

# 移動を考慮した遠隔ロボットシステムに おける力覚センサを用いた ロボット移動制御の効果

中川博詞<sup>†</sup> 石橋豊<sup>†</sup>

黄平国<sup>‡</sup> 立岩佑一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup>名古屋工業大学    <sup>‡</sup>岐阜聖徳学園大学

電子情報通信学会 CQ研究会  
つくば国際会議場  
2023年1月26日



# 発表概要

---

- 背景
- 従来研究と問題点
- 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
- ロボット移動制御
- 実験方法
- 実験結果
- 結論と今後の課題

# 背景(1/2) \*1

\*1 金石 他, 信学技報, CQ2021-1, May 2021.

- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムは  
利用者がロボットの力を感じながら作業可能

➡ 様々な分野で作業の高効率化や  
精度向上の期待

- ロボットが移動可能であれば, さらに有用性が向上



ネット  
ワーク





## 背景(2/2)

---

- 複数のロボットで凸凹した道を移動しながら協調作業をする場合, 急激な位置変化が起こる可能性

 物体に大きな力がかかり破損の恐れ

力を抑える制御が必要

# 従来研究(1/3)

\*1 金石 他, 信学技報, CQ2021-1, May 2021.

- 二つのロボットが移動しながら物体を一緒に運ぶ作業を対象

\*1

- 片方のロボットが急激な位置変化
- 他方のロボットを指数関数的に位置制御

➡ 大きな力を抑制

## 問題点

- 力を抑えるのに要する時間が長い
- 位置制御値が動的に変化しない
- どちらのシステムが急激な位置変化をしたかわからない⇒両方のシステムで制御する必要

# 従来研究(2/3)

\*2 中川 他, ITE冬季大会, 31A-7, Dec. 2021.

- 二つのロボットが電動ハンドにより物体を手渡す作業を対象

\*2

- 片方のロボットが自由落下
- 自由落下と同じ加速度で位置修正
- 2つのシステムにそれぞれ制御適用の有無の4つの場合の比較
- ➡ 他方のロボットを制御する方が効果的

## 問題点

- 移動制御値を動的に変化しない

# 従来研究(3/3)

\*3 Y.Ishibashi et al., ICCE-TW, 31A-7, July 2022.

- 二つのロボットが移動しながら物体を一緒に運ぶ作業を対象

\*3

- 前後方向におけるロボット間のずれを調整
- 従来の位置制御と運動方程式に基づいたロボット移動制御を比較

➡ 運動方程式に基づいたロボット移動制御が効果的

急激な位置変化, 上下方向の検討が行われていない



# 目的

---

- 2つのロボットが移動しながら一緒に物体を運ぶ作業
- 片方のロボットが上下に急激な位置変化



両方のシステムに3つロボット移動制御を  
適用し効果を比較

- 力情報を用いた制御
- 指数関数による制御
- 運動方程式による制御



# 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステム(1/3)

システム2

産業用ロボット



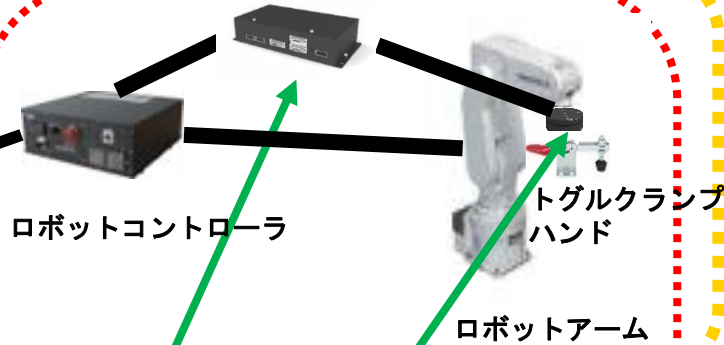
触覚インタフェース装置



マスタ端末



スレーブ端末



システム1



触覚インタフェース装置



マスタ端末



Webカメラ



スレーブ端末



ネット  
ワーク

# 力覚フィードバックを用いた 遠隔ロボットシステム(2/3)

\*1 金石 他, 信学技報, CQ2021-1, May 2021.

## 反力の計算方法

\*1

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

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

$\mathbf{F}_t^{(s)}$ : 時刻 $t$ (ms)にスレーブ端末から取得した値

$K_{\text{scale}}$ :  $\mathbf{F}_{t-1}^{(s)}$ にかける倍率(=0.5)

# 力覚フィードバックを用いた 遠隔ロボットシステム(3/3)

\*1 金石 他, 信学技報, CQ2021-1, May 2021.

ロボットアームの位置

\*1

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{M}_{t-1} + \mathbf{V}_{t-1} \quad (|\mathbf{V}_{t-1}| < V_{\max}) \quad (2)$$

$\mathbf{S}_t$  : 時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル

$\mathbf{M}_t$  : 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

$\mathbf{V}_t$  : 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速度(=5mm/ms)

# ロボット移動制御(1/4)

\*4 石川 他, 信学技報, CQ2020-18, June 2020.

ロボット移動制御

\*4

$$\hat{\mathbf{S}}_t = \mathbf{S}_t + \mathbf{P}_t \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{S}}_t$  : 時刻 $t(> 0)$ におけるロボットアームの位置ベクトル

$\mathbf{S}_t$  : 時刻 $t(> 0)$ における触覚インタフェース装置の位置から決まる位置ベクトル

$\mathbf{P}_t$  : 時刻 $t$ における位置調整ベクトル

# ロボット移動制御(2/4)

\*4 石川 他, 信学技報, CQ2020-18, June 2020.

**力情報を用いた制御**

\*4

$$\mathbf{P}_t = a\mathbf{F}_t \quad (4)$$

$$a = 4.82 \times 10^{-2}l - 1.16 \quad (5)$$

$\mathbf{P}_t$  : 時刻 $t$ における位置調整ベクトル

$\mathbf{F}_t$  : 時刻 $t$ に物体に加わる力

$l$  : 角材の長さ (cm)

# ロボット移動制御(3/4)

\*1 金石 他, 信学技報, CQ2021-1, May 2021.

指数関数による制御

\*1

$$P_t = \begin{cases} \pm 0.01 \times (1.12)^n & (\text{if } |F_t| \geq 1\text{N}) \\ aF_t & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

$P_t$  : 時刻 $t$ における位置調整ベクトル

$F_t$  : 時刻 $t$ に物体に加わる力

$n$  : 位置調整回数 ( $\geq 0$ )

# ロボット移動制御(4/4)

\*3 Y.Ishibashi et al., ICCE-TW, 31A-7, July 2022.

\*5 石川 他, 信学技報, CQ2019-34, July 2019.

運動方程式による制御<sup>\*3</sup>

$$\mathbf{P}_t = \begin{cases} \alpha \mathbf{P}_{t-1} + K \mathbf{F}_t & (\text{if } |\mathbf{P}_{t-1}| \geq 0.1\text{mm}) \\ K \mathbf{F}_t & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

$\mathbf{P}_t$  : 時刻 $t$ における位置調整ベクトル

$\mathbf{F}_t$  : 時刻 $t$ に物体に加わる力

$\alpha$  : 位置調整ベクトルの係数 (=0.95)

$K$  : 物体に加わる力にかかる係数 (=0.349)<sup>\*5</sup>



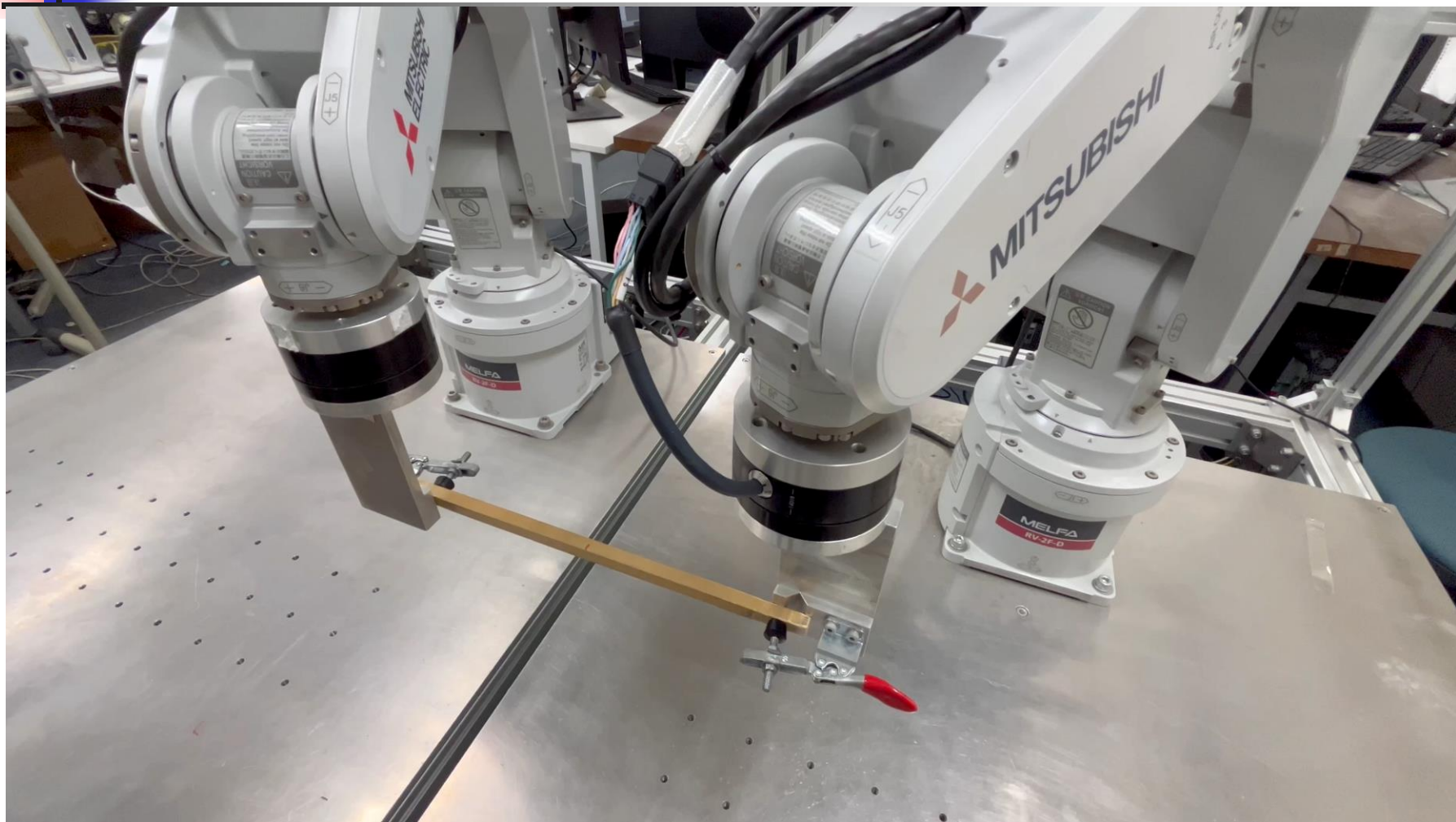
# 実験方法(1/2)

---

- 二つの対等なシステムを用いる
  - 利用者は触覚インタフェース装置で左右, 上下方向は操作できない
- システム1が自動で前方向に動く
  - 移動中に20mm降下させる
  - 落下速度は加速度 $g$ ,  $g/2$ ,  $g/4$ ,  $g/8$ , 等速 $0.2\text{m/s}$
- 利用者はシステム2を前方向に操作
- 両方のシステムの上下方向に3つのロボット移動制御をそれぞれ適用し, 効果を比較
  - 力情報を用いた制御
  - 指数関数による制御
  - 運動方程式による制御



# 実験方法(2/2)

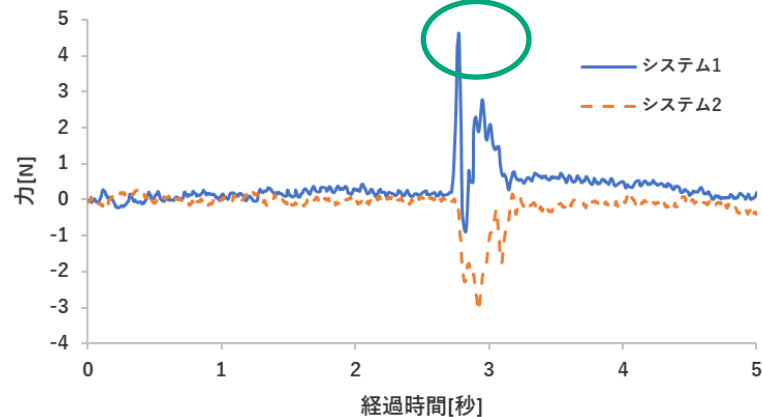
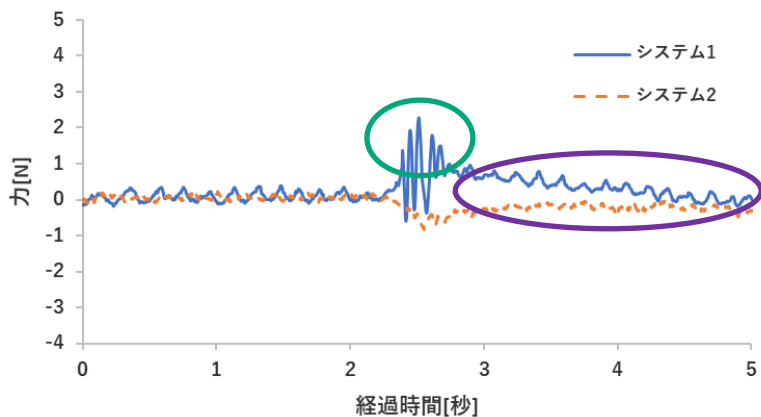


# 実験結果(1/6)

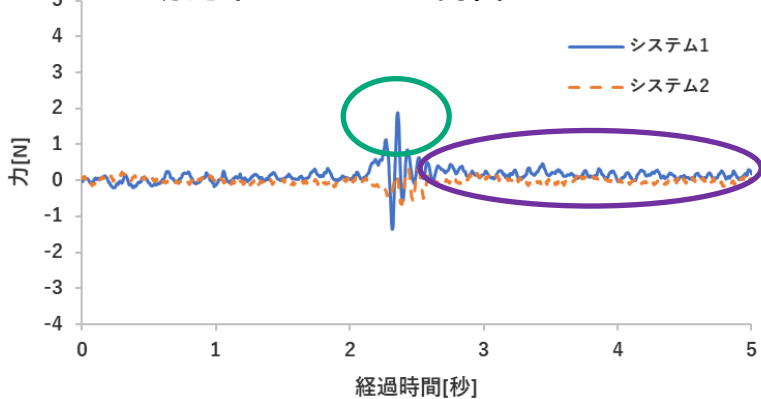
## 経過時間に対する力の変化

加速度:  $g$  指数関数による制御

力情報を用いた制御



運動方程式による制御



運動方程式による制御が、力の最大値、力のかかる時間が最も小さい

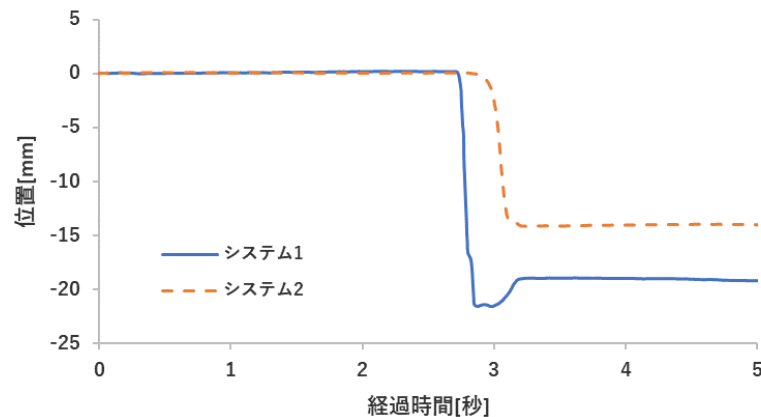
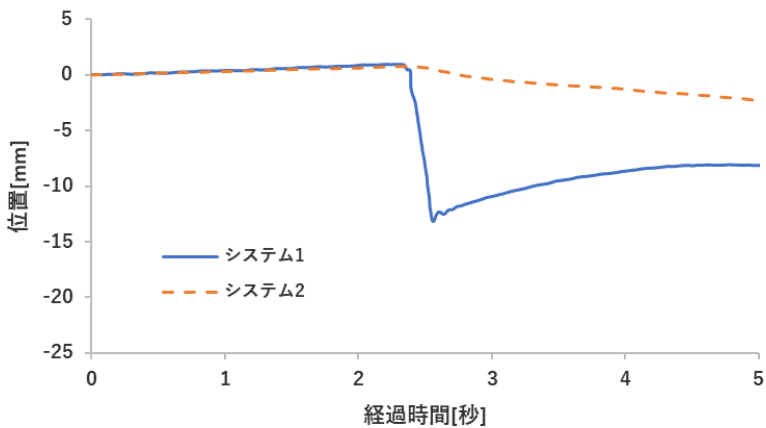
# 実験結果(2/6)

## 経過時間に対する位置の変化

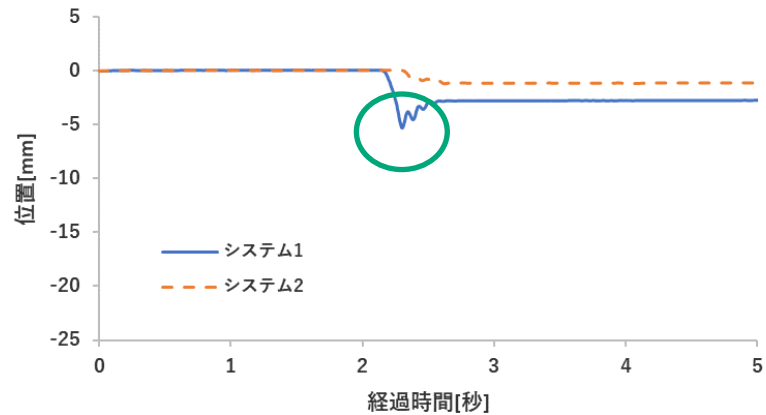
力情報を用いた制御

加速度:  $g$

指数関数による制御



運動方程式による制御



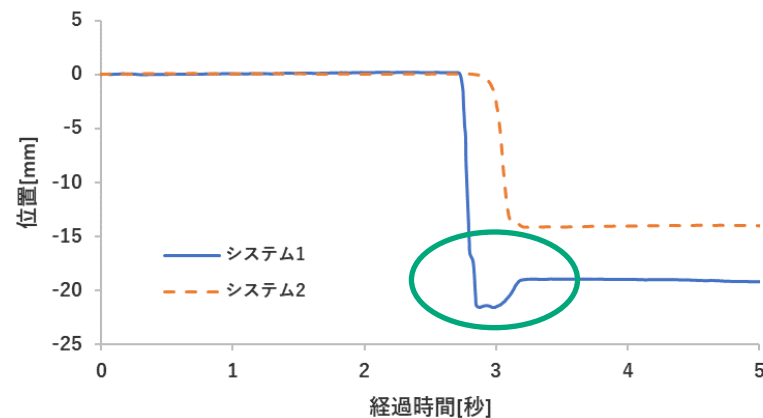
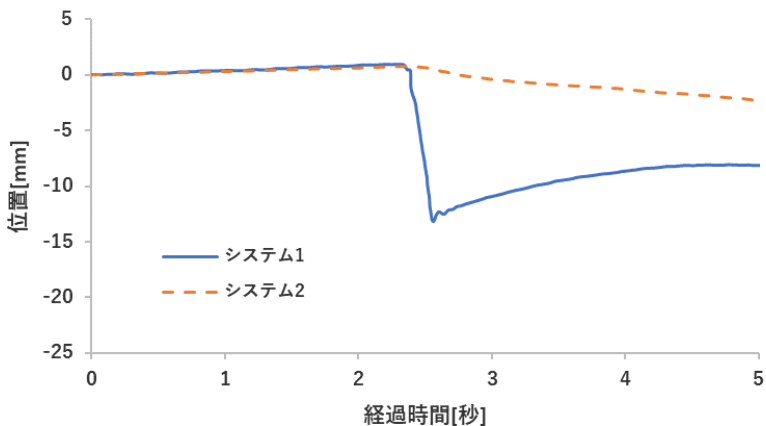
# 実験結果(2/6)

## 経過時間に対する位置の変化

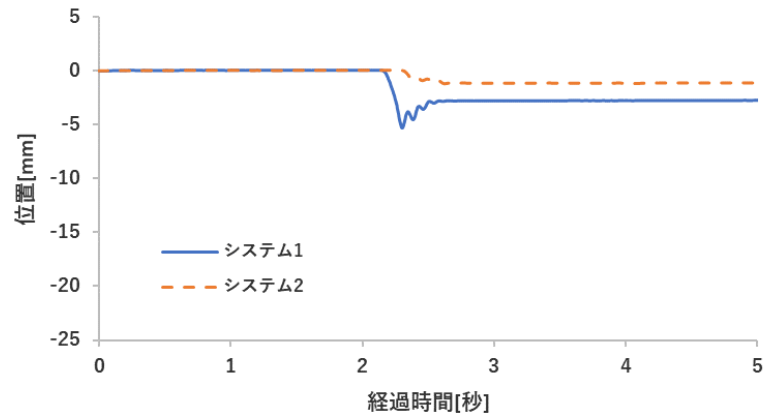
力情報を用いた制御

加速度:  $g$

指数関数による制御



運動方程式による制御



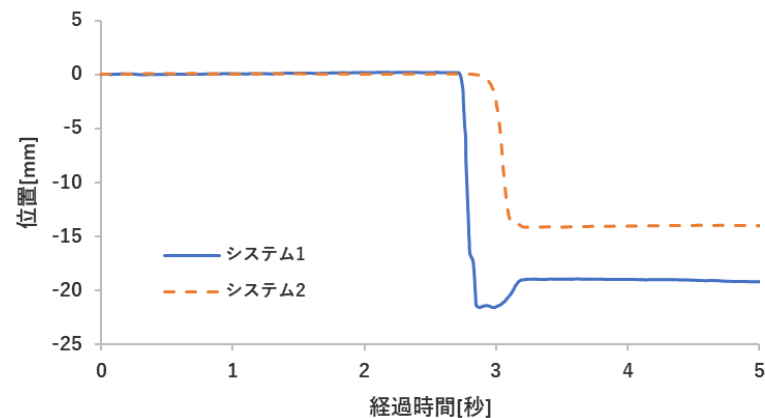
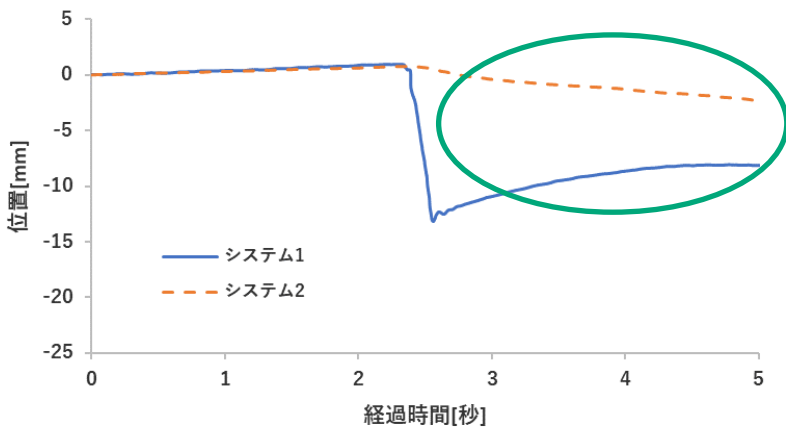
# 実験結果(2/6)

## 経過時間に対する位置の変化

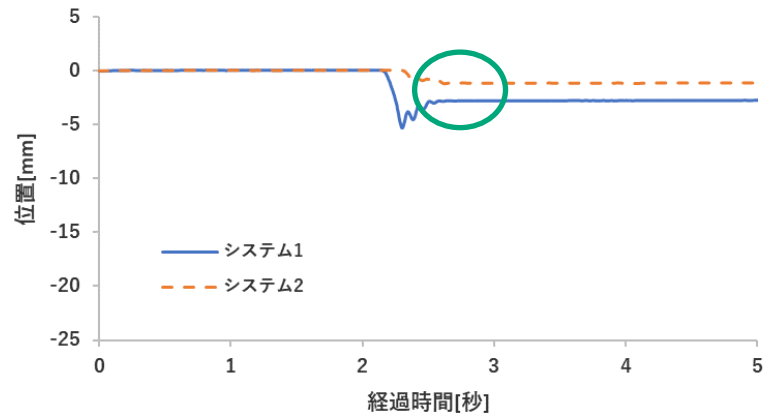
力情報を用いた制御

加速度:  $g$

指数関数による制御



運動方程式による制御

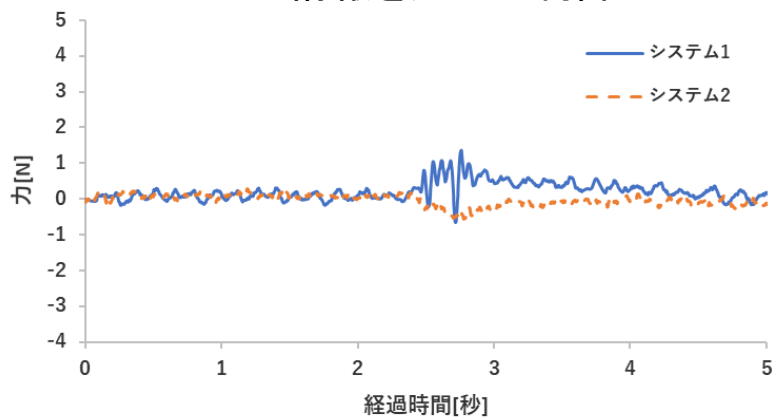


# 実験結果(3/6)

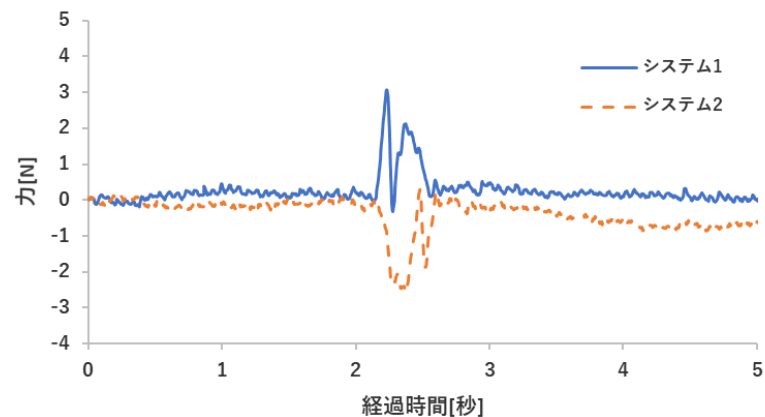
## 経過時間に対する力の変化

加速度:  $g/2$

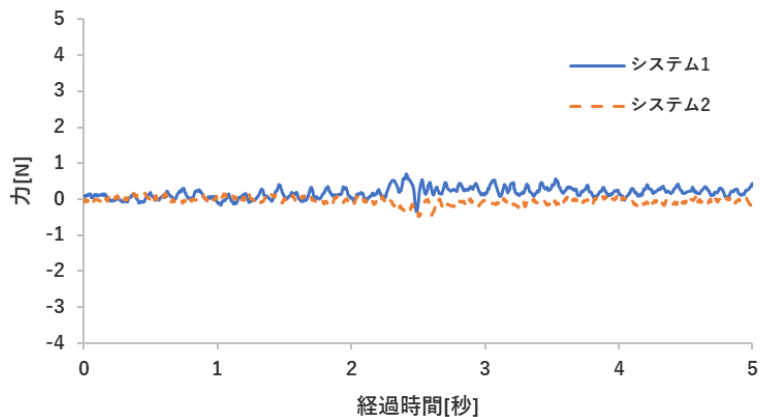
力情報を用いた制御



指数関数による制御



運動方程式による制御

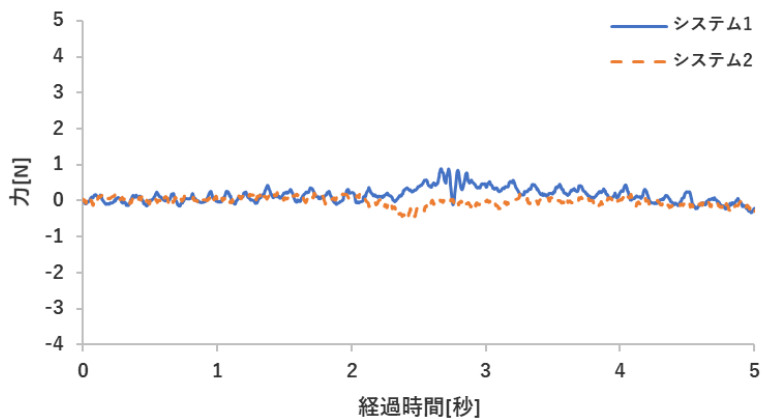


# 実験結果(4/6)

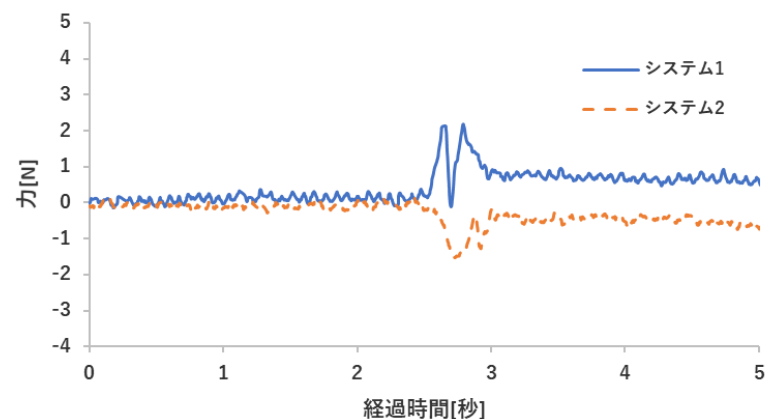
## 経過時間に対する力の変化

加速度:  $g/4$

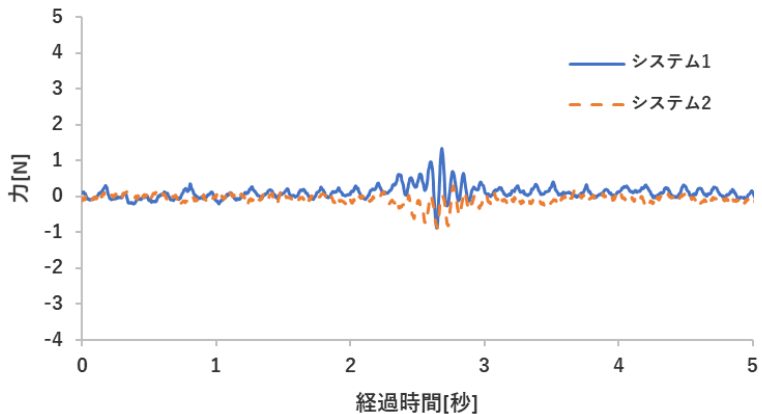
力情報を用いた制御



指数関数による制御



運動方程式による制御

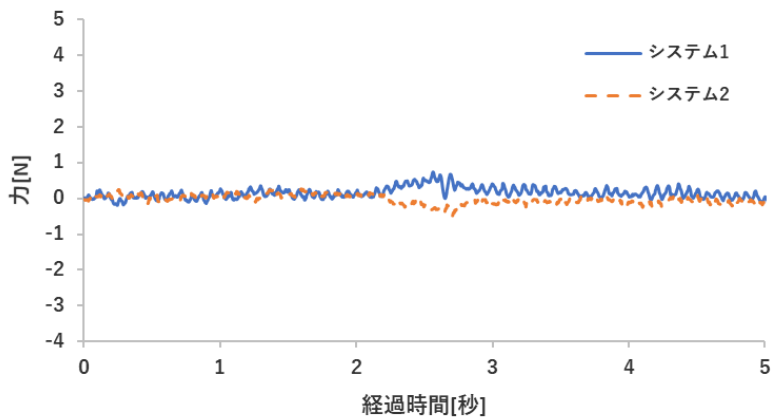


# 実験結果(5/6)

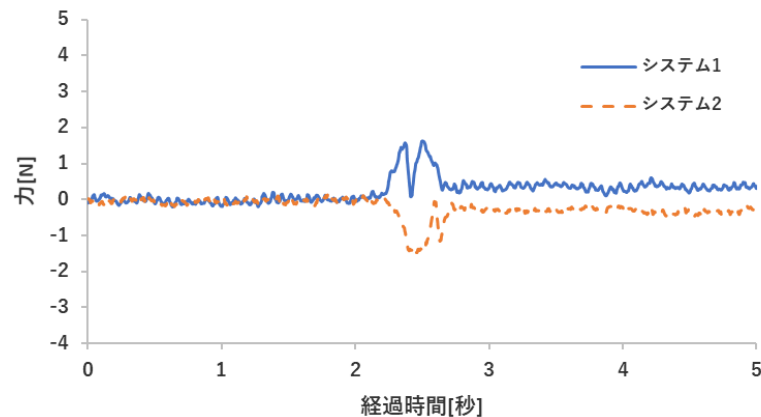
## 経過時間に対する力の変化

加速度:  $g/8$

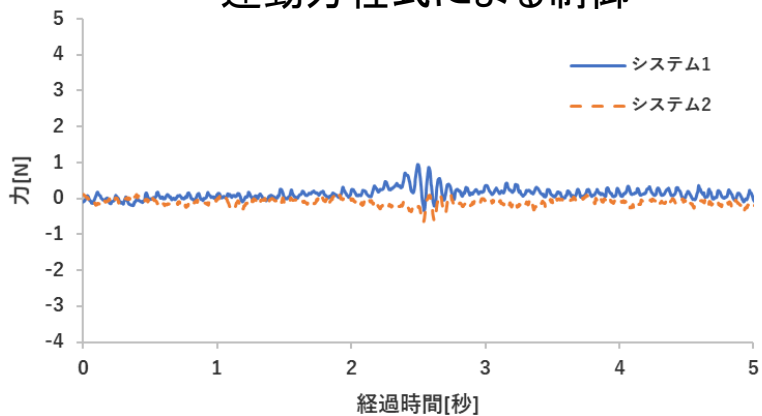
力情報を用いた制御



指数関数による制御



運動方程式による制御



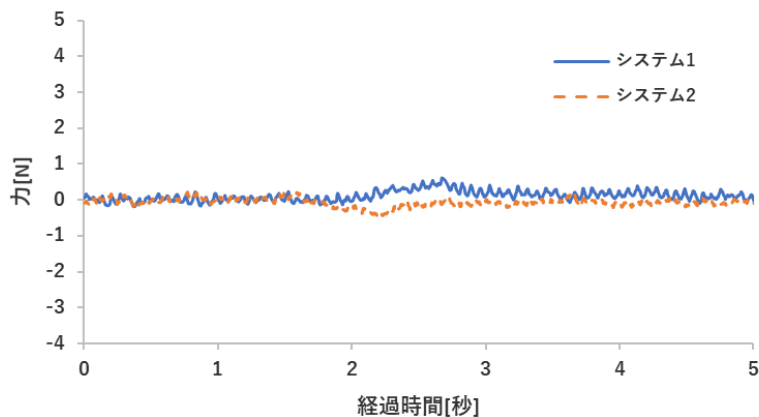


# 実験結果(6/6)

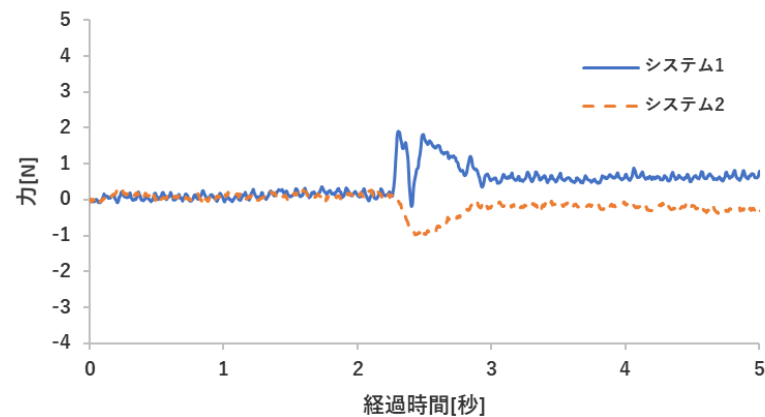
## 経過時間に対する力の変化

等速: 0.2m/s

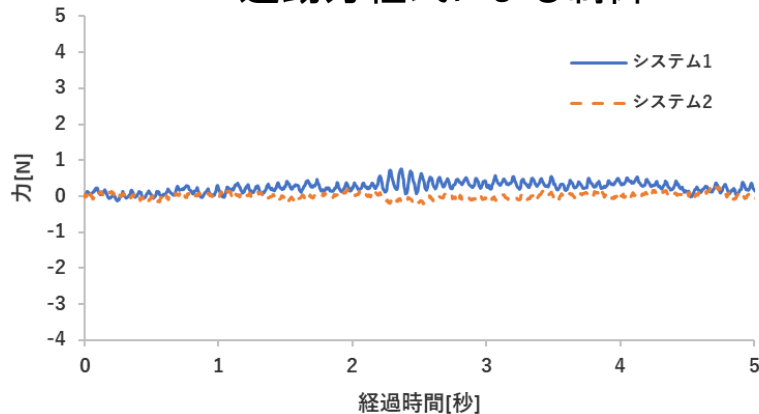
力情報を用いた制御



指数関数による制御



運動方程式による制御



# 結論

- 力覚フィードバックを用いた遠隔ロボットシステムを2つ用いて物体を一緒に運ぶ協調作業
  - 片方のシステムに上下に急激な位置変化
  - 実験により, 3つの制御の効果を比較
- ➡ 運動方程式によるロボット移動制御が最も効果的である

## 今後の課題

上昇, 前後, 左右に対しての効果の調査