

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 力情報を用いたロボット位置制御

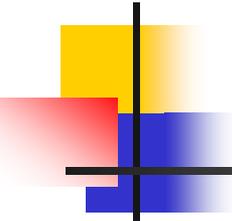
石川 哲[†], 石橋 豊[†], 黄 平国^{††}, 立岩 佑一郎[†]

[†]名古屋工業大学

^{††}星城大学

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 7月 18日 新潟大学



発表概要

- 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
- 一緒に物体を運ぶ作業
- 力情報を用いたロボット位置制御
- 実験方法
- 実験結果
- 結論
- 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に関する研究が注目

力覚フィードバックによって、物体の形状、柔らかさ、表面の滑らかさ、重さを感じることで、作業の高効率化や高精度化が期待

システムを複数用いるので、多様な協調作業が可能

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

- ユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) が劣化
- 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

従来研究と問題点

*1 E. Taguchi et al., Prof. ICFCC, Feb. 2019.

*2 黄 他, 信学技報, CQ2017-79, Nov. 2017.

*3 Y. Ishibashi et al., Proc. ICCAR, Apr. 2019.

従来研究

- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムを二つ用いて、一つの物体を一緒に運ぶ協調作業を扱い、三つの安定化制御を比較*1



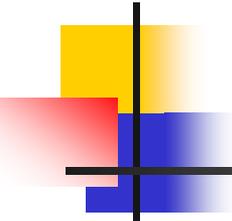
フィルタによる安定化制御*2が最も有効

- 上記の結果を利用して、物体に大きな力が加わらないようにロボット位置を調整する、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*3



制御を行うことで、物体に加わる力を軽減

最適な位置調整値は物体の長さに依存し、用いられた値は最適ではない可能性あり



目的

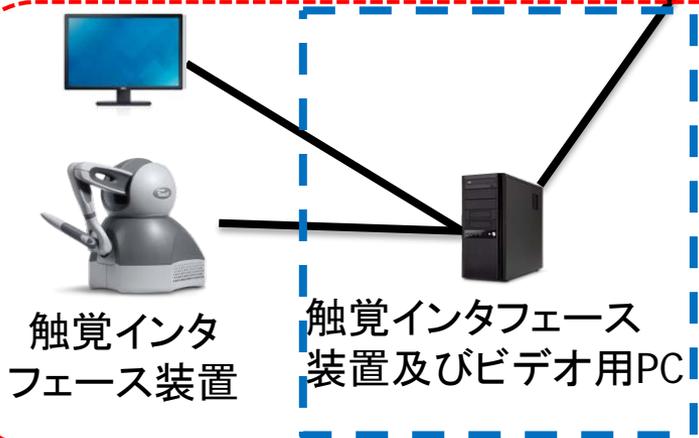
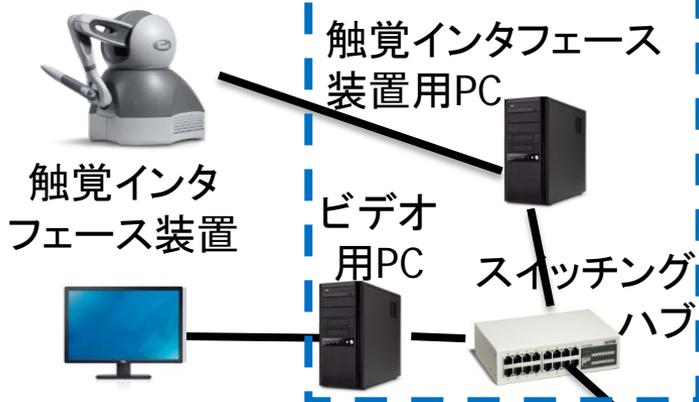
本研究

- 二つのシステムを用いて一緒に物体を運ぶ作業を対象とし、物体の長さに対して、ロボット位置の最適な調整値を調査
- ネットワーク遅延が物体に加えられる力に及ぼす影響を調査

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

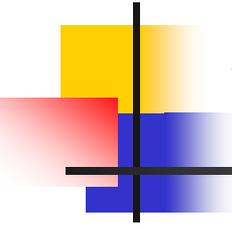
マスタ端末 システム1 スレーブ端末

産業用ロボット



マスタ端末 システム2 スレーブ端末

産業用ロボットアーム



位置の計算方法

ロボットアームの位置

$$S_t = \begin{cases} M_{t-1} + V_{t-1} & (\text{if } |V_{t-1}| \leq V_{\max}) \\ M_{t-1} + V_{\max} \frac{V_{t-1}}{|V_{t-1}|} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

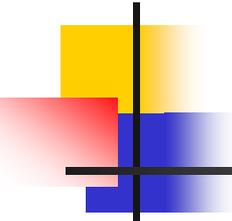
S_t : 時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル

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

V_t : 時刻 $t(> 0)$ に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移動速度(5mm/ms)

触覚インタフェース装置とロボットアームの移動距離の比率は2:1



反力の計算方法

マスタ端末で出力される反力

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

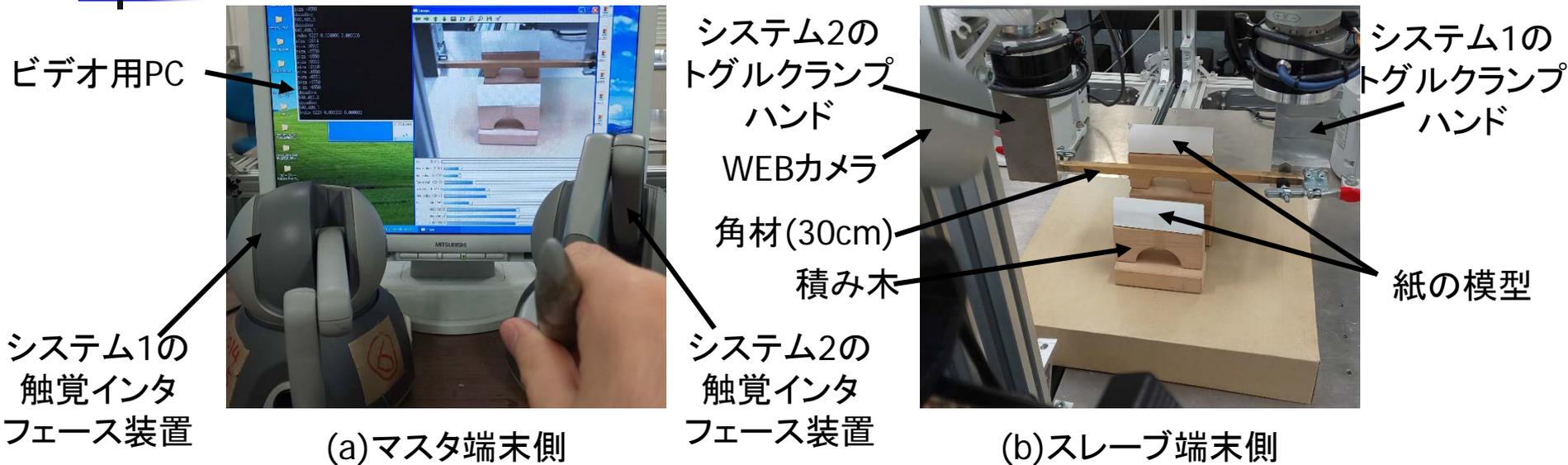
$\mathbf{F}_t^{(m)}$: 時刻 $t(> 0)$ にマスタ端末で出力される反力

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

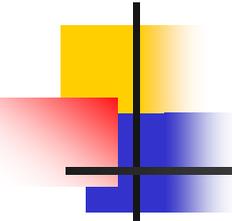
力覚センサの値に, マスタ端末で一定の倍率($K_{\text{scale}} > 0$)をかけて触覚インタフェース装置によって反力を提示

$$K_{\text{scale}} = 0.33$$

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の触覚インタフェース装置を操作したりすることで、角材を一緒に運ぶ作業
- 安定な操作を確保するために、ロボットアームは左右方向(y軸)には動かないようにし、フィルタによる安定化制御*2を適用



力情報を用いたロボット位置制御

力情報を用いたロボット位置制御では、時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル \widehat{S}_t を、 S_t に P を加えた値とする

$$\widehat{S}_t = S_t + P$$

この \widehat{S}_t を用いることで角材に大きな力が加わった場合に、その力を軽減するようにロボットを移動

角材の長さとは位置調整値との関係式の導出(1/2)

二つのロボットアームで長さが30cmの角材を把持した場合、前後方向(x 軸)と上下方向(z 軸)における、位置ベクトルの差 $P = (P_x, P_z)$ と角材に加わる力 $F = (F_x, F_z)$ で回帰分析

$$P_x = 2.79 \times 10^{-1} F_x \quad (\text{寄与率} : 0.995)$$

$$P_z = 3.49 \times 10^{-1} F_z \quad (\text{寄与率} : 0.991)$$

長さが45cmの角材の場合

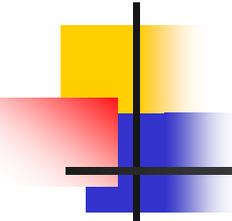
$$P_x = 1.03 F_x \quad (\text{寄与率} : 0.996)$$

$$P_z = 1.25 F_z \quad (\text{寄与率} : 0.971)$$

長さが60cmの角材の場合

$$P_x = 1.73 F_x \quad (\text{寄与率} : 0.995)$$

$$P_z = 2.39 F_z \quad (\text{寄与率} : 0.990)$$



角材の長さや位置調整値との関係式の導出(2/2)

x 軸におけるロボット位置ベクトルと力ベクトルの関係式を $P_x = a_x F_x$ とし、係数 a と角材の長さ L で回帰分析 (z 軸も同様)

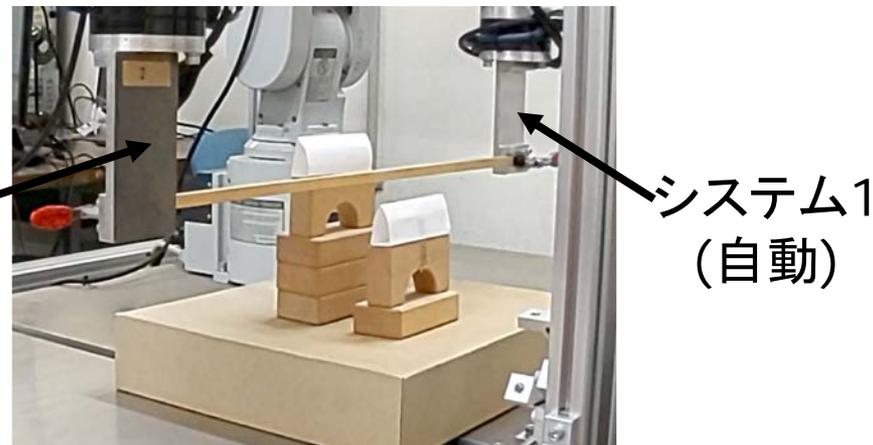
$$a_x = 4.82 \times 10^{-2} L - 1.16 \quad (\text{寄与率 : } 0.999)$$

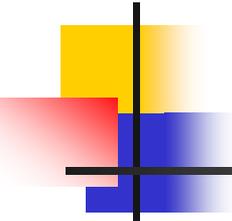
$$a_z = 6.82 \times 10^{-2} L - 1.73 \quad (\text{寄与率 : } 0.996)$$

- この $A = (a_x, a_z)$ を使用することで、 P_x, P_z の定量的な関係を変えることなく、長さ L [cm] の角材を用いる場合に対するロボット位置の差と力の関係を導出
- 従来研究の問題点であった、角材の長さが30cmの場合に $L = 30$ が最適値ではない可能性を調査可能

実験方法(1/3)

- システム1のロボットアームは自動で操作し, システム2のロボットアームは手動で操作
- 自動で操作されるロボットアームは, 作業開始から5秒で前方の模型まで, 15秒で後方の模型まで, 一定の速さで動く
- 手動で操作されるロボットアームはWEBカメラのビデオを見ながら, 自動で動くロボットを追従するように動かす





実験方法(2/3)

- 力情報を用いたロボット位置制御は手動で操作されるシステムのみ適用
- 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, 400ms
- 使用した角材(W×H×L) : 1cm×1cm×30cm,
1cm×1cm×45cm,
1cm×1cm×60cm

実験方法(3/3)

- 安定にロボットアームを操作可能な L の値を調査

角材の長さ	不安定になる L の値
30cm	$L = 60$
45cm	$L = 100$
60cm	$L = 160$

角材の長さが60cm, $L = 160$ の場合

手で操作される
ロボット動作が
不安定化

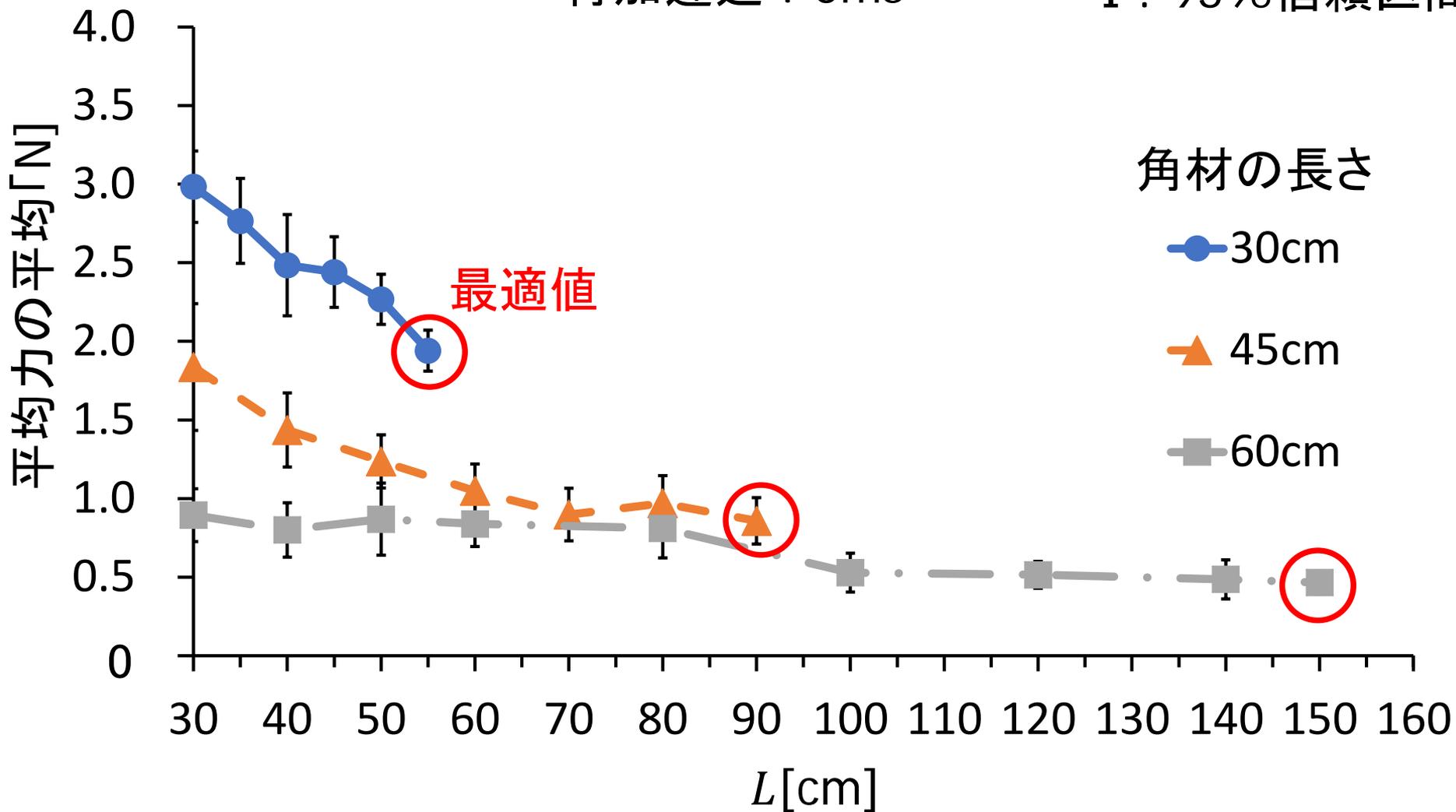


- $L = 30$ からロボット動作が不安定にならない L の値の範囲において, 一定間隔で変化
- 各角材の長さに対し, 付加遅延, L の値をランダムな順序で変え, 10回ずつ作業をし, 角材に加わった力の平均と最大を測定

実験結果(平均力の平均(1/2))

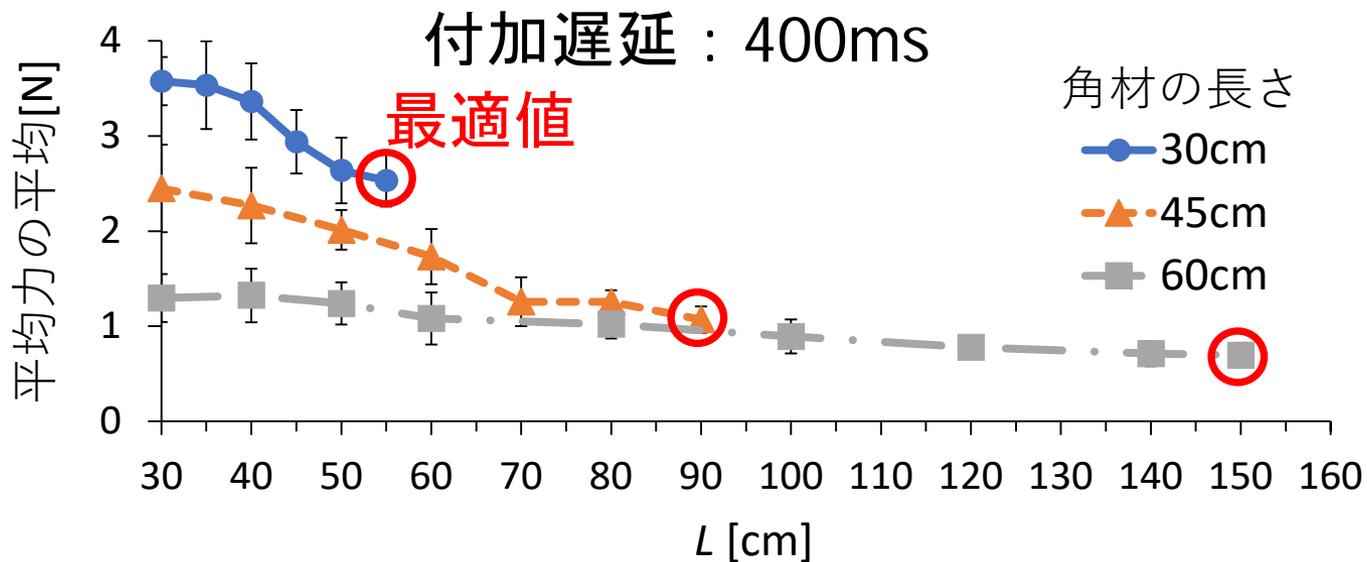
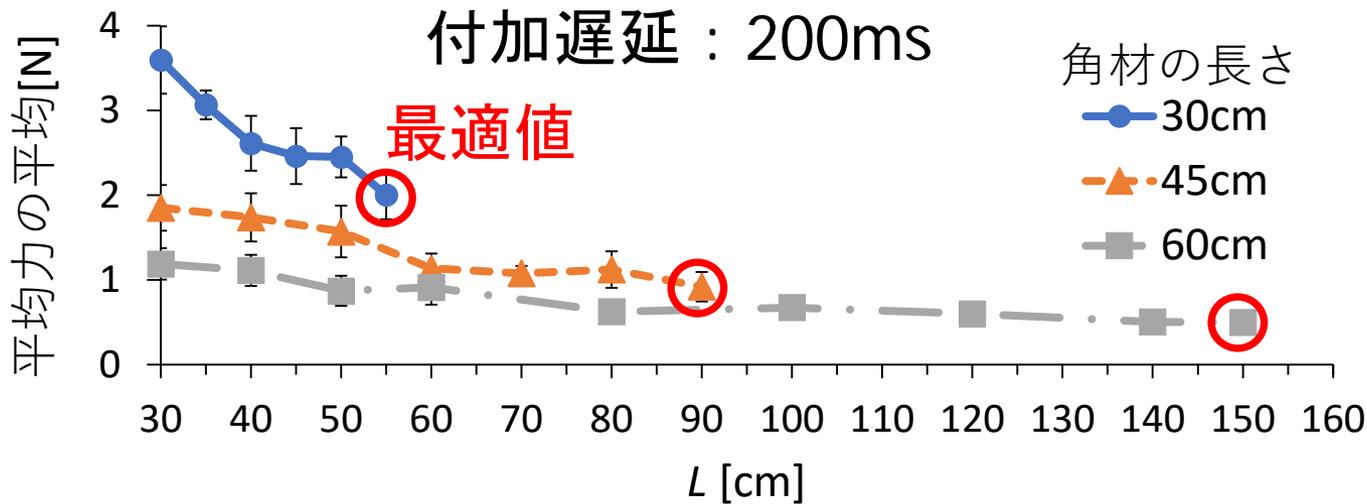
付加遅延 : 0ms

I : 95%信頼区間



実験結果(平均力の平均(2/2))

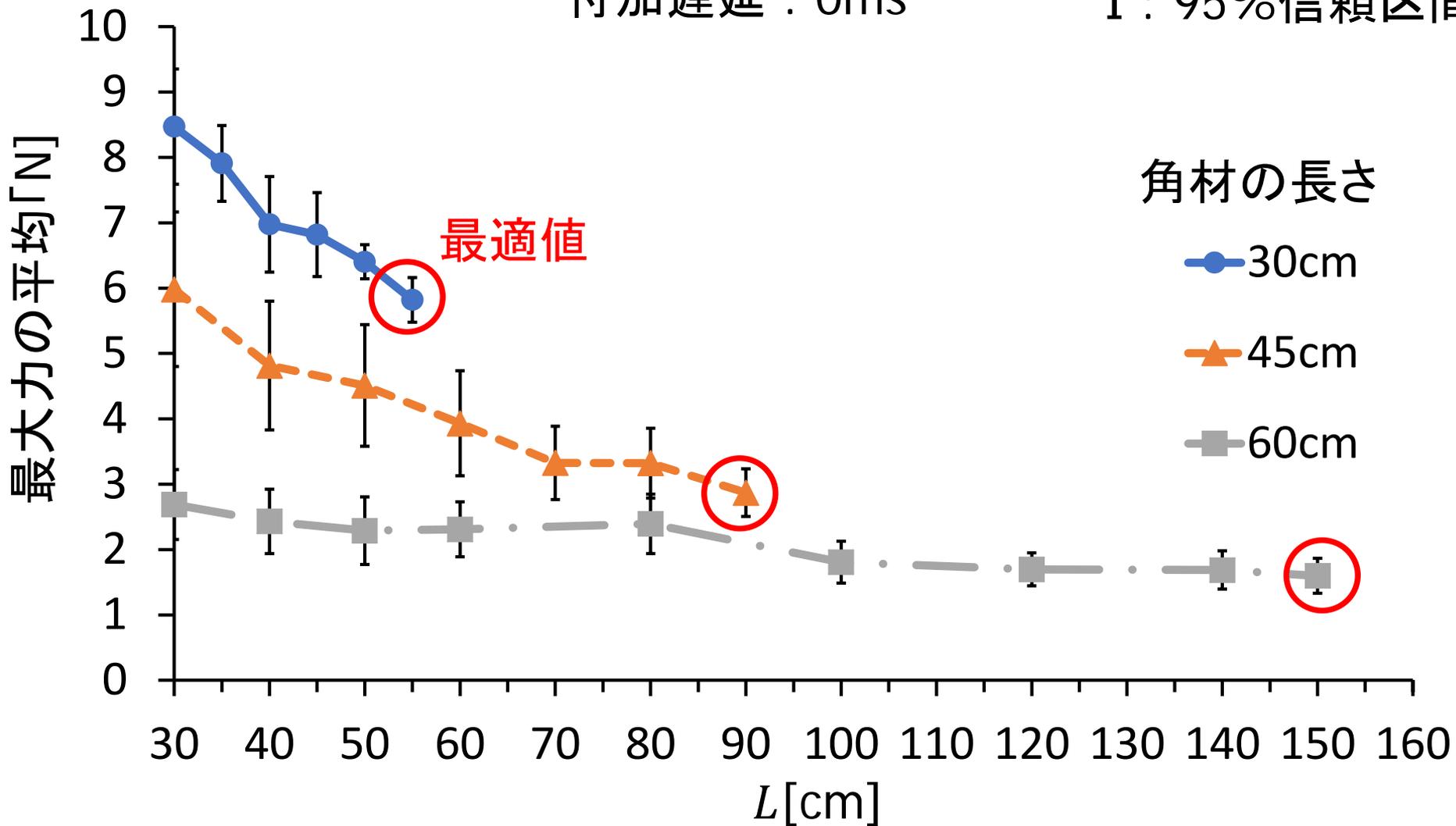
I : 95%信頼区間



実験結果(最大力の平均)

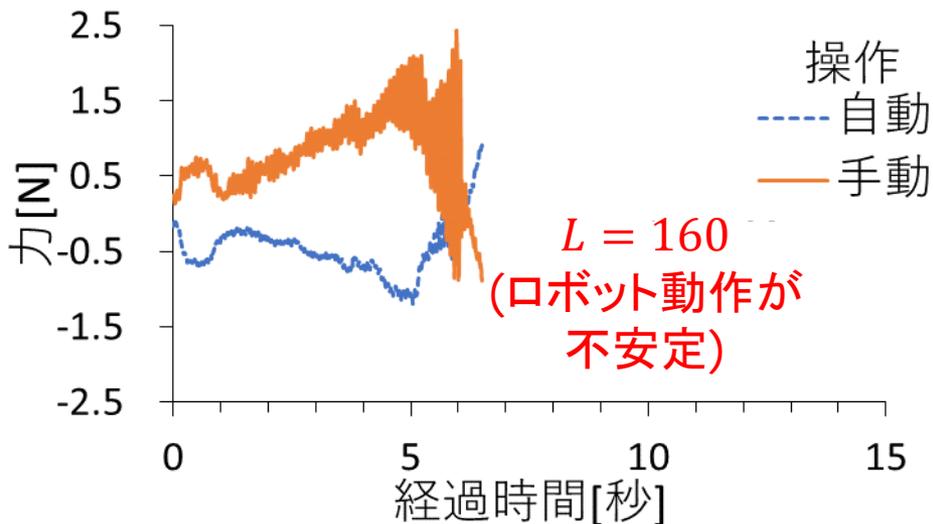
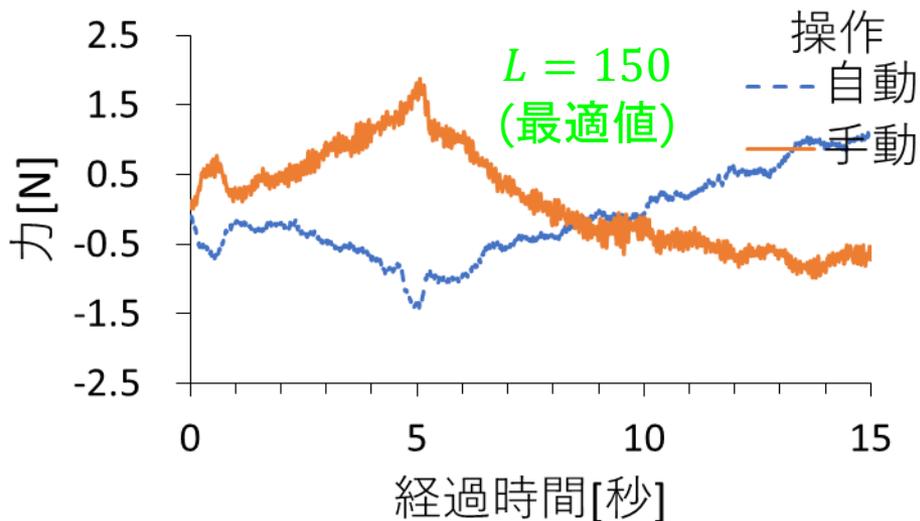
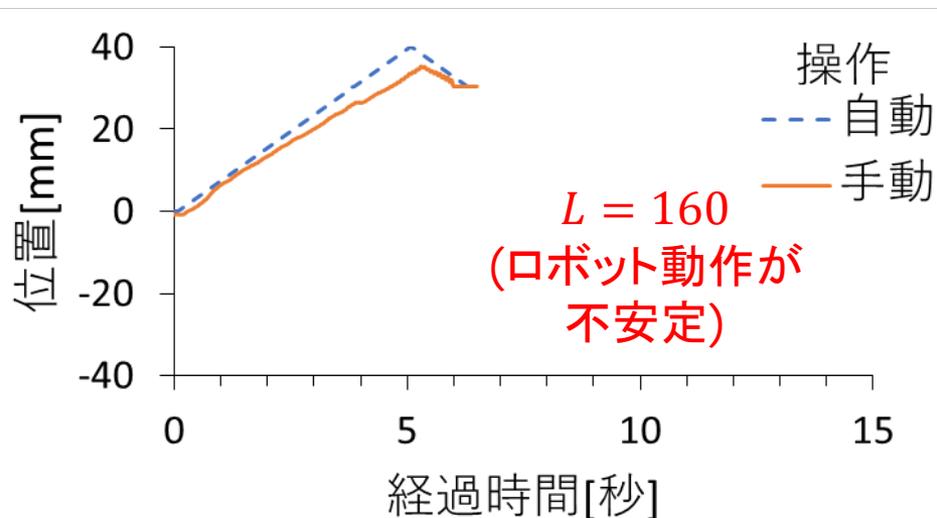
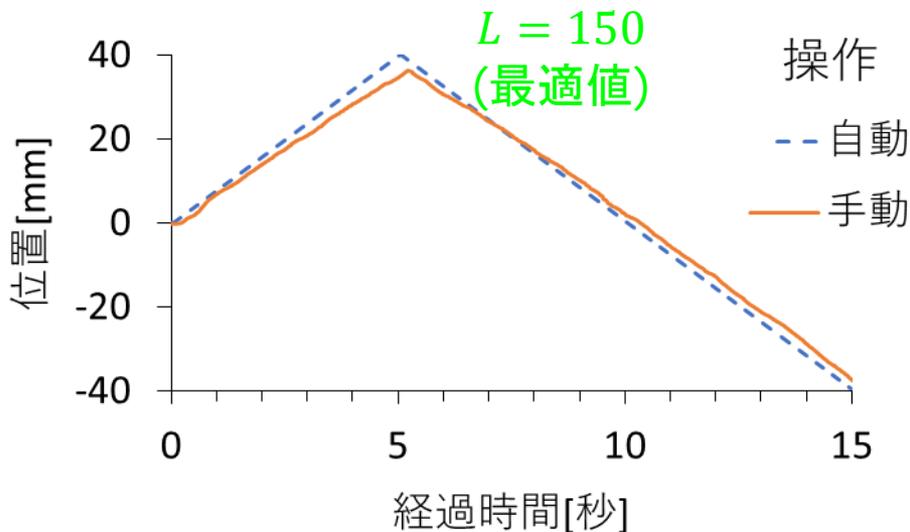
付加遅延 : 0ms

I : 95%信頼区間



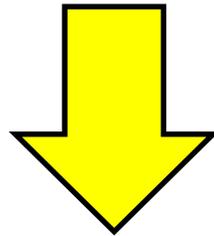
実験結果(経過時間に対する位置と力)

角材の長さ : 60cm, 付加遅延 : 0ms

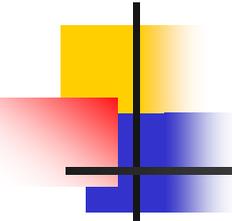


結論

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において、一つの物体を一緒に運ぶ作業を行い、力情報を用いたロボット位置制御の最適な位置調整値を調査



- 位置調整値をある程度まで大きくすると、物体に加わる力が軽減
- 調整値をさらに大きくするとロボット動作が不安定になり、最適値はその直前の値
- 最適な調整値は物体の長さには依存するが、ネットワーク遅延にはほとんど依存しない



今後の課題

- 角材を動かす速さや, 作業に用いる物体の材質を変える
- 二つのシステムを両手で操作する場合の最適値を調査
- 二人の利用者で作業をする場合の最適値を調査