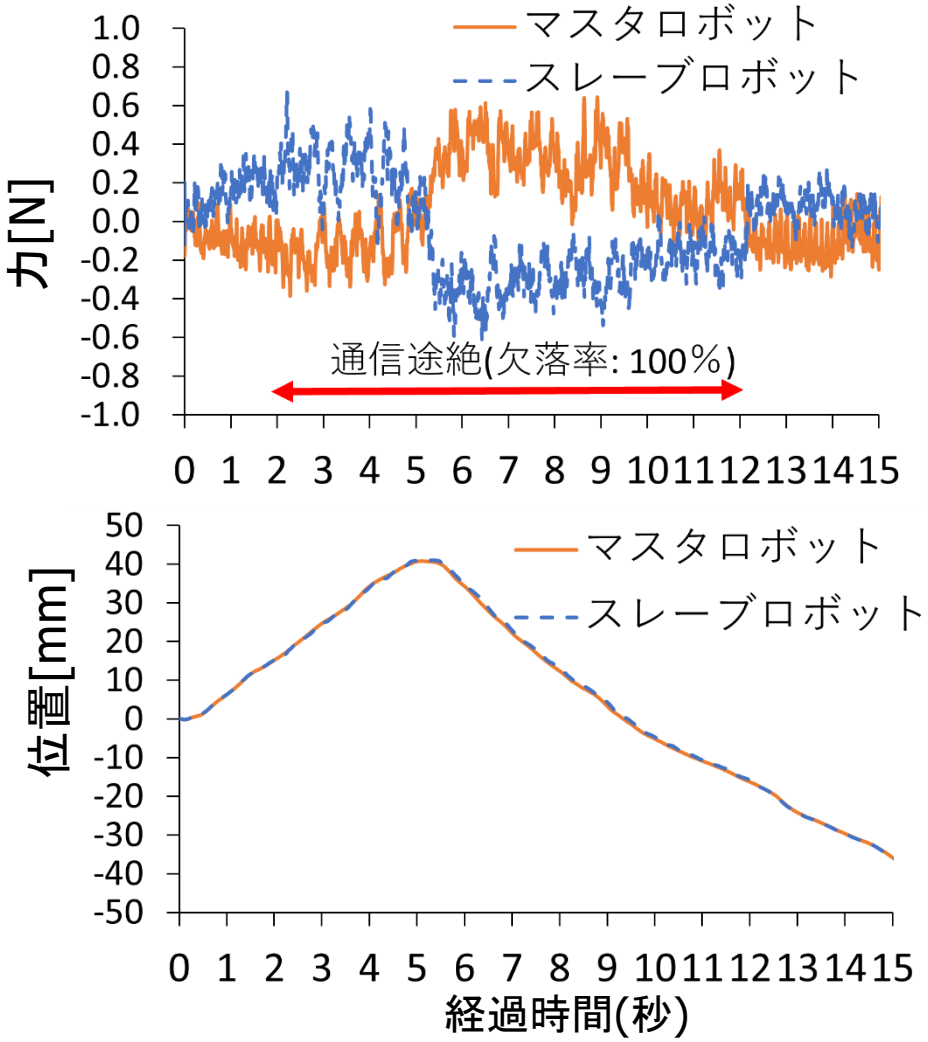
- 10秒間一様な確率で位置情報が欠落する
- 欠落率: 0%、10%、25%・・・100%
- 制御を切り替えない場合と切り替える場合の角材に加わる力を比較

実験の様子

実験結果(1/5)



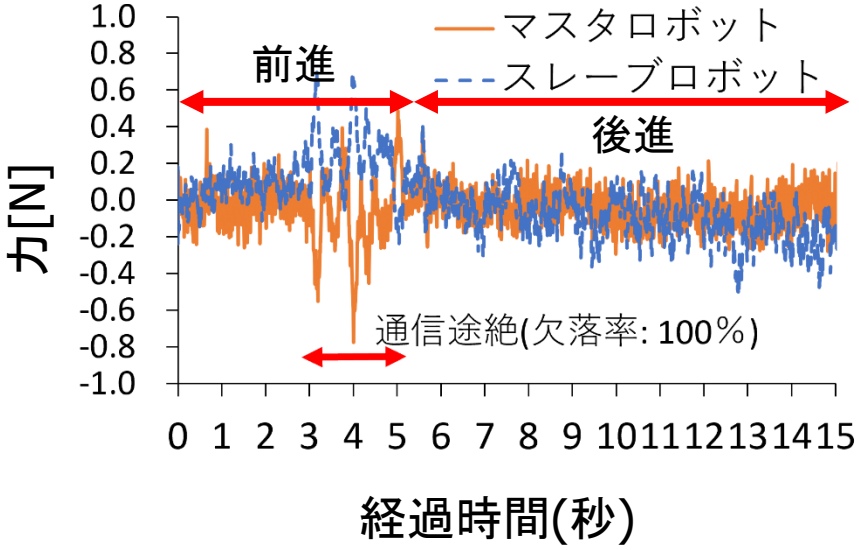
欠落率: 0%



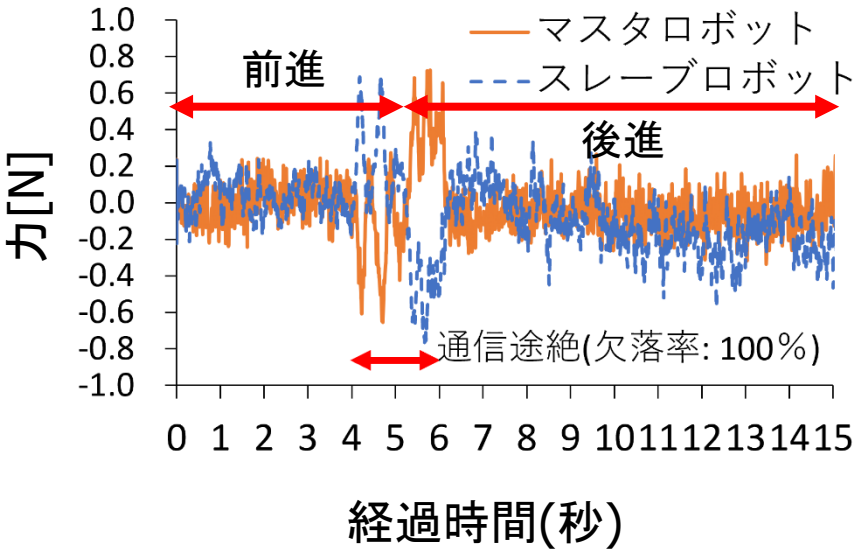
欠落率: 100%

制御を切り替える場合

実験結果(2/5)



折り返し直前に途絶

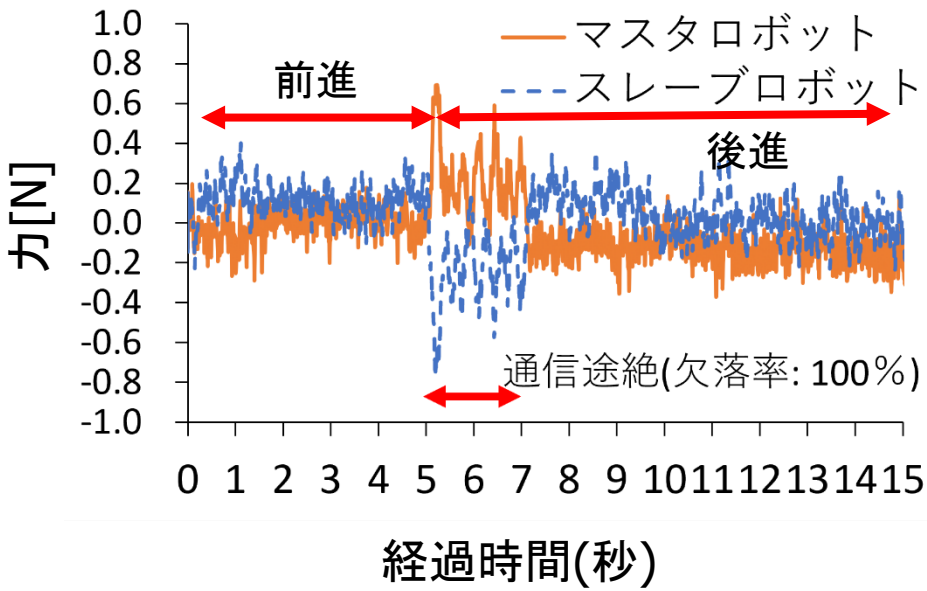


折り返し中に途絶

制御を切り替える場合

- 制御を切り替えない場合は通信復旧時に大幅な位置変化が起こるため、安全のためロボットを停止

実験結果(3/5)

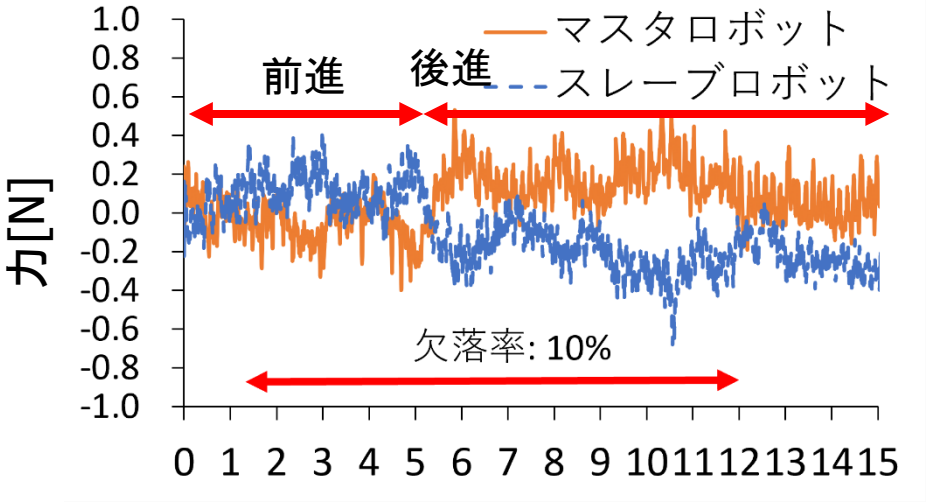


折り返し直後に途絶

制御を切り替える場合

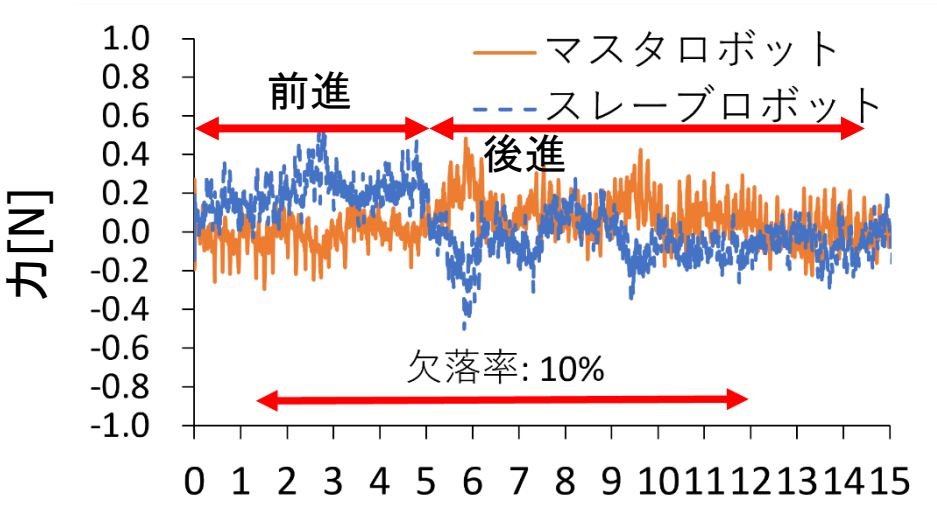
- 切り替えるタイミングに関わらず制御の切り替えは有効

実験結果(4/5)



経過時間(秒)

制御を切り替えない場合



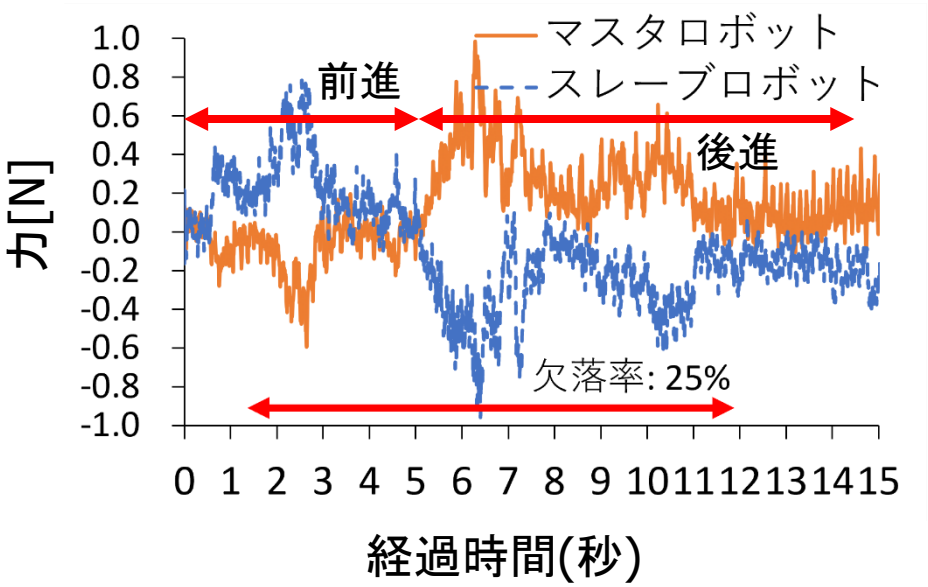
経過時間(秒)

制御を切り替える場合

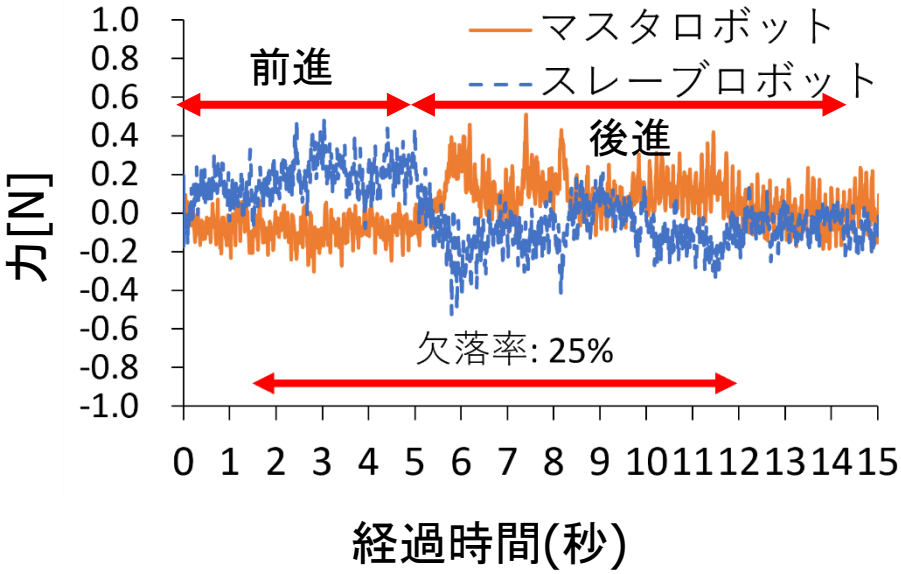
欠落率: 10%

➢ 切り替えの影響は小さい

実験結果(5/5)



制御を切り替えない場合



制御を切り替える場合

欠落率: 25%

- 欠落率が大きくなるほど切り替えの効果が大きい

結論

協調作業において通信品質の変化に応じたロボット位置制御の切り替えの効果の調査

- 切り替えは有効
- 切り替えるタイミングの影響は小さい
- 位置情報が欠落する確率が大きくなるほど切り替えの効果が大きい

今後の課題

- 運動方程式による制御を、位置情報による制御と同等以上に改良
- 前後以外の方向の制御の検討