



# 力覚を用いた遠隔制御システムにおける 粘弾性の適応制御

阿部 拓哉<sup>†</sup>, 小松 佑輔<sup>†</sup>, 大西 仁<sup>‡</sup>, 石橋 豊<sup>†</sup>

<sup>†</sup>名古屋工業大学大学院工学研究科

<sup>‡</sup>放送大学教養学部

電子情報通信学会総合大会

2018年 3月 21日 東京電機大学

# 背景

力覚

弾性はばねやゴム  
伸ばしたときに知覚

粘性は水中や油の中で物を移動させた  
ときに知覚

用いる研究が注目

触覚インタフェース装置を用いることで、反力(弾性と粘性から成る)を感じられるので、より効率的な作業が可能

QoS(Quality of Service)  
保証のないネットワークを  
介してメディアを伝送

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)

の劣化



QoS制御

# 従来研究

\*1 松永他, 信学技報, CQ2013-90, Mar. 2014.

\*2 小松他, 信学ソ大, B-11-16, Sep. 2017.

## 従来研究

力覚を用いた遠隔制御システムに対して,  
ネットワーク遅延に応じて動的に最適な弾性係数を選択する  
弾性の適応制御を適用<sup>\*1</sup>

⇒ QoE評価により有効性を確認

力覚を用いた遠隔制御システムに対して,  
粘性係数の最適値をネットワーク遅延に応じて動的に選  
択する粘性の適応制御を提案<sup>\*2</sup>

⇒ QoE評価により有効性を確認  
最適な粘性係数にある程度の幅があることも提示

これら二つの制御を組み合わせて用いれば,より高品質な制御を実現可  
能と予想 ⇒ しかし, 未検討



# 目的

本研究

## 粘弾性の適応制御を提案

- 弾性の適応制御から最適な弾性係数を決定し, このときの最適な粘性係数がどの程度の幅を持つかを調査
- 重回帰分析によりネットワーク遅延と操作速度から最適な粘性係数を求める式を導出

# 反力の計算方法

時刻 $t(>1)$ におけるマスタ端末側の  
触覚インタフェース装置から出力される反力 $F_t^{(m)}$ の計算方法

$$F_t^{(m)} = K_s (S_{t-1}^{(m)} - M_{t-1}^{(m)}) + K_d (\dot{S}_{t-1}^{(m)} - \dot{M}_{t-1}^{(m)})$$

$K_s$  : 弾性係数

$K_d$  : 粘性係数

$M_{t-1}^{(m)}, S_{t-1}^{(m)}$  : 時刻  $t$  におけるマスタ端末とスレーブ端末の  
触覚インタフェース装置のスタイラスの位置ベクトル

$\dot{M}_{t-1}^{(m)}, \dot{S}_{t-1}^{(m)}$  : 時刻  $t$  におけるマスタ端末とスレーブ端末の  
触覚インタフェース装置のスタイラスの速度

スレーブ端末側も同様に計算(ただし, 反力の方向は逆)

$$F_t^{(s)} = -K_s (S_{t-1}^{(s)} - M_{t-1}^{(s)}) - K_d (\dot{S}_{t-1}^{(s)} - \dot{M}_{t-1}^{(s)})$$

# 実験システム

\*1 小松他, 信学技報, CQ2016-35, July 2016.

スレーブ端末

マスタ端末

ネットワーク  
エミュレータ

遅延を付加

ビデオカメラ

触覚インタフェース装置  
(Geomagic Touch)

16cm の長さの線が引かれた紙



# 実験のデモ

スレーブ端末



マスタ端末



# 実験方法

\*1 松永他, 信学技報, CQ2013-90, Mar. 2014.

\*2 小松他, 信学技報, CQ2016-35, July 2016.

16cmの横線に沿って触覚インタフェース装置を左右に動かす作業<sup>\*2</sup>

➤ 16cm動かすのにかかる時間:

3.2cm/s(5秒), 5.3cm/s(3秒), 8.0cm/s(2秒)

➤ 作業時間: 30秒

➤ 弾性係数 $K_s$ : 弾性の適応制御から決定

$$K_s = 9/(90+2D)^{*1}$$

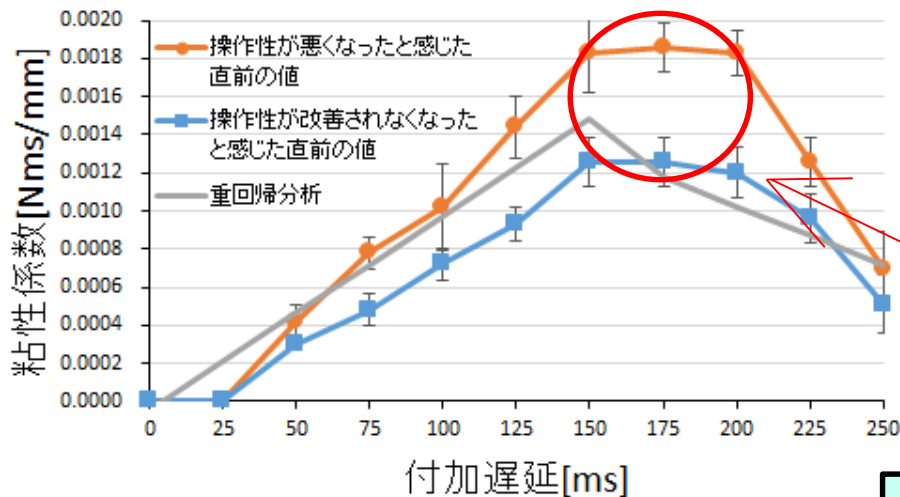
➤ 反力とスタイラスの振動を考慮した総合的な評価

$K_d$ の値を0.0000Nms/mmから少しずつ増加させていき,触覚インタフェース装置の操作性が改善されなくなったと感じた直前の値と悪くなったと感じた直前の値を $K_d$ の値を最適値とする

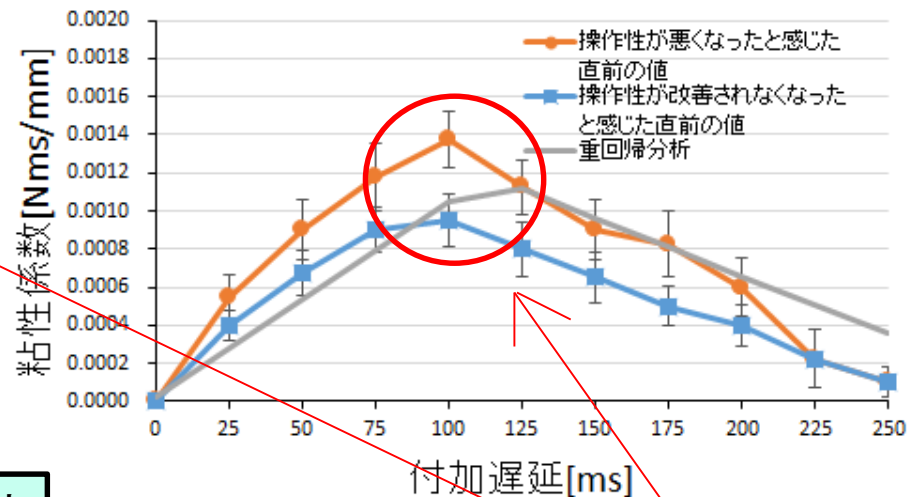


# 実験結果

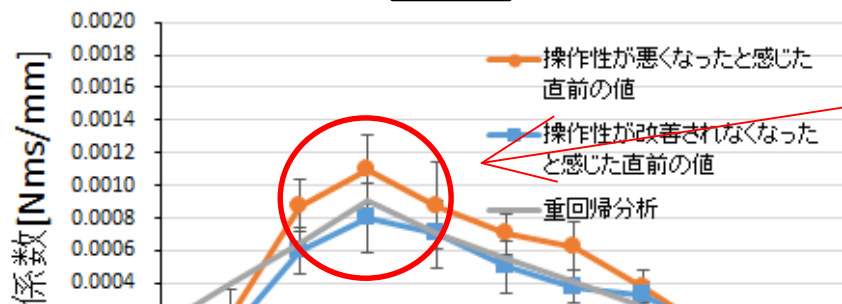
5秒



3秒



2秒



$D_{peak}$

傾きが異なるので、 $D_{peak}$ の前後で分けて回帰分析を行う

# 粘弾性の適応制御の式

$$D_{\text{peak}} = -20v + 228$$

$D_{\text{peak}}$  : 粘性係数が最大となる点  
 $v$  : 操作速度

寄与率 ( $R^2$ ) が 0.88 と高いため、  
高精度に推定可能

$$\hat{K}_d = \begin{cases} 1.02 \times 10^{-5}D + 4.26 \times 10^{-5}v - 2.03 \times 10^{-4} & (D \leq D_{\text{peak}}) \\ -6.13 \times 10^{-6}D - 2.12 \times 10^{-4}v + 2.99 \times 10^{-3} & (D > D_{\text{peak}}) \end{cases}$$

$$\hat{K}_s = 9 / (90 + 2D)$$

$\hat{K}_d$  : 粘性係数の最適値の推定値  
 $D$  : ネットワーク遅延  
 $v$  : 操作速度  
 $\hat{K}_s$  : 弾性係数の最適値の推定値

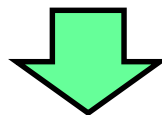
$\hat{K}_d$  は寄与率 ( $R^2$ ) が 0.91, 0.81 と  
高いため、高精度に推定可能



# 結論

## 粘弾性の適応制御の提案

- ・ネットワーク遅延の最適な粘性係数を調査
- ・ネットワーク遅延と操作速度から最適な粘性係数を求める式を重回帰分析により導出



- ネットワーク遅延が大きくなると、最適な粘性係数は始めは増加し、それ以降は徐々に減少
- 最適値はネットワーク遅延と操作速度から高精度に推定可能



# 今後の課題

---

- 粘弾性の適応制御の式の有効性の確認
- 触覚インタフェース装置を動かす速度が動的に変化する場合の影響を調査
- ネットワーク遅延が動的に変化する場合の影響の調査