



遠隔制御システムにおける 粘弾性の適応制御

小松 佑輔[†], 大西 仁^{††}, 石橋 豊[†]

[†]名古屋工業大学 大学院 工学研究科

^{††}放送大学 教養学部

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

2018年3月9日 沖縄産業支援センター



発表内容

- 背景
- 従来研究と目的
- 力覚メディア・ビデオを用いた遠隔制御システム
- 反力の計算方法
- 粘弾性の適応制御
- 評価方法
- 評価結果と考察
- 結論と今後の課題

背景

力覚：物体に接触する際の反力感覚

力覚メディアの研究・開発が盛んに行われ、
教育・医療・芸術などの様々な分野で利用

力覚メディアと他のメディアを併用することで、作業効率が向上

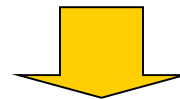


力覚メディア・ビデオを用いた遠隔制御システム

ビデオを見ながら触覚インタフェース装置を遠隔操作することが可能

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



QoS制御

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

従来研究

*1 K. Matsunaga *et al.*, Proc. ITC-CSCC, July 2012.

*2 小松 他, 信学技報, CQ2016-101, Jan. 2017.

従来研究

- 遠隔制御システムにおいて、ネットワーク遅延に応じて**弾性係数**の大きさを動的に変更する制御(**弾性の適応制御**)*1
- ネットワーク遅延と触覚インタフェース装置の操作速度に応じて**粘性係数**の大きさを動的に変更する制御(**粘性の適応制御**)*2

これらの二つの制御を組み合わせることで、より高品質な制御を実現できる可能性

そのような検討は、これまでに行われていない

弾性 : ばねを押したときやゴムを伸ばしたときに知覚

粘性 : 水中や油の中で移動させたときに知覚



目的

*1 K. Matsunaga *et al.*, Proc. ITC-CSCC, July 2012.

本研究

遠隔制御システムにおいて、粘弾性の適応制御を提案

- ネットワーク遅延や操作速度，
弾性係数に対して最適な粘性係数を調査
- 重回帰分析によって，最適な粘性係数の推定式を導出し，弾性
係数の推定式^{*1}と組み合わせた粘弾性の適応制御を提案
- QoE評価によって粘弾性の適応制御の効果を検査

力覚メディア・ビデオを用いた 遠隔制御システム

ビデオ



ビデオカメラ

マスタ端末

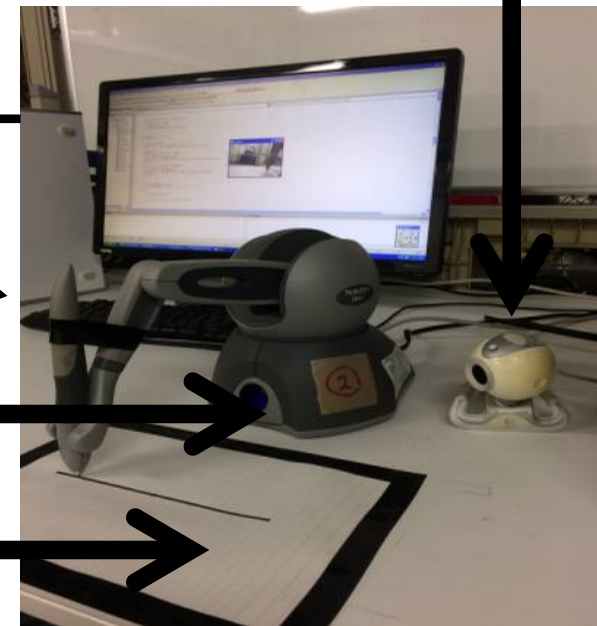
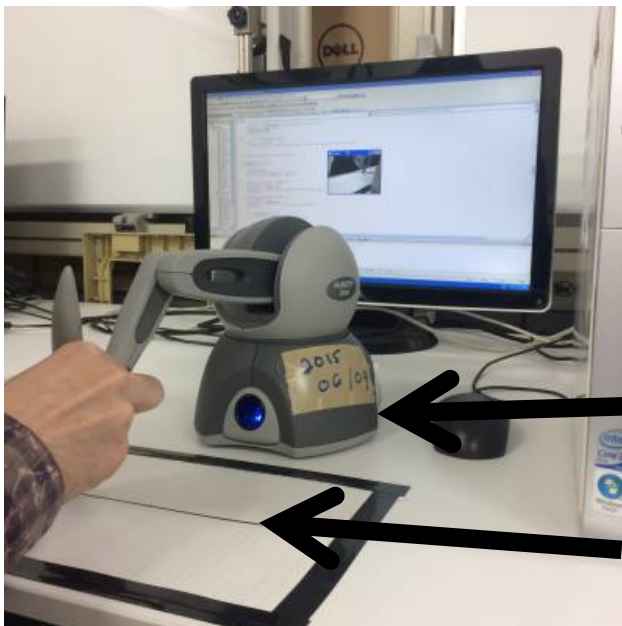
スレーブ端末

ネットワーク

テープで固定

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



遠隔操作の様子

ネットワーク遅延は無視できるほど小さく設定

マスタ端末



スレーブ端末

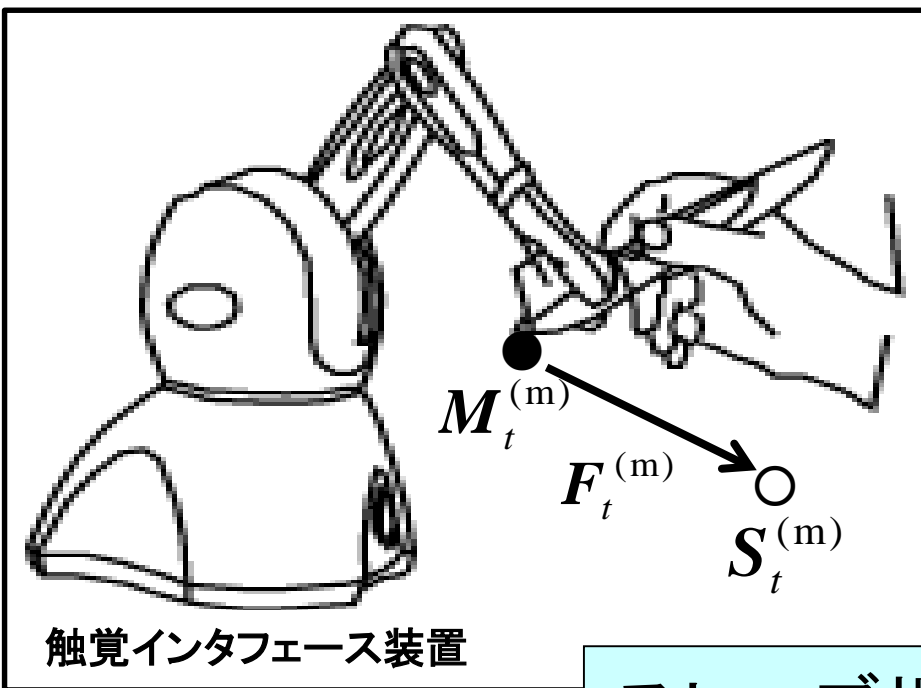


反力の計算方法

弾性による反力

粘性による反力

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



$F_t^{(m)}$: マスタ末端で出力される反力

$M_t^{(m)}$: マスタ末端のスタイラスの位置ベクトル

$S_t^{(m)}$: スレーブ末端から受信した位置ベクトル

$\dot{M}_t^{(m)}$: マスタ末端のスタイラスの速度ベクトル

$\dot{S}_t^{(m)}$: スレーブ末端から受信した速度ベクトル

K_s : 弾性係数 K_d : 粘性係数

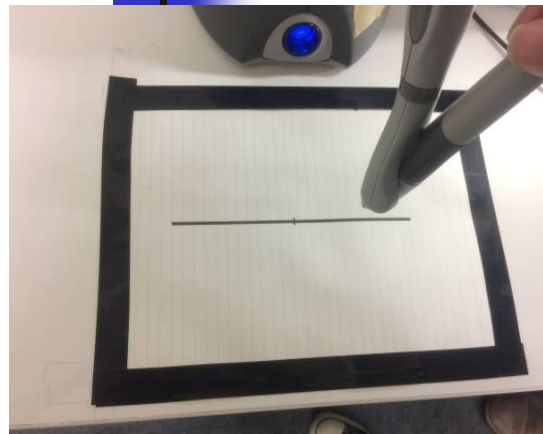
スレーブ末端

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

粘性係数の最適値の調査方法

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

▶ 16cm動かすのにかける時間	▶ 弾性係数の値
2秒(平均速度: 8.0cm/秒)	0.10[N/mm]
3秒(平均速度: 5.3cm/秒)	0.06[N/mm]
5秒(平均速度: 3.2cm/秒)	0.04[N/mm]



▶ 30秒間にわたって動かす

粘性による振動の
抑制を感じた値

▶ 各ネットワーク遅延に対して K_d の値を

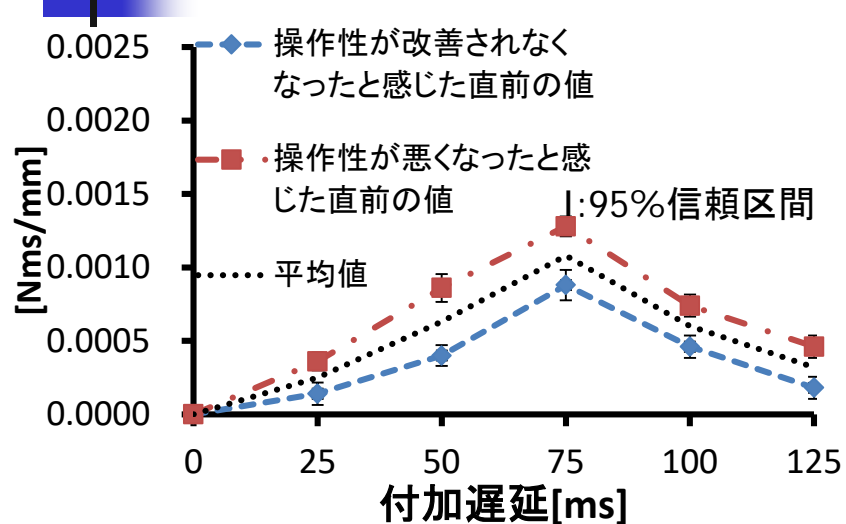
0.0000[N/mm] 過度な粘性による反力加
を感じた値

操作性が改善されなくなった直前の値 & 操作性が悪くなった直前の値

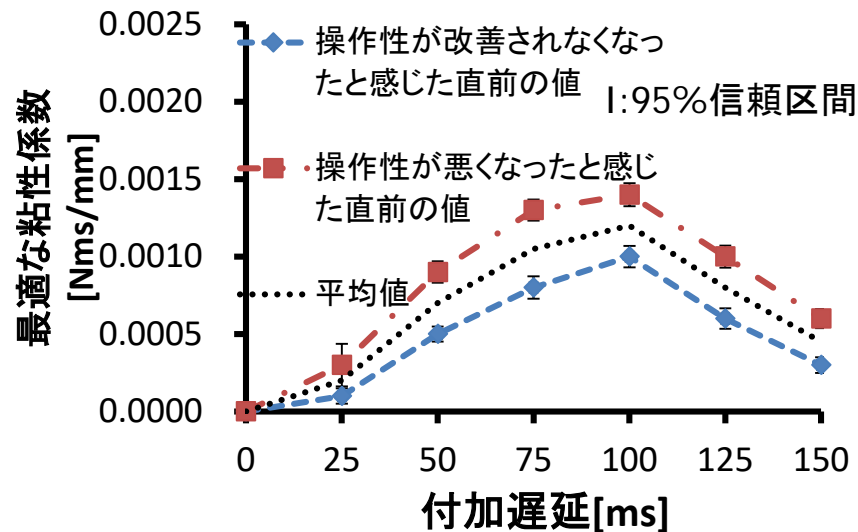
この2つの値の平均値を粘性係数の最適値

粘性係数の最適値(弾性係数: 0.10[N/mm])

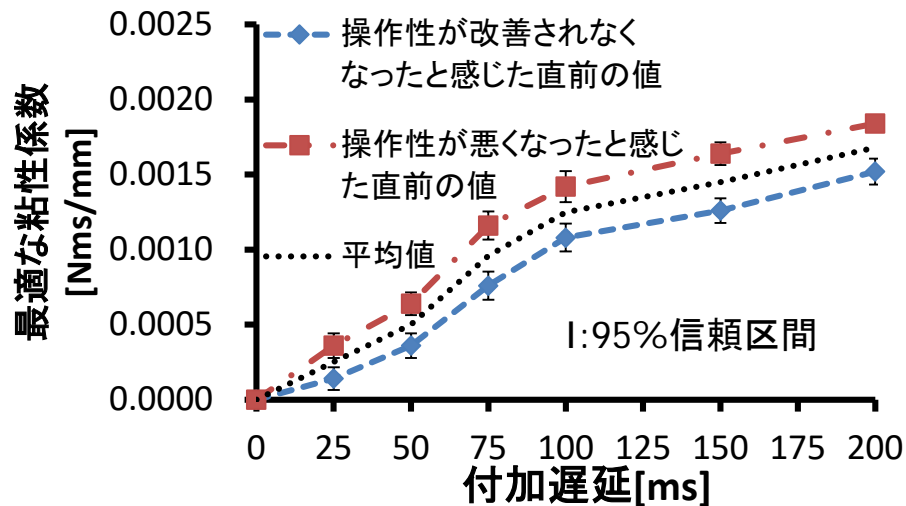
最適な粘性係数
[Nms/mm]



(a) 操作速度: 8.0cm/秒

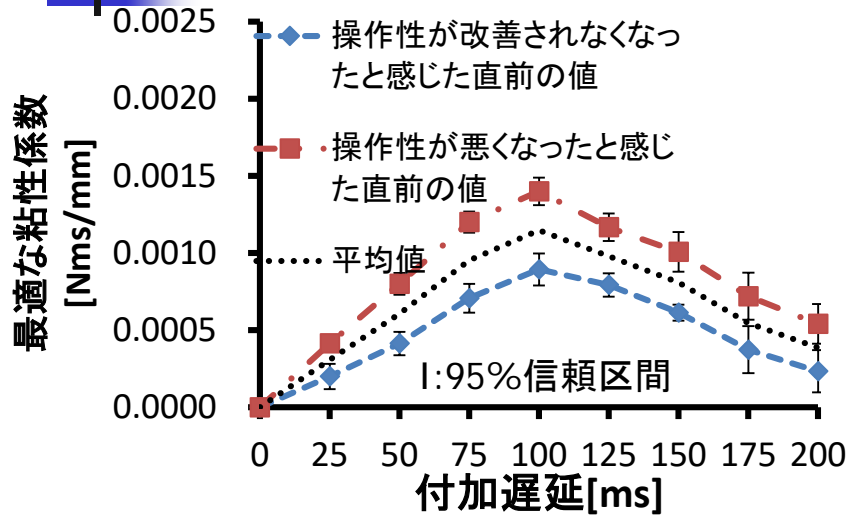


(b) 操作速度: 5.3cm/秒

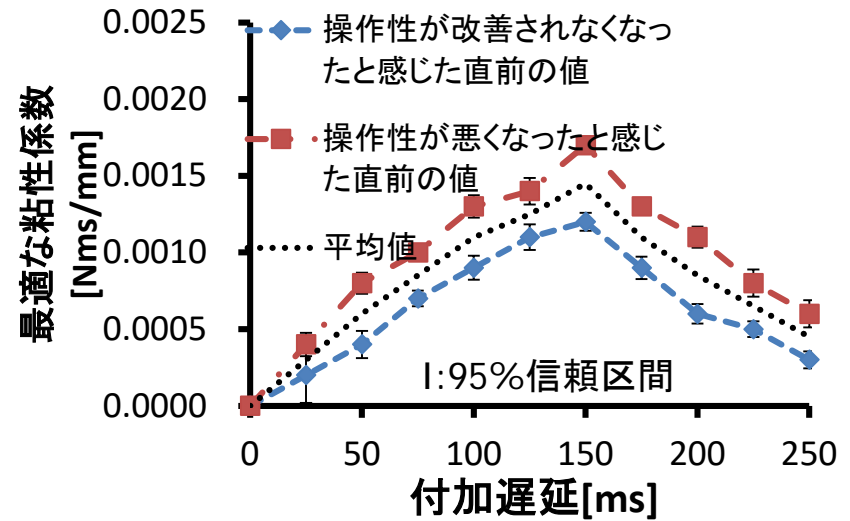


(c) 操作速度: 3.2cm/秒

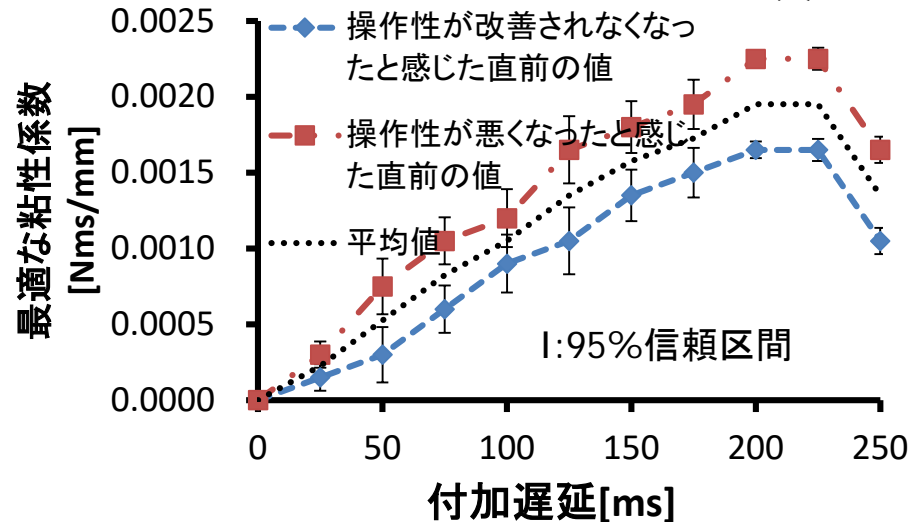
粘性係数の最適値(弾性係数: 0.06[N/mm])



(a) 操作速度: 8.0cm/秒

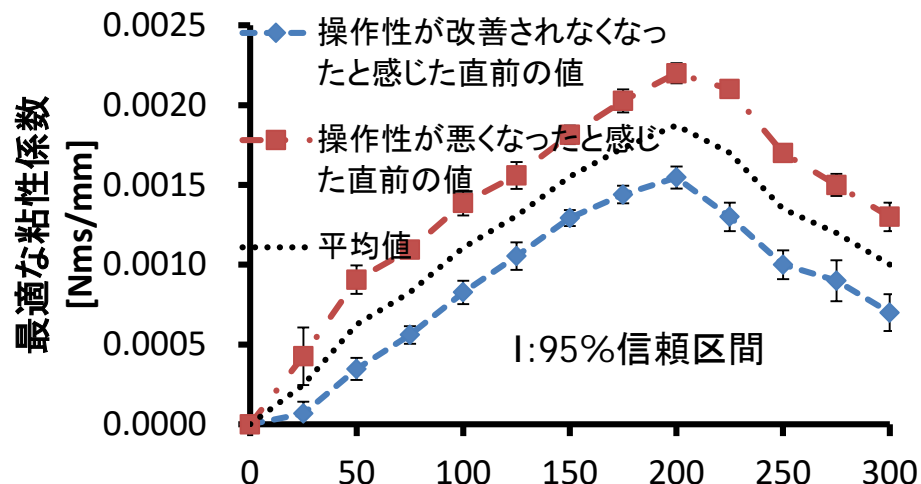
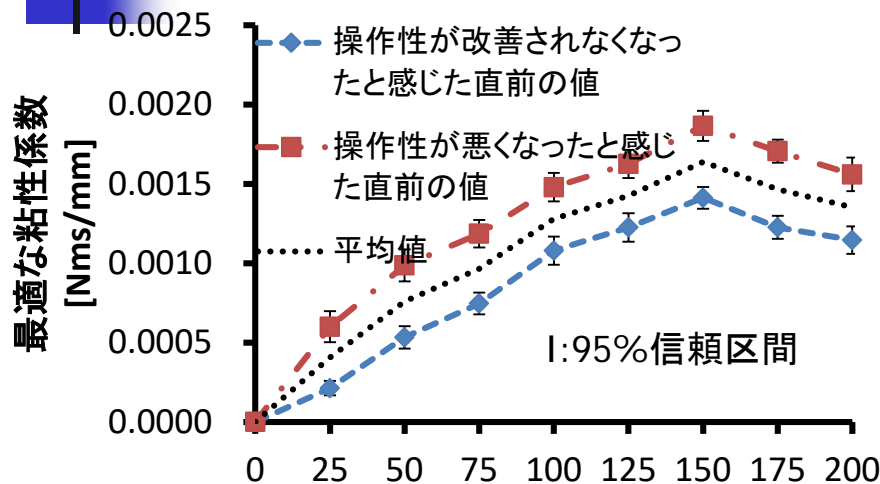


(b) 操作速度: 5.3cm/秒

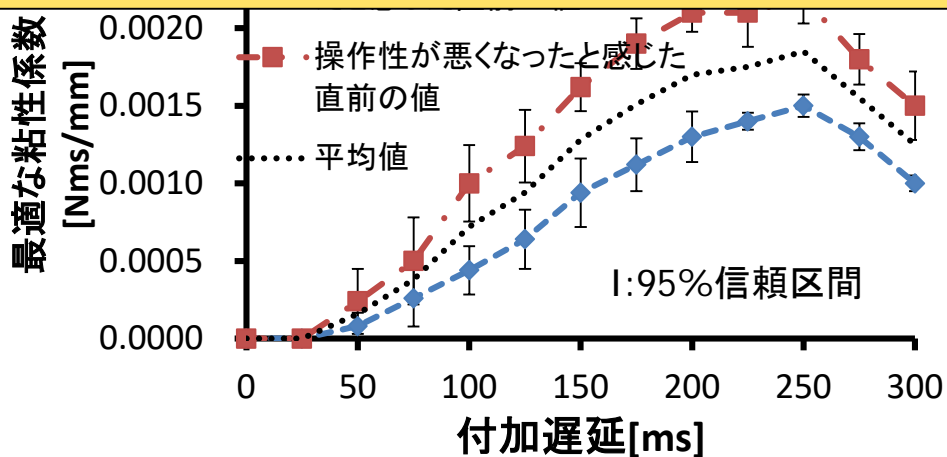


(c) 操作速度: 3.2cm/秒

粘性係数の最適値(弾性係数: 0.04[N/mm])



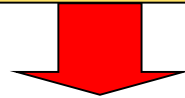
最適な粘性係数が最大になる付加遅延の値は、操作速度と弾性係数によって異なる



(c) 操作速度: 3.2cm/秒

最適な粘性係数が最大となるときの付加遅延の推定式

粘性係数が最大となる付加遅延の値を基準に左右対称の直線とみなして粘性係数を推定できる可能性



最適な粘性係数が最大となるときの付加遅延を操作速度と弾性係数から求めることが必要

$$D_{\text{peak}} = -24\nu - 1190 K_s + 372$$

D_{peak} : 最大となる付加遅延の値

ν : 操作速度 K_s : 弾性係数

寄与率(R^2)は0.921と高かったので、最適な粘性係数が最大となるときの付加遅延の値は、操作速度と弾性係数から高い精度で推定可能

最適な粘性係数の推定式

最適な粘性係数の推定式

$$K_d = 8.7 \times 10^{-6} \cdot |D_{\text{peak}} - D| - 1.5 \times 10^{-4} \cdot v - 9.4 \times 10^{-3} \cdot K_s + 3.0 \times 10^{-3}$$

D_{peak} : 最大となる付加遅延の値

D : 付加遅延

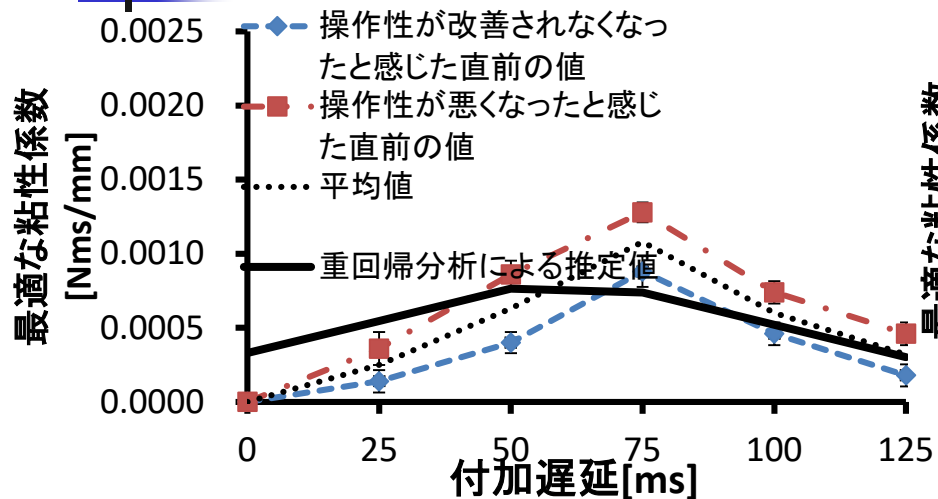
v : 操作速度

K_s : 弾性係数

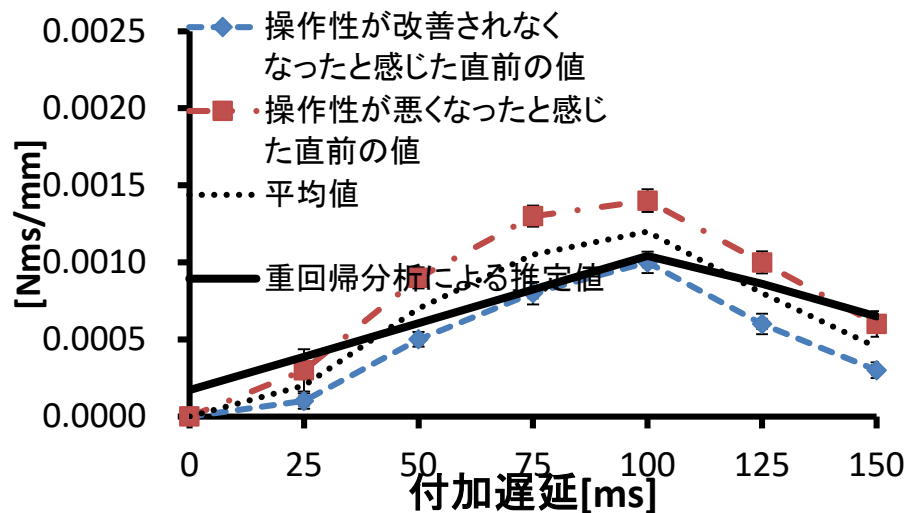
寄与率(R^2)は0.838と高かったので、最適な粘性係数は、付加遅延、操作速度、弾性係数から高い精度で推定可能

実験結果と推定値との比較

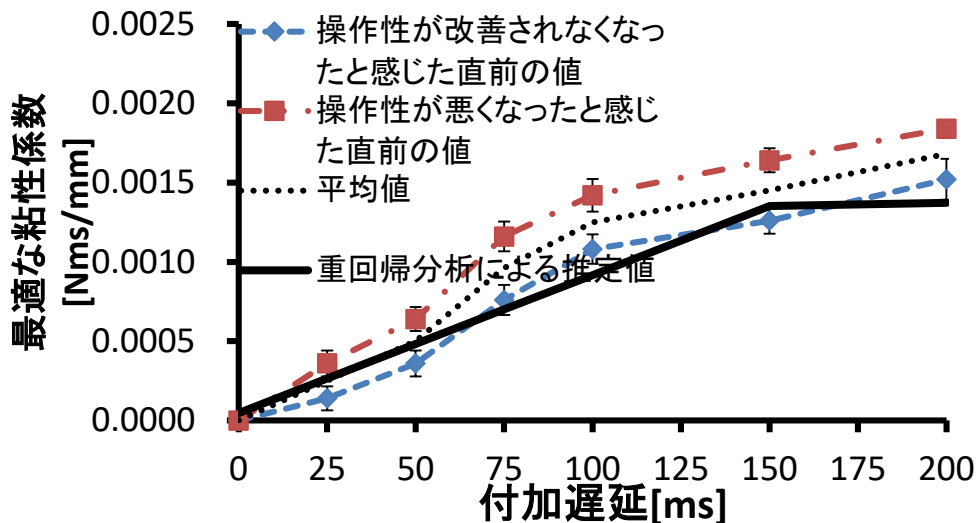
(弾性係数: 0.10[N/mm])



(a) 操作速度: 8.0cm/秒



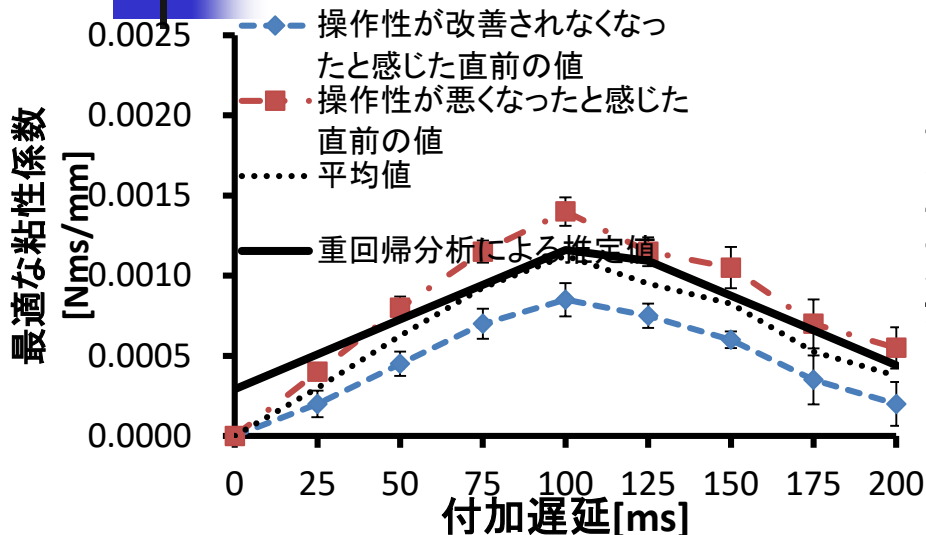
(b) 操作速度: 5.3cm/秒



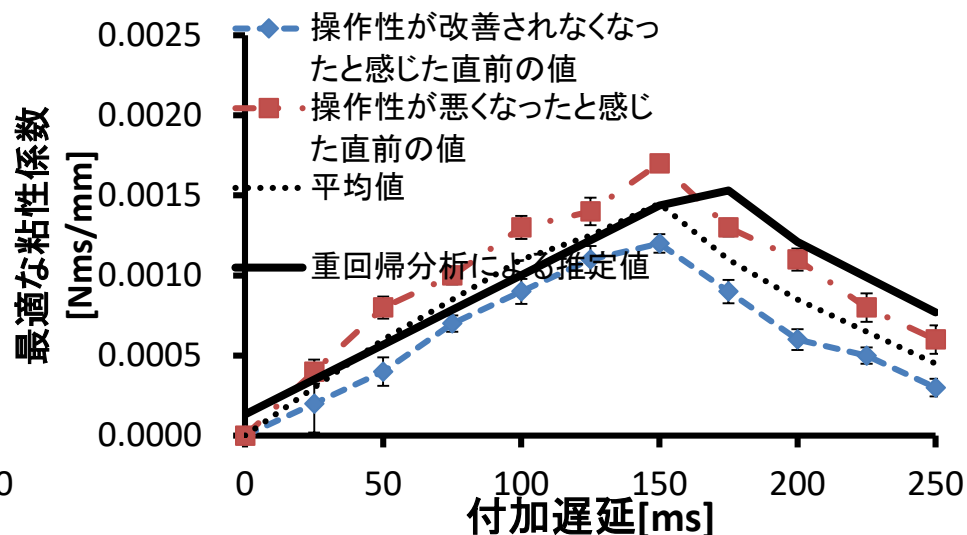
(c) 操作速度: 3.2cm/秒

実験結果と推定値との比較

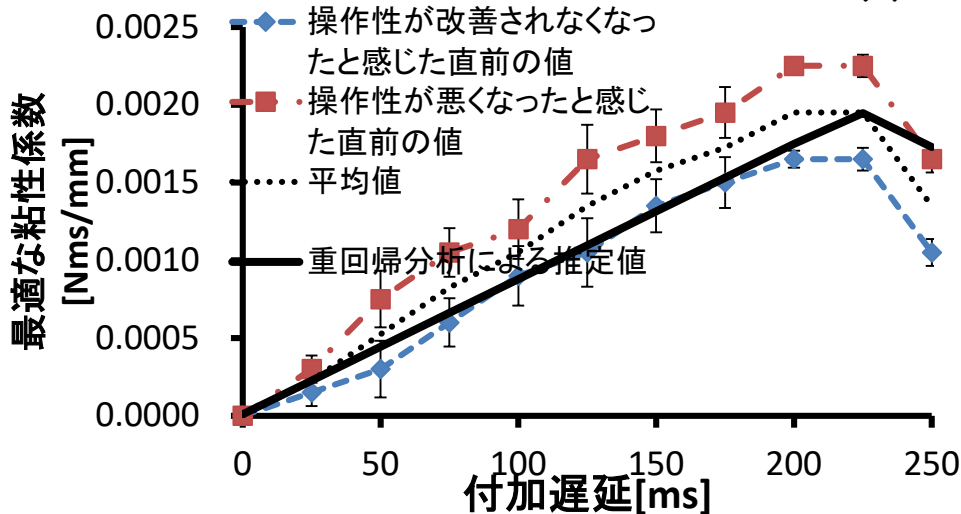
(弾性係数: 0.06[N/mm])



(a) 操作速度: 8.0cm/秒



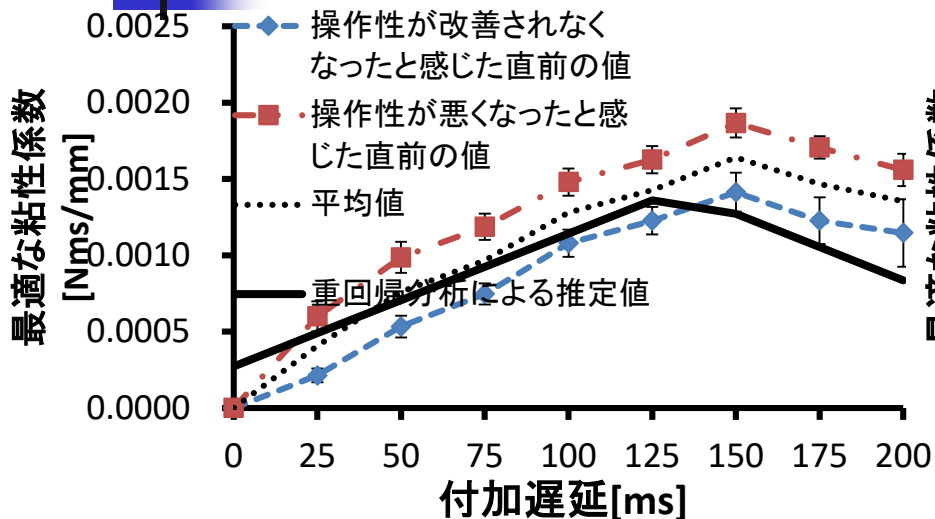
(b) 操作速度: 5.3cm/秒



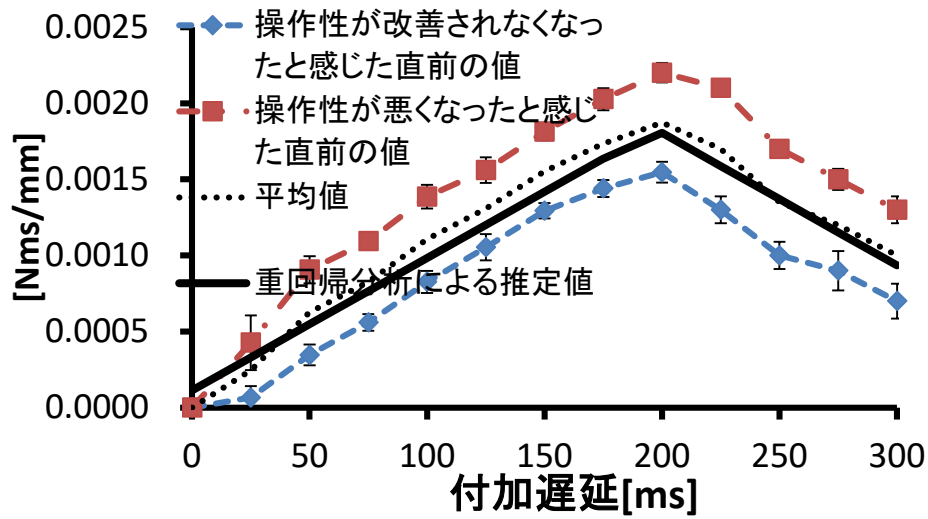
(c) 操作速度: 3.2cm/秒

実験結果と推定値との比較

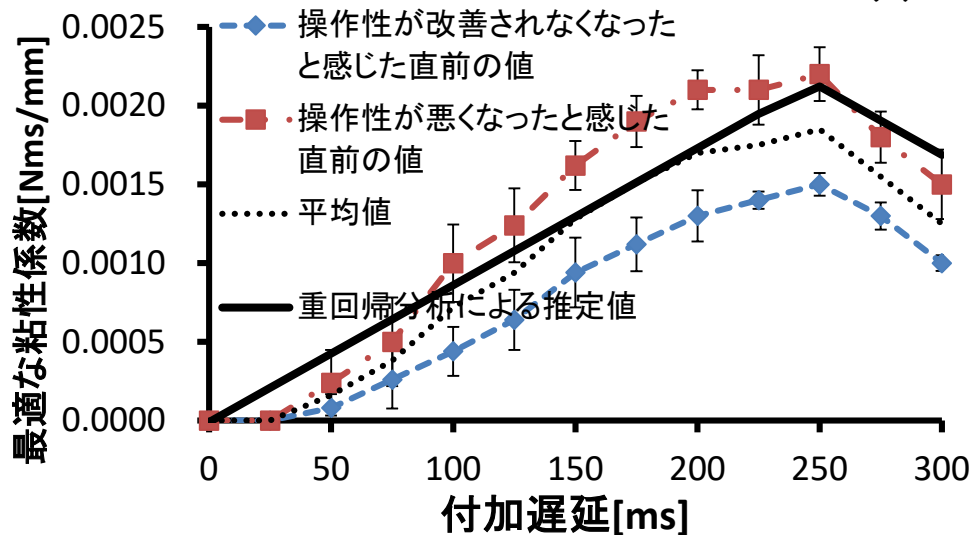
(弾性係数: 0.04[N/mm])



(a) 操作速度: 8.0cm/秒



(b) 操作速度: 5.3cm/秒



(c) 操作速度: 3.2cm/秒

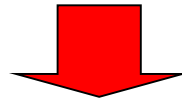
粘弾性の適応制御

弾性係数の推定式*1

$$K_s = 9 / (2D + 90)$$

D : 付加遅延

付加遅延から最適な弾性係数を求める

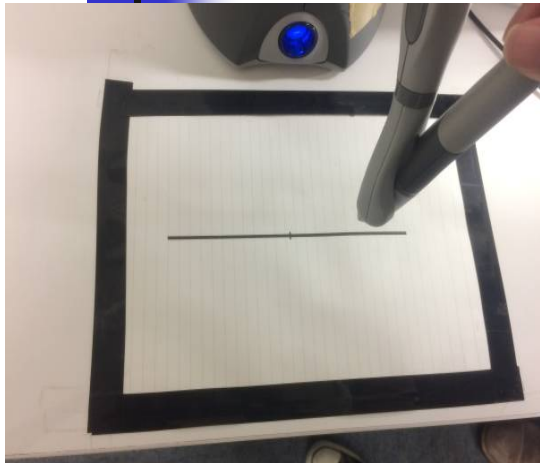


粘性係数の推定式

$$K_d = 8.7 \times 10^{-6} \cdot |D_{\text{peak}} - D| - 1.5 \times 10^{-4} \cdot v \\ - 9.4 \times 10^{-3} \cdot K_s + 3.0 \times 10^{-3}$$

付加遅延, 操作速度, 弾性係数から最適な粘性係数を求める

QoE評価方法(1/2)



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

- ▶ 16cm動かすのにかかる時間
3秒(平均速度: 5.3cm/秒)
4秒(平均速度: 4.0cm/秒)

- ▶ 30秒間にわたって動かす
- ▶ ITU-R 500-11 単一刺激法
- ▶ 付加遅延: 0ms
 K_s : 0.10[N/mm]
 K_d : 0.0000[Nms/mm]で 練習
(実験による最適値)

- ▶ 付加遅延の値
0, 50, 100, 200ms
- ▶ K_d , K_s の固定値
推定式から得られた値
- ▶ 付加遅延と K_d , K_s を固定値とするとき
と適応制御するときでランダムに提示



QoE評価方法(2/2)

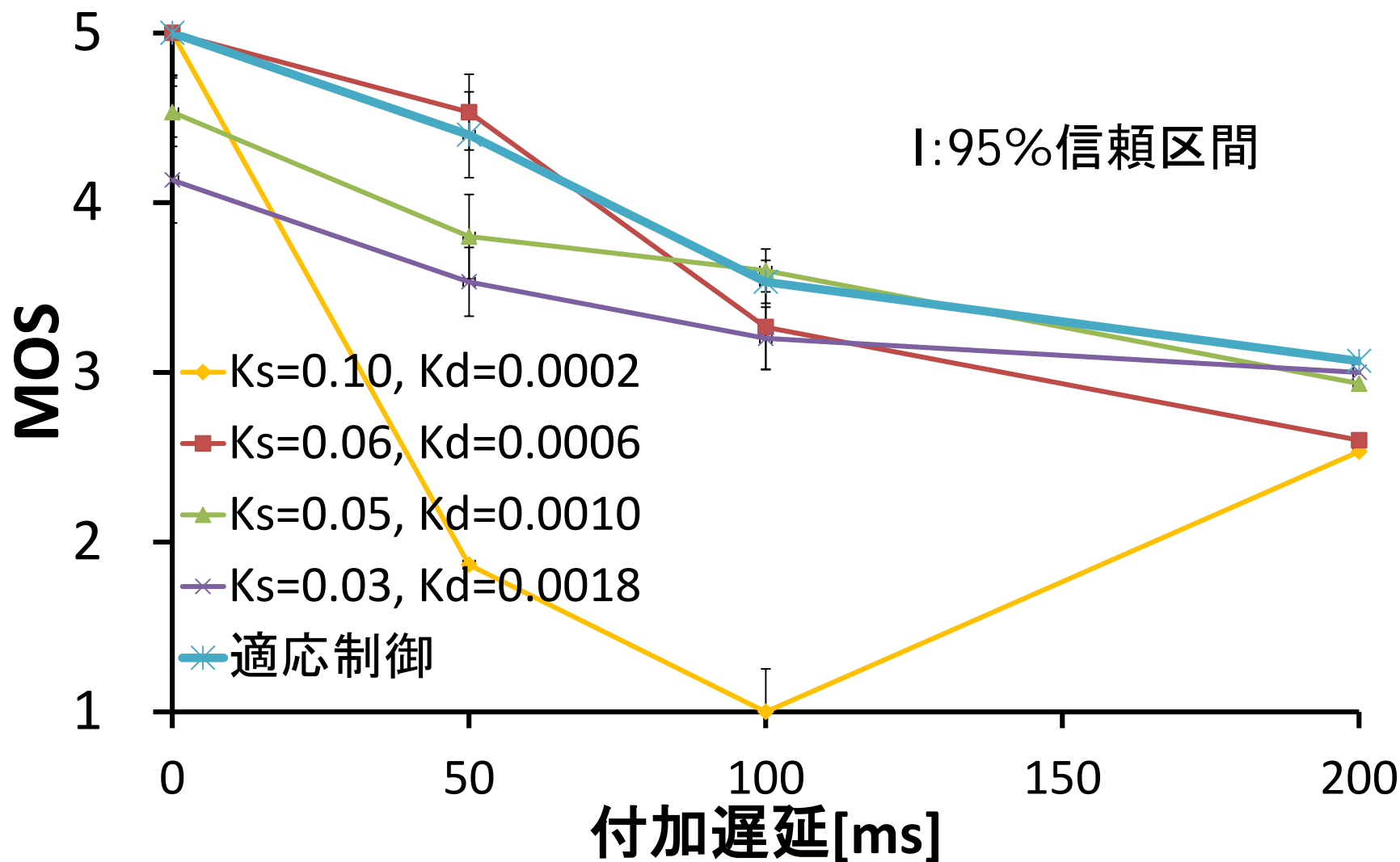
- ▶ 練習のときを基準とし、触覚インタフェース装置の操作性（振動や、反力の大きさなどを総合的に表した品質）について評点をつけ、MOS(Mean Opinion Score)を計算

5段階妨害尺度

評点	評価基準
5	劣化が感じられない
4	劣化が分かるが気にならない
3	劣化が気になるが邪魔にならない
2	劣化が邪魔になる
1	劣化が非常に邪魔になる

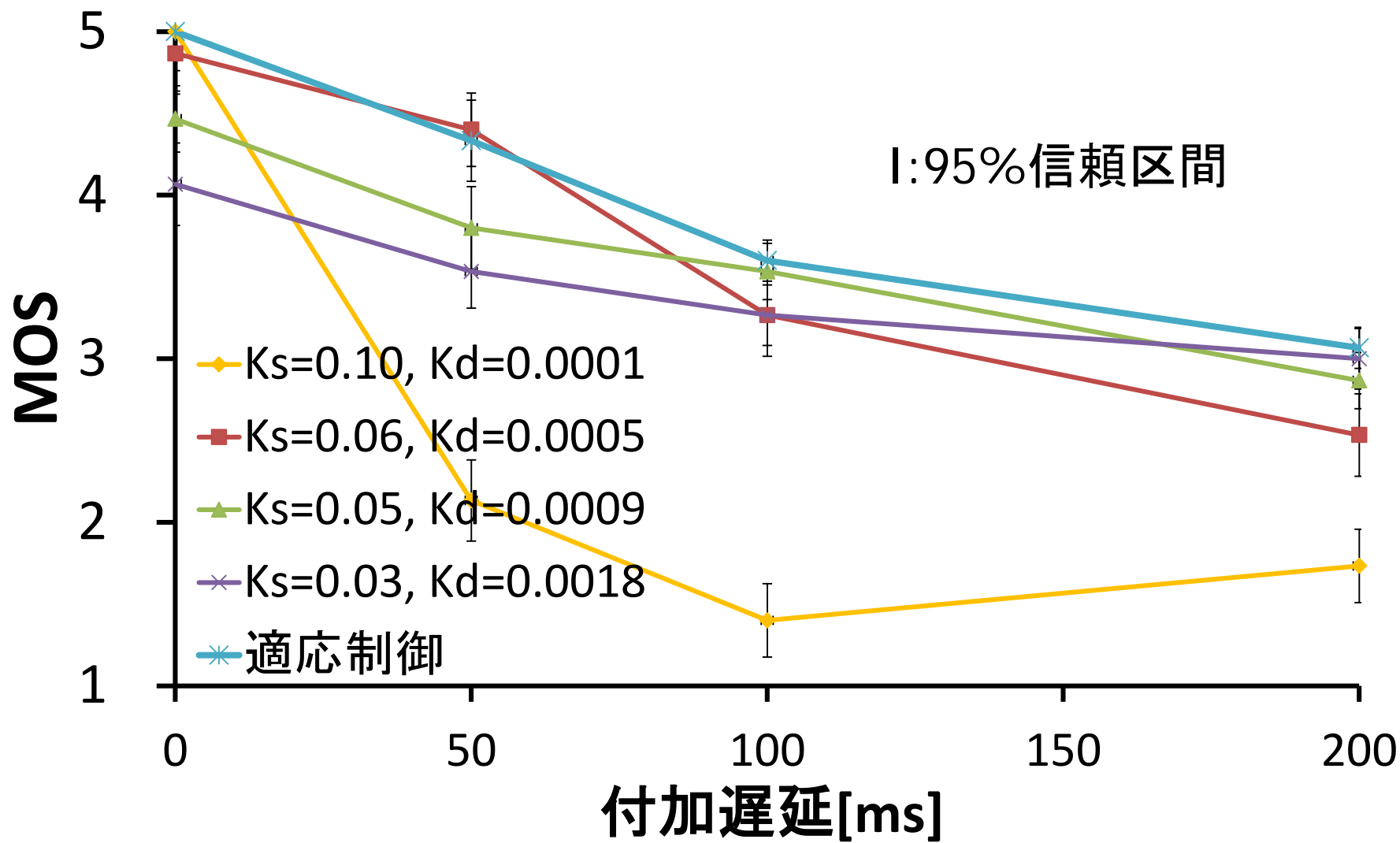
評価結果

平均速度: 5.3cm/秒



評価結果

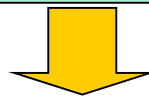
平均速度: 4.0cm/秒



結論

遠隔制御システムにおいて、粘弾性の適応制御を提案

- ネットワーク遅延や操作速度、弾性係数に対して最適な粘性係数を調査
- 重回帰分析によって、最適な粘性係数の推定式を導出し、弾性係数の推定式と組み合わせて用いてQoE評価を行い、粘弾性の適応制御の効果を調査



- 付加遅延が大きくなるにつれて、粘性係数の最適値が最初は増大するが、ある程度大きくなると小さくなっていく
- 粘弾性の適応制御を用いる場合の操作性は、最も良かったネットワーク遅延に対して最適な弾性係数、粘性係数を選んだ場合とほぼ同等の操作性



今後の課題

- ▶ 横線に沿って動かす作業だけでなく、その他の多様な作業を対象として最適値を調査
- ▶ ネットワーク遅延や触覚インタフェース装置の操作速度などの時間的な変化に対する、粘弾性の適応制御の動的な振舞を調査