

カ覚フィードバックを用いた 遠隔ロボットシステム間で 物体を挟んで運ぶための力調整制御

加藤 広也[†],石橋 豊[†],大西 仁[‡],黄 平国^{††}

「名古屋工業大学
「放送大学
「対送大学
「対域阜聖徳学園大学

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) 2022年 5月 13日

発表概要

- > 背景
- > 従来研究と問題点
- > 本研究の目的
- » 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム
- > 力調整制御
- > 実験方法
- > 実験結果
- > 結論と今後の課題

背景(1/2)

カ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

● 触覚インタフェース装置を動かして遠隔のロボットを操作し、力覚センサから得られる力情報を触覚インタフェース装置に出力



● 物体の形状、柔らかさ、表面の滑らかさ、重さを感じることが可能 __

高効率な遠隔操作が期待

背景(2/2)

インターネットなどを介して、力や位置に関する情報を転送



ネットワーク遅延やその揺らぎ, パケット欠落など

- 作業効率が大きく劣化
- 物体に大きな力が加わり 破損、変形



力を抑える制御が必要



従来研究と問題点

*1 S. Ishikawa *et al.*, IJCNS, Mar. 2021.

従来研究

- 二台のロボットアーム間に把持された角材を持ち運ぶ作業
- 力情報を用いたロボット位置制御を提案し、その効果を調査*1



制御ありの場合、角材に加わる力が制御なしの場合に比べ、 抑制 → 制御が有効

問題点

▶ 必ずしも物体を把持できるとは限らない



本研究

物体の両側から 二台のロボットアームで挟んで運ぶ



加わる力

物体

大きすぎる → 変形・破損

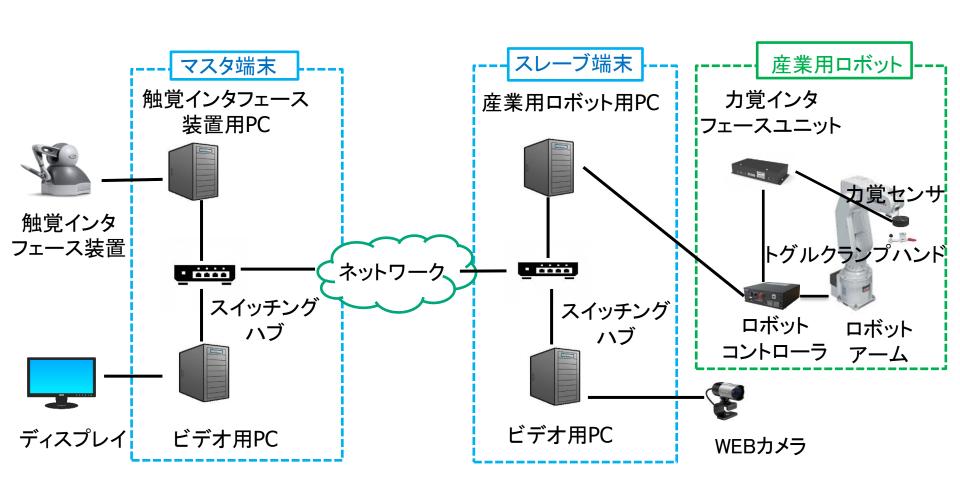
小さすぎる → 落下



力を適度に調節するために

力情報を用いて新たに力調整制御を 考案し、有効性を調査

システム構成



実験では、二つのシステムを使用



S. Ishikawa *et al.*, IJCNS, Mar. 2021.

ロボットアームの位置

$$\mathbf{P}_{t}^{(s)} = K_{\text{scale}}^{(P)} \mathbf{P}_{t-1}^{(m)} + \mathbf{V}_{t-1}^{(s)}$$
 (1)

 $P_t^{(s)}$: 時刻t(>0)におけるロボットアームの位置ベクトル

 $P_t^{(m)}$: 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 $V_t^{(s)}$: 時刻t(>0)おけるロボットアームの速度ベクトル

 $(|\boldsymbol{V}_{t}^{(s)}| \leq V_{\max})$

 V_{max} : ロボットアームの最大移動速度(5mm/ms *1)

 $K_{\text{scale}}^{(p)}$:作業空間の大きさをマッピングする係数(=1.5)



反力の計算方法

マスタ端末で出力される反力

$$\boldsymbol{F}_{t}^{(\mathrm{m})} = K_{\mathrm{scale}}^{(\mathrm{F})} \boldsymbol{F}_{t-1}^{(\mathrm{s})} \tag{2}$$

 $F_t^{(m)}$:時刻t(>0)にマスタ端末で出力される反力

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

 $K_{\text{scale}}^{(F)}$: 力の大きさをマッピングする係数(=0.33 *1)

力調整制御(1/2)

力調整制御は、力覚情報を用いて物体に加わる力を調整 するためにロボット位置を調整する制御

$$\widehat{\boldsymbol{P}_t^{(\mathrm{S})}} = \boldsymbol{P}_t^{(\mathrm{S})} + \boldsymbol{P} \tag{3}$$

 $P_t^{(s)}$: ロボットアームの位置(制御後) $P_t^{(s)}$: ロボットアームの位置(制御前) 式(1)

▶: 物体に加わる力を調整する位置調整ベクトル

力調整制御(2/2)

▶ 閾値を2つ設定し、ロボットが加える力により、位置調整ベクトルPの値を変化

各軸に対して

力がある閾値F_{th1}より大きい場合

P→物体に加わる力を減少する方向に値を設定

力がある閾値*F*_{th2}より小さい場合

P→物体に加わる力を増加する方向に値を設定

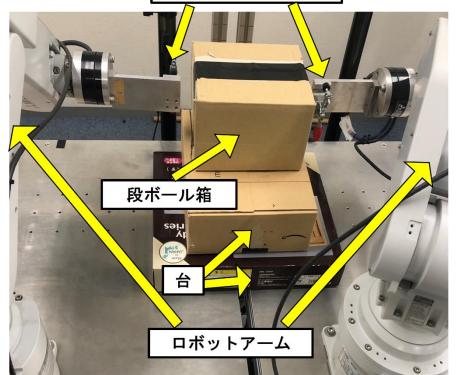
その他

 $P \rightarrow 0$ (位置調整なし)

実験方法(1/3)

- → 一人の実験者が二つのロボットアームを操作し、段ボール箱を両側から挟んで、一緒に運ぶ作業
- ▶ 段ボール箱 (高さ13.3cm × 幅 20.0cm × 長さ 17.3cm, 重さ111.1g)

トグルクランプハンド



実験手順

- 1. 段ボール箱を両側から挟む (約2秒)
- 2. 約30mm 持ち上げる(約3秒)
- 3. 約30mm 手前に移動(約3秒)
- 4. 約30mm 降ろす(約3秒)



実験方法(2/3)



デモビデオ(制御なしの場合)

実験方法(3/3)

- > 予備実験により、左右方向(x軸)に対して、 力調整制御のパラメータを $P_x = \pm 0.01$ mm、 $F_{th1} = 3$ N、 $F_{th2} = 2$ Nと設定
- ▶ ネットワーク遅延やパケット欠落は発生なし
- ▶ 力調整制御が二つの力の閾値に対して正しく働いている か確かめるため段ボール箱をある程度強く挟む場合と、 軽く挟む場合の2通り行う

予備実験(1/4)

力の閾値 F_{th1} , F_{th2} と位置調整値 P_x を決定する

力の閾値を決める予備実験

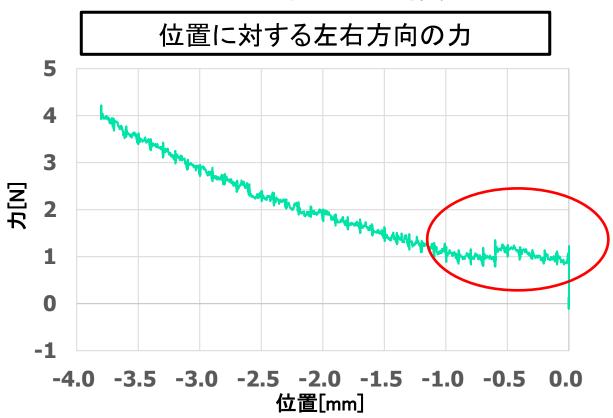
- ▶ 二つのロボットアームで段ボール箱を挟んだ後,一つのロボットアームの位置を固定し,他方のロボットアームを力が小さくなる方向に段ボール箱が落ちるまで少しずつ移動
- ▶ 力を測定し、押し込む距離と力の関係を明らかにする

位置調整値P、を決める予備実験

- 二つの力の閾値として力の閾値を決める予備実験で得た 閾値を用い、まず力調整制御を片側のロボットアームのみ に適用
- ▶ P_xの値を変化させ,力を測定

予備実験(2/4)

力の閾値を決める予備実験



力が1N程度になると、段ボール箱が滑り始める



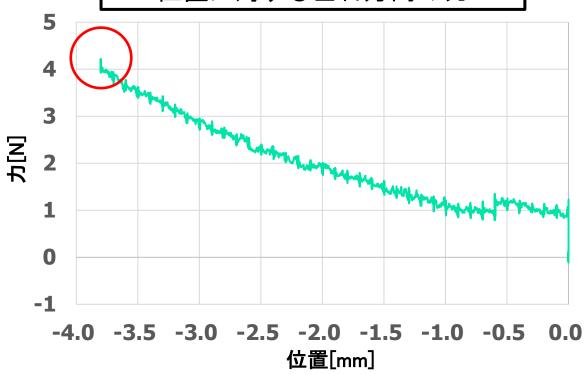
 F_{th2} の値は、1Nより大きくすることが必要 \square $F_{th2} = 2N$



予備実験(2/4)

力の閾値を決める予備実験

位置に対する左右方向の力



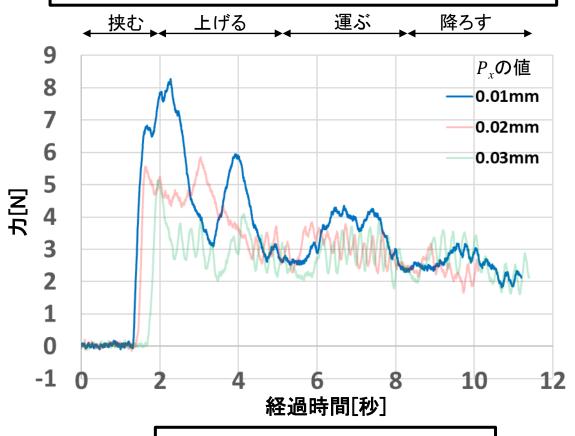
-3.8mmのとき, 約4Nの力が段ボール箱に加わり, 大きく変形する



予備実験(3/4)

位置調整値Pxを決める予備実験

片側のみ制御ありの左右方向の力



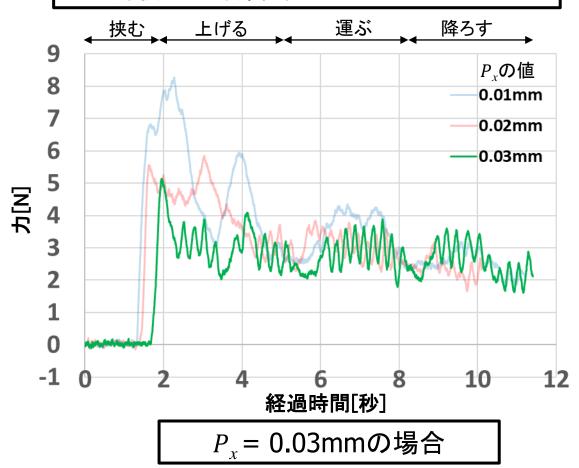
 P_x = 0.01mmの場合

大きな力が加わり、力が小さくなるのに時間がかかる

予備実験(3/4)

位置調整値Pxを決める予備実験

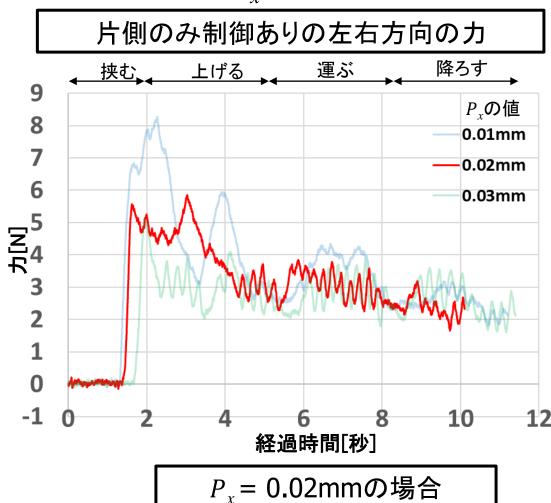
片側のみ制御ありの左右方向の力



力が小刻みに振動し、実験者にも感じられた

予備実験(3/4)

位置調整値Pxを決める予備実験



力が抑えられ、振動は実験者には感じられなかった 🗘 最適



予備実験(4/4)

- ightharpoonup 両側のロボットアームに $P_{\chi} = \pm 0.02$ mmとし、力調整制御を 適用して実験を行った
 - \rightarrow 片側に制御を適用した場合の $P_x = 0.03$ mmと同じような 振動現象が発生

力の閾値に対して、二つのロボットアームが同時に 反対方向に移動するため

- \triangleright 距離を半分にして $P_x = \pm 0.01$ mmとした
 - \rightarrow 片側に制御を適用した場合の $P_x = 0.02$ mmと同様の効果

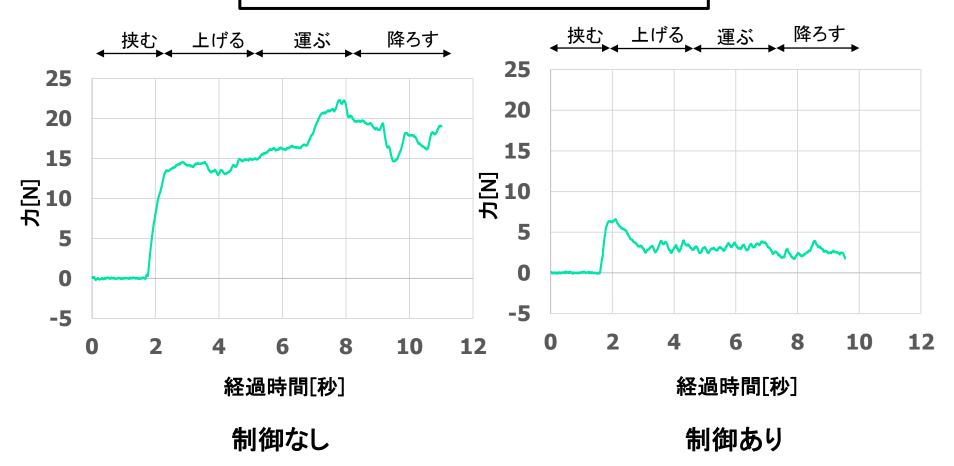


両側に制御を適用する場合は $P_x = \pm 0.01$ mmが最適

実験結果(1/5)

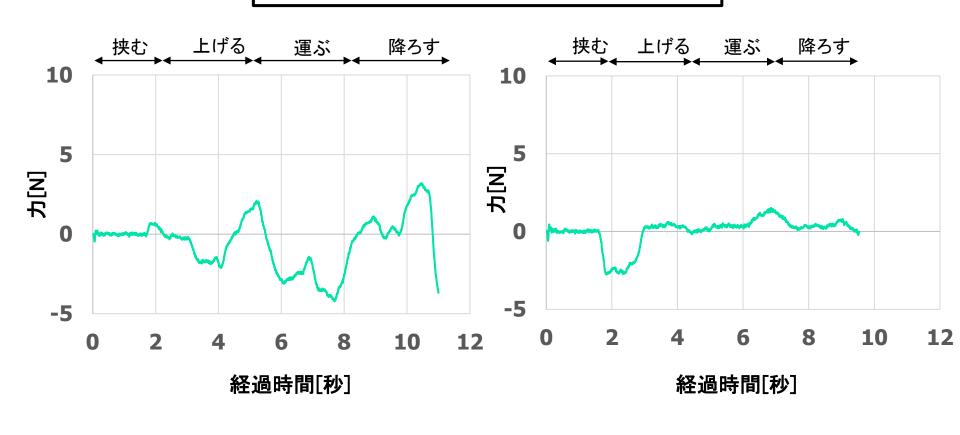
力調整制御の有効性を確かめる実験

強く挟んだ場合(左右方向[x軸])



実験結果(2/5)

強く挟んだ場合(上下方向[y軸])

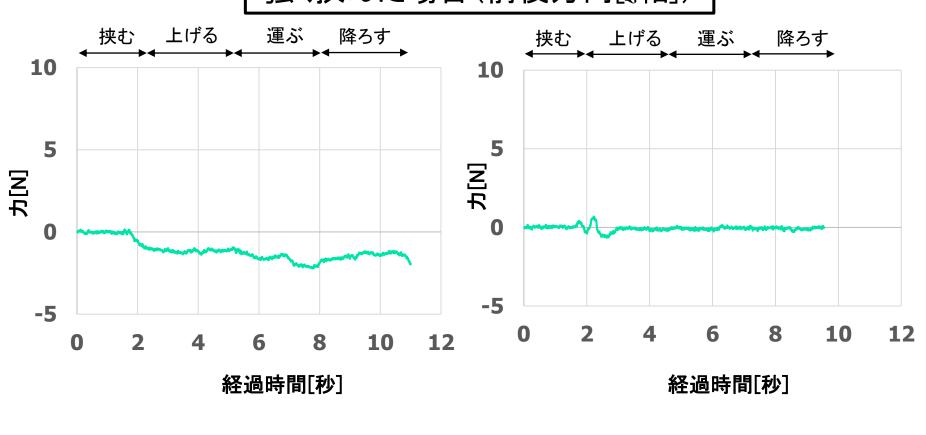


制御なし

制御あり

実験結果(3/5)

強く挟んだ場合(前後方向[z軸])



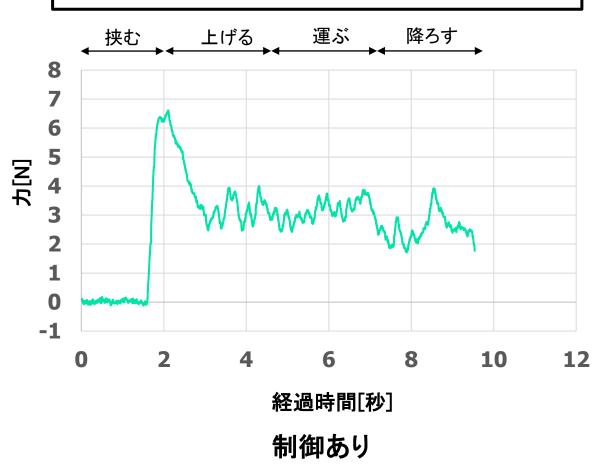
制御なし

制御あり

実験結果(4/5)

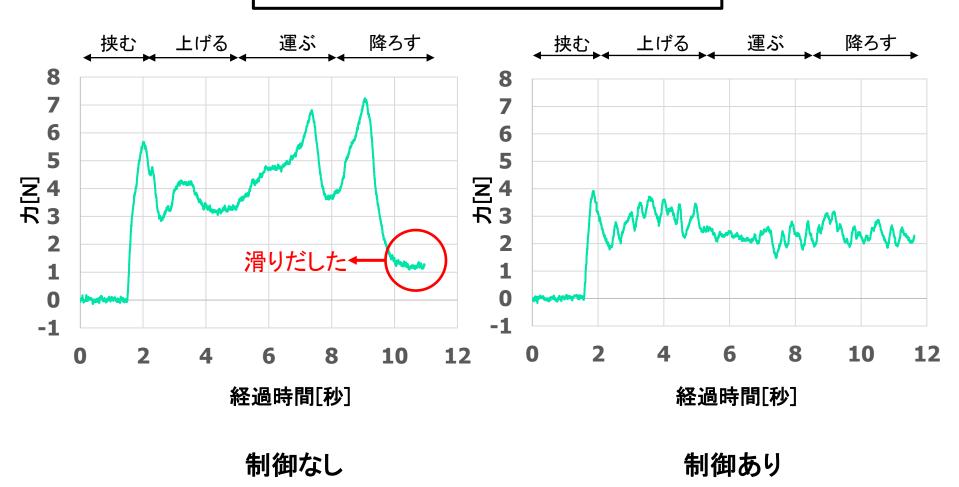
制御が上手く適用できているかを確かめる

強く挟んだ場合(左右方向[x軸]拡大)



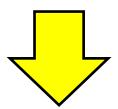
実験結果(5/5)

弱く挟んだ場合(左右方向[x軸])



結論

- ▶ 一つの物体を二つのロボットアームで両側から挟んで運ぶ 協調作業を対象
- ▶ 物体に大きな力が加わらなくするとともに、力が小さすぎて 物体を落とさないようにする力調整制御を提案
- 実験により、力調整制御を用いることで、物体に加わる力を 適度な大きさに調節することが可能



力調整制御が有効であることが判明

今後の課題

- ▶ ネットワーク遅延の影響を調査
- ▶ 運ぶ物体の大きさ、重さ、形状などを変えて実験
- ▶ 機械学習などを適用して、最適な閾値や位置調整値を求める