力覚を用いた遠隔ロボットシステム間における物体を手渡す作業に対するロボット位置の追従制御

豊田 裕一[†] 石橋 豊[†] 黄 平国[‡] 立岩 佑一郎[†] 渡邉 均[*]

[†]名古屋工業大学

[‡]星城大学

[*]東京理科大学

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

2019年1月18日(金)　首都大学東京

発表概要

- 背景
- 目的
- 力覚を用いた遠隔ロボットシステム
- ロボット位置の追従制御
- 実験方法
- 実験結果
- 結論
- 今後の課題

背景

力覚を用いた遠隔ロボットシステムにおける
協調作業（物体を一緒に運んだり手渡したり）
に関する研究が注目

力覚に関する情報を転送することにより，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

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

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**
- **ロボット動作が不安定になり，大きく振動**

QoS制御，安定化制御

目的(1/2)

*1 田口 他, 信学総大, B-11-17, Mar. 2018.
*2 Toyoda *et al.*, Proc. IEEE ICECE, Dec. 2018.

従来研究

- 力覚を用いた遠隔ロボットシステムを二つ用いて，二つのロボットで物体を一緒に運ぶ協調作業を扱い，ネットワーク遅延がこの作業にどのような影響を及ぼすかを調査[*1]
- 上記のシステムを用いて，二つのロボットで物体を手渡す協調作業を扱い，ネットワーク遅延がこの作業にどのような影響を及ぼすかを調査[*2]

ネットワーク遅延が増加すると，操作性が劣化し，作業時間が増加

目的(2/2)

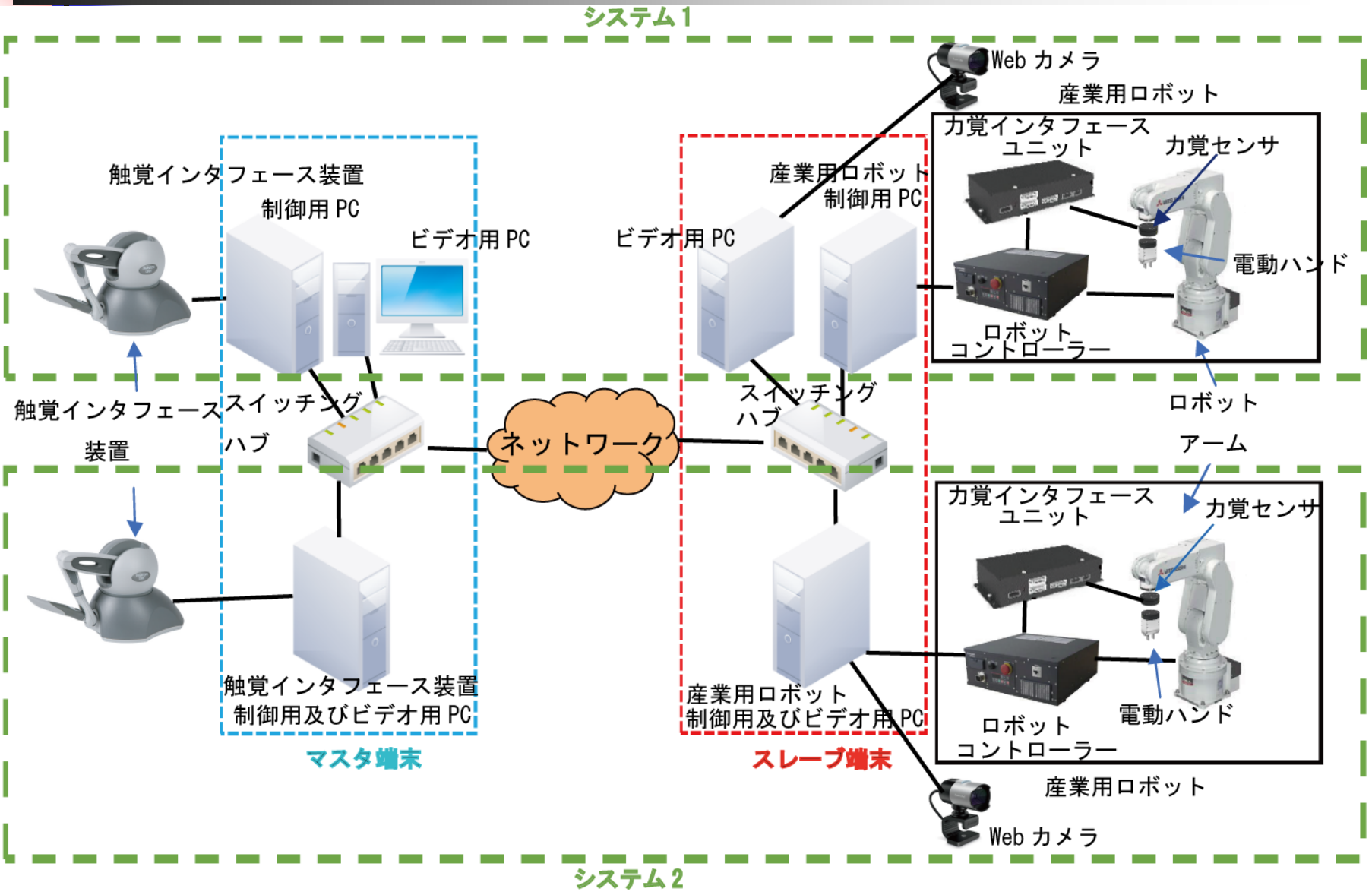
問題点

力覚を用いた遠隔ロボットシステムにおける協調作業で，ネットワーク遅延の増加に伴い作業時間が増加

本研究

力覚を用いた二つの遠隔ロボットシステム間で，物体を手渡す作業を行う場合のロボット位置の追従制御を提案し，その有効性を調査

力覚を用いた
遠隔ロボットシステムの構成



産業用ロボットの外観

産業用
ロボットアーム

力覚センサ

電動ハンド

金属の台

電動ハンドの仕様

- 多機能電動ハンド（株式会社TAIYO製）を使用
- 電動ハンドの把持力は 40N に設定
- 電動ハンドの開閉の速度は 30mm/s に設定

反力の計算方法

*2 K. Suzuki *et al.*, Proc. IEEE GCCE, Oct. 2015.

力覚センサの値に，マスタ端末で一定の倍率($K_{\mathrm{scale}} > 0$)をかけて触覚インタフェース装置によって反力を提示[*1]

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

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

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

$\boldsymbol{F}_t^{(\mathrm{m})}$が触覚インタフェース装置の最大提示反力である3.3Nを超えた場合，触覚インタフェース装置には3.3Nが出力

予備実験により，$K_{\mathrm{scale}} = 0.1$に決定

ロボットの位置の決定方法

*2 K. Suzuki *et al.*, Proc. IEEE GCCE, Oct. 2015.

触覚インタフェース装置の位置に産業用ロボットの速度を加算してロボット位置を決定

$$\boldsymbol{S}_t = \begin{cases} \boldsymbol{M}_{t-1} + \boldsymbol{V}_{t-1}, & (|\boldsymbol{V}_{t-1}| \leq V_{\max}) \\ \boldsymbol{M}_{t-1} + V_{\max}\dfrac{\boldsymbol{V}_{t-1}}{|\boldsymbol{V}_{t-1}|}, & (otherwise) \end{cases} \quad (2)$$

$\boldsymbol{S}_t$：時刻$t(\geqq 2)$におけるロボットの位置ベクトル

$\boldsymbol{M}_t$：時刻$t(\geqq 2)$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$t(\geqq 2)$におけるロボットの速度ベクトル$(\boldsymbol{S}_t - \boldsymbol{S}_{t-1})$

$V_{\max}$：産業用ロボットの最大移動速度$(5\mathrm{mm/s})$

ロボットの位置の追従制御(1/2)

- システム1のロボットアーム（ロボットアーム1）の位置へ, システム2のロボットアーム(ロボットアーム2)の位置を自動的に近づけていき, その後は, 手動による操作と組み合わせる

- ロボットアーム1の位置情報を用いて目標位置を求め, ロボットアーム2を自動的に目標位置へ移動

- 手動による操作と組み合わせるとき, 位置が大きくずれないように, ある軸の方向の位置を固定し, 他の軸だけに対して, 式(2)を用いてロボットアーム2を移動させることが可能

ロボットの位置の追従制御(2/2)

- 追従制御によるx軸方向への移動は, 次式を用いて計算される（y軸, z軸方向の計算式も同様）

$$S_t^{(x)} = \begin{cases} S_{t-1}^{(x)} + V_{\text{follow-up}}^{(x)}, & (S_{t-1}^{(x)} < S_{\text{target}}^{(x)}) \\ S_{t-1}^{(x)} - V_{\text{follow-up}}^{(x)}, & (S_{t-1}^{(x)} > S_{\text{target}}^{(x)}) \\ S_{\text{target}}^{(x)}, & (S_{t-1}^{(x)} = S_{\text{target}}^{(x)}) \end{cases} \quad (3)$$

$S_t^{(x)}$ ：時刻tにおけるロボットアーム2の位置

$S_{\text{target}}^{(x)}$ ：目標位置

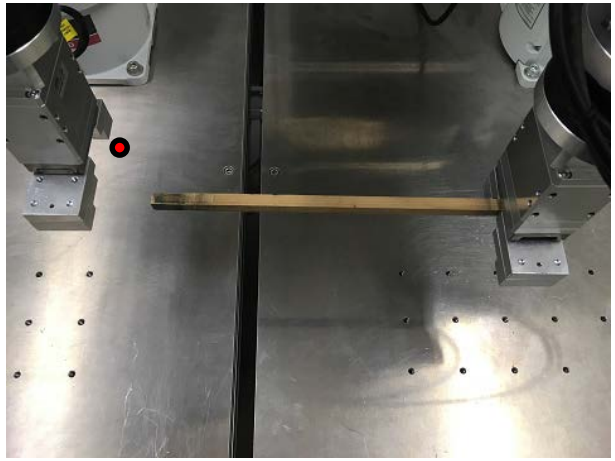
$V_{\text{follow-up}}^{(x)}$：移動の速さ(0.1mm/ms)

実験方法(1/2)

- ロボットアーム1の位置を固定し, ロボットアーム2の位置をそれに近づける
- ロボットアーム2がロボットアーム1へ角材を渡す作業とロボットアーム2がロボットアーム1から角材を受け取る作業
- 電動ハンドの向き: 平行
- 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
  - ✓ 片道の固定遅延(付加遅延と呼ぶ): 0ms～200ms
- 産業ロボットの操作を始めてから, 受け取る側が角材を把持し, 渡す側がハンドを開くまでの時間を計測

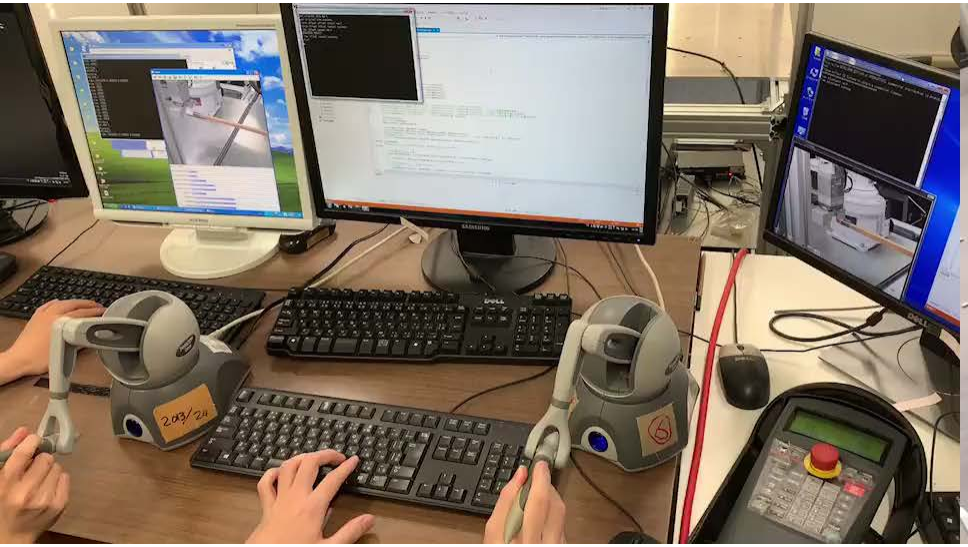
実験方法(2/2)

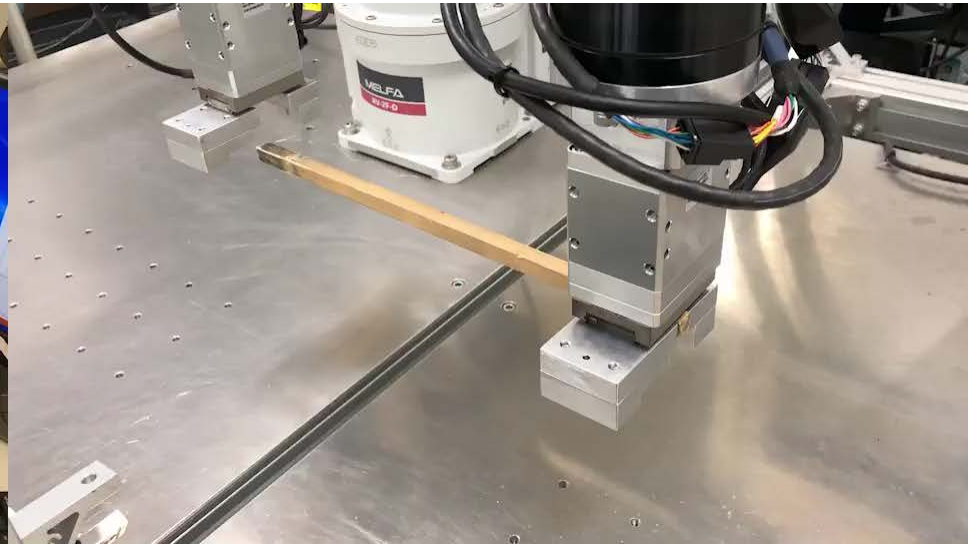
- 産業用ロボットアームの初期位置:
  電動ハンドの把持する部分と角材とが同じ高さで,
  前後左右に5cmの距離の位置



- 追従制御の目標位置:
  電動ハンドの把持する部分と角材とが同じ高さで,
  左右に1cmの距離の位置
- 作業内容, 制御の有無及び付加遅延の各組み合わせ一つに対してランダムな順序で10回試行

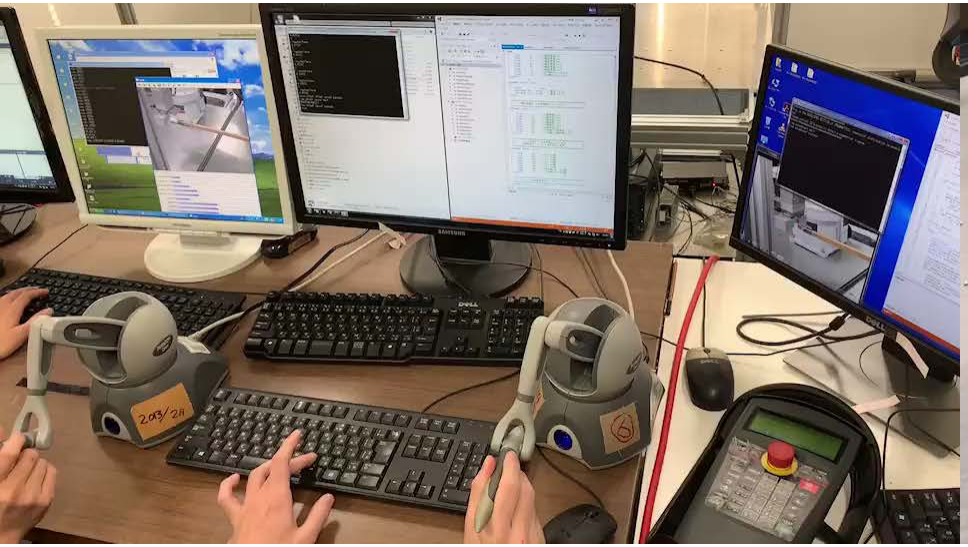
実験の様子(1/4)





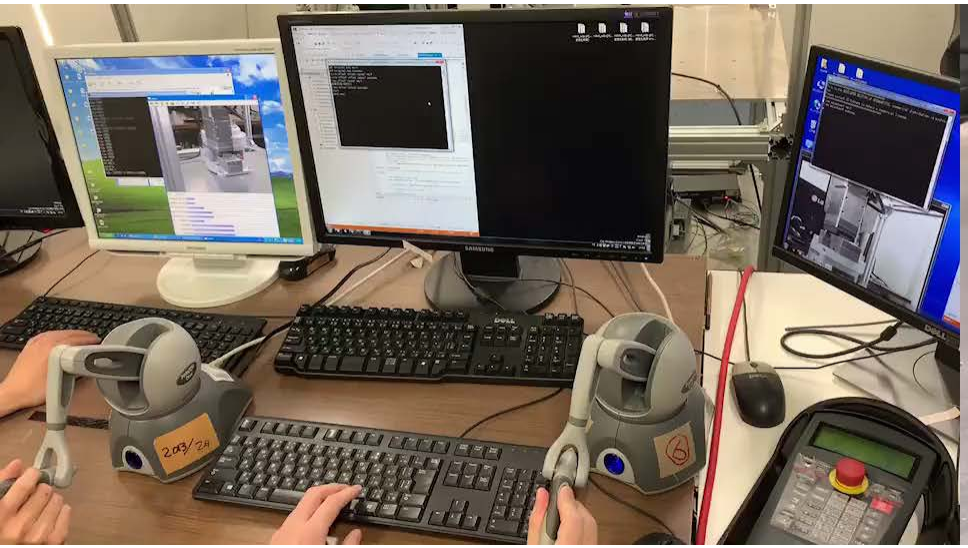
作業内容: 受け取る
付加遅延: 0ms
追従制御: なし

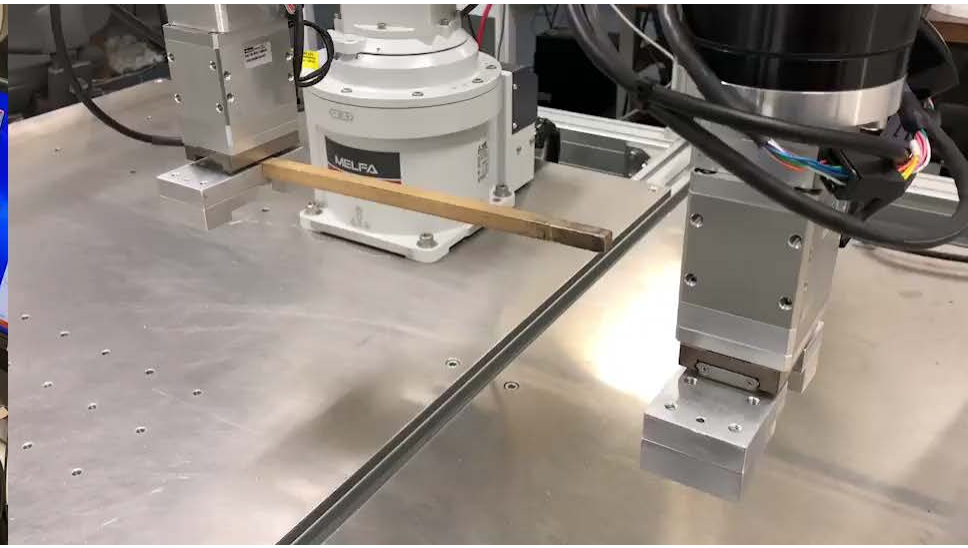
実験の様子(2/4)



作業内容: 受け取る
付加遅延: 0ms
追従制御: あり

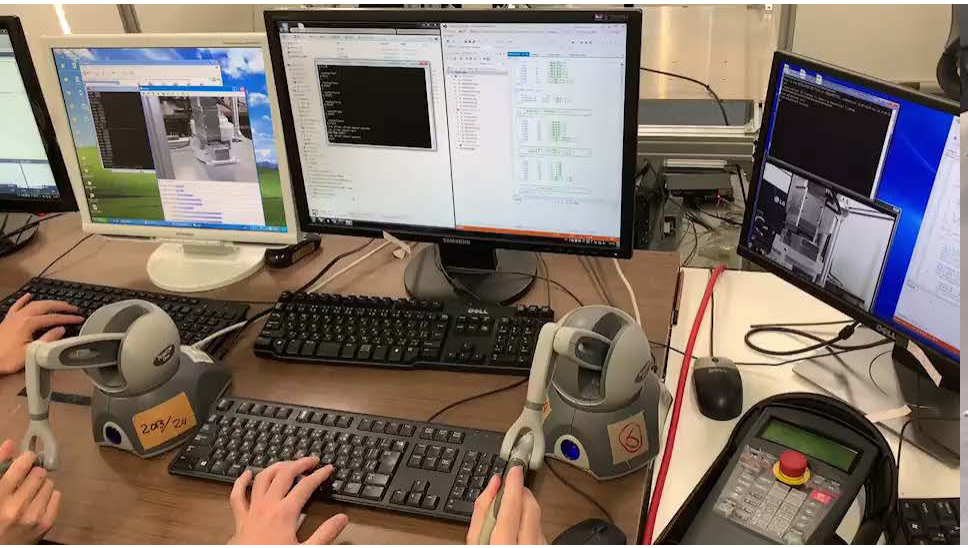
実験の様子(3/4)





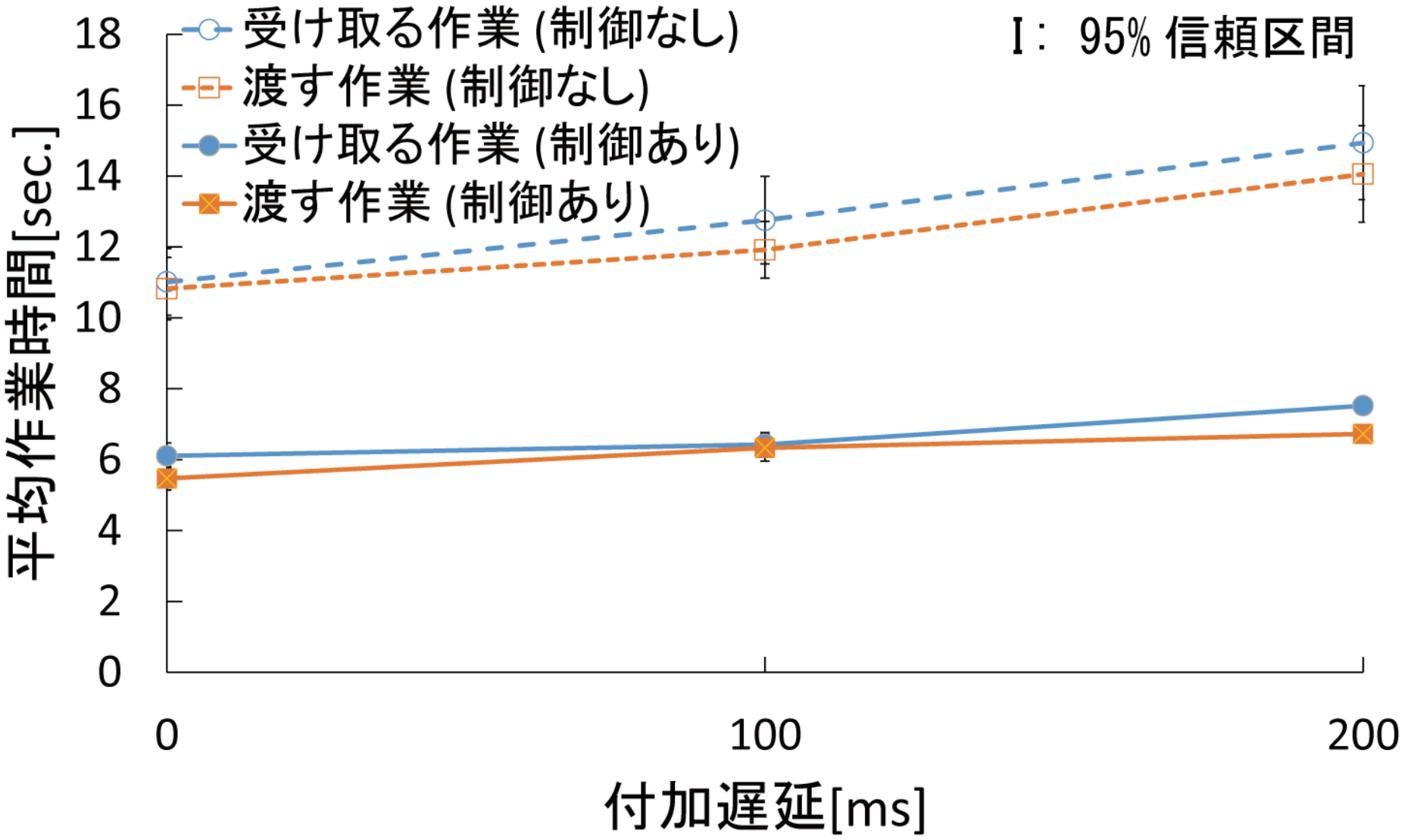
作業内容: 渡す
付加遅延: 0ms
追従制御: なし

実験の様子(4/4)



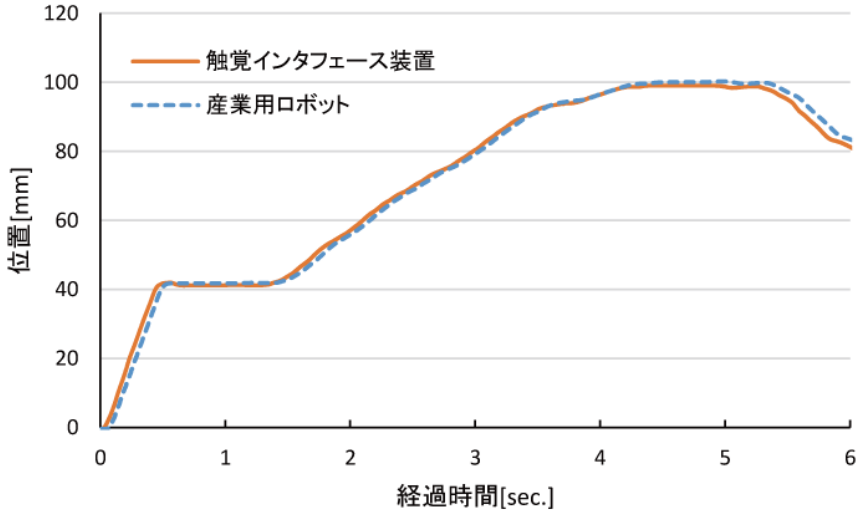
作業内容: 渡す
付加遅延: 0ms
追従制御: あり

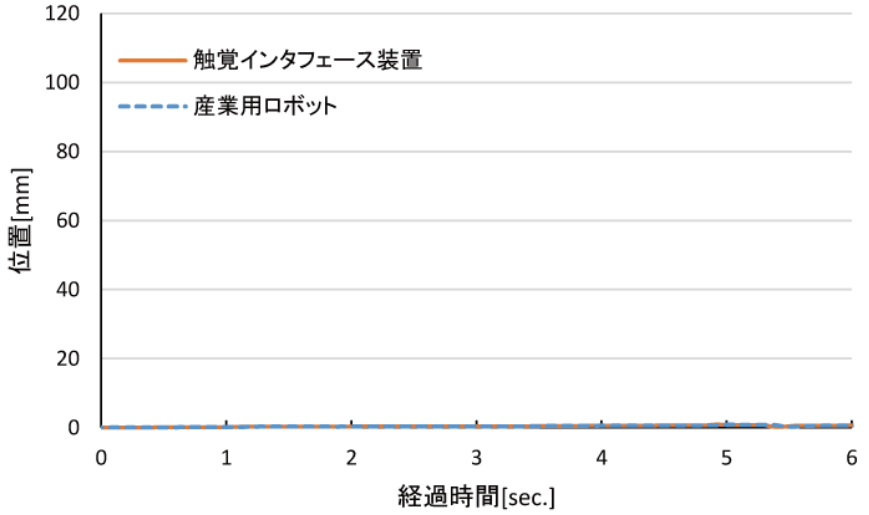
実験結果(1/2)

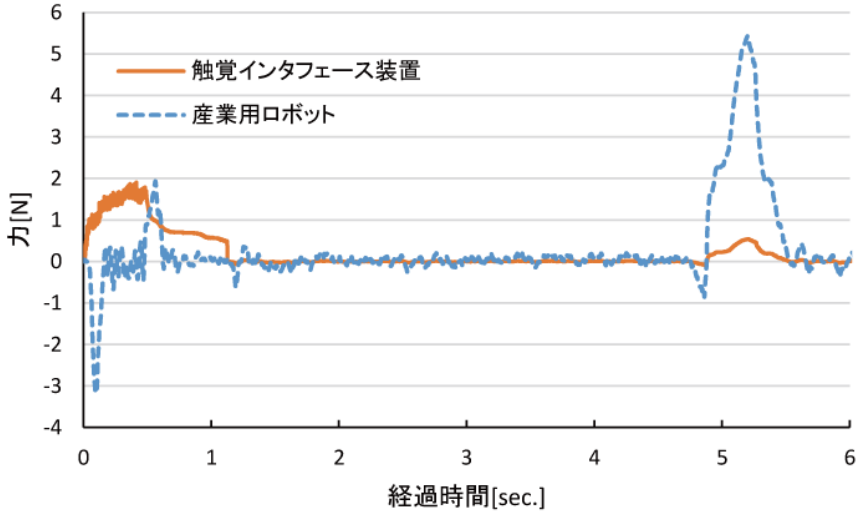

受け取る作業 (制御なし)
渡す作業 (制御なし)
受け取る作業 (制御あり)
渡す作業 (制御あり)
I： 95% 信頼区間
平均作業時間[sec.]
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
100
200
付加遅延[ms]

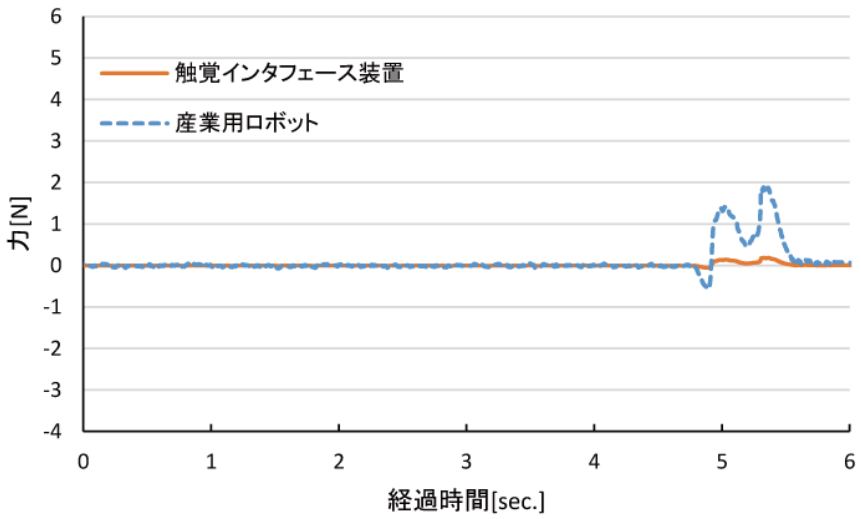
実験結果(4/6)

作業内容: 受け取る
付加遅延: 0ms
追従制御: あり



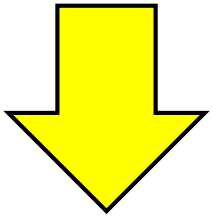






結論

力覚を用いた二つの遠隔ロボットシステム間で, 物体を手渡す作業を行う場合のロボット位置の追従制御を提案し, その有効性を調査



- 追従制御を用いることによって, 平均作業時間が小さくなる
- 追従制御を用いない場合は, 付加遅延の増加に伴い, 平均作業時間が大きく増加するが, 追従制御を用いる場合はその増加が抑制されている

今後の課題

- 移動している産業用ロボットとの物体を手渡す作業を行う場合の追従制御の有効性の調査
- 作業開始時の産業用ロボットの初期位置や，電動ハンドの向きが異なる場合での実験
- さらに高効率な追従制御の検討