

# 実装が容易なデータ駆動型 シミュレーションの新手法

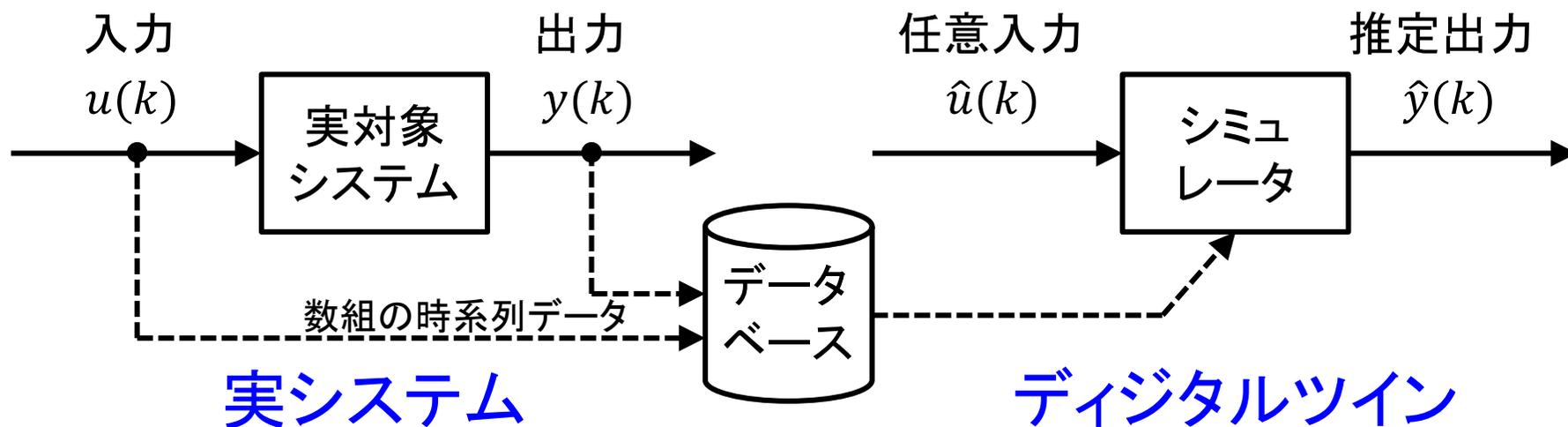
横浜国立大学 大学院工学研究院  
知的構造の創生部門

教授 藤本 康孝

2024年6月11日

## 本技術の概要

- 対象の入出力データセットを数組用意するだけで、その挙動を計算機上で再現する計算手法を提案  
(データ駆動型シミュレーション; デジタルツイン)
- 対象のモデルを用いずに、システムの評価、調整、最適化が可能に(シミュレータ作成コストの大幅低減)



# 背景

## データ駆動型制御系設計

1. データ駆動型制御 … 制御対象の入出力データから**直接、制御器を設計**
2. データ駆動型シミュレーション … 制御対象の入出力データから**任意入力に対する対象の応答を推定**

データ駆動型  
制御

データ駆動型  
シミュレー  
ション

汎用性が高い

## 従来技術とその問題点

従来法として以下1～4があるが、

- ・ 実装が複雑で計算コストが高い
- ・ 汎用性が低い(線形制御の仮定が必要)

等の問題があり、普及に課題

1. 部分空間法: Markovsky, et al. (Univ. of Southampton), Int. J. of Control, 2008
2. データ駆動型予測法: Kaneko, et al. (電通大), SICE Annual Conference, 2017
3. 複素周波数伝達関数法: Hoogendijk, et al. (Eindhoven Univ. of Tech), Control Engineering Practice, 2015
4. 仮想時間応答法: Kosaka, et al. (奈良先端科技大), IFAC-PaperOnLine, 2020

# 従来技術とその問題点

## データ駆動型シミュレーション手法

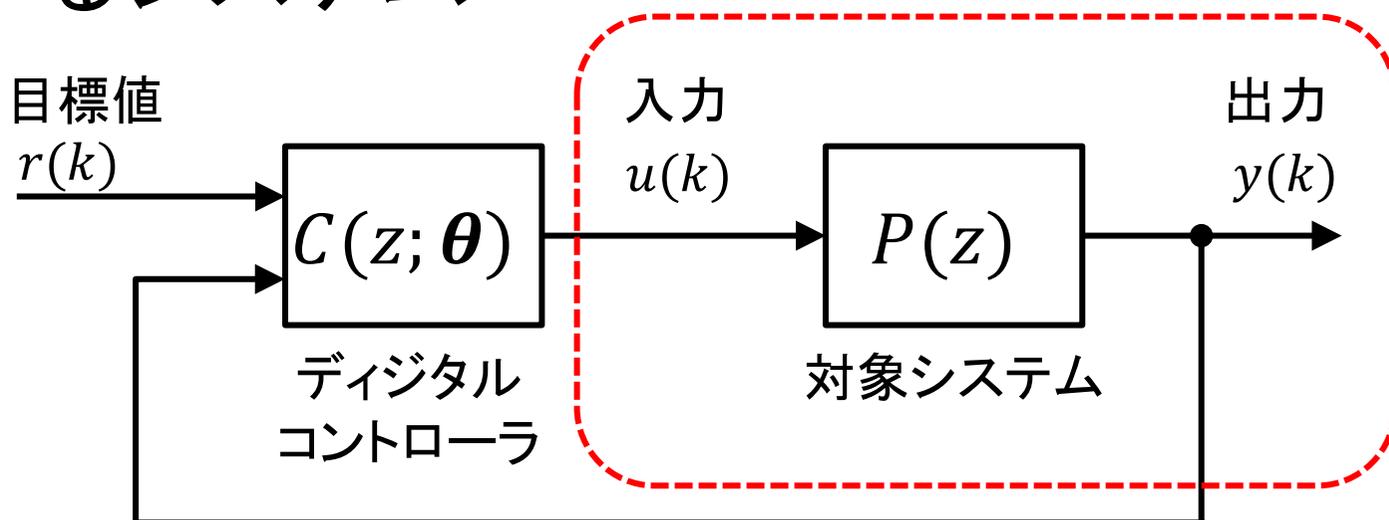
	提案法 CDDS	部分空間法	データ駆動 型予測法	複素周波数 伝達関数法	仮想時間応 答法
アプローチ	伝達関数	状態空間	伝達関数	伝達関数	伝達関数
制御器の線形性	不要	不要	必要	必要	必要
計算コスト	低	高	中	低	中

## データ駆動型制御法

	CDDS法		VRFT法	FRIT法	NCbT法
制御器の線形性	不要	必要	必要	必要	必要
評価関数フィルタ	不要	不要	必要	不要	必要
制御パラメータ 求解手法	非線形 最適化	最小二乗法	最小二乗法	非線形 最適化	最小二乗法

# 提案法：畳み込み演算に基づく データ駆動型シミュレーション Convolution-based Data-Driven Simulation (CDDS)

想定するシステム



## 提案法 (CDDS法)

対象システムの入出力データ (実験)

$$u_0(k), y_0(k), k = 0, 1, \dots, N - 1$$

実験データの入出力関係  $Y_0(z) = P(z)U_0(z)$  (1)

ただし、 $U_0(z), Y_0(z)$ は $u_0(k), y_0(k)$ のZ変換

任意入力  $\hat{u}(k)$  に対する推定出力  $\hat{y}(k)$

$$\hat{Y}(z) = P(z)\hat{U}(z) \quad (2)$$

(1)(2)から  $P(z)$  を消去  $U_0(z)\hat{Y}(z) = Y_0(z)\hat{U}(z)$

時間領域での表現  $u_0(k) * \hat{y}(k) = y_0(k) * \hat{u}(k)$

つまり  $\sum_{i=0}^k u_0(k-i)\hat{y}(i) = \sum_{i=0}^k y_0(k-i)\hat{u}(i)$

# 提案法 (CDDS法)

これを  $\hat{y}(k)$  について解くと

現時刻の  
推定出力

$$\hat{y}(k) = \frac{1}{u_0(0)} \left( \sum_{i=0}^k y_0(k-i) \hat{u}(i) - \sum_{i=0}^{k-1} u_0(k-i) \hat{y}(i) \right)$$

仮想入力

過去の推定出力

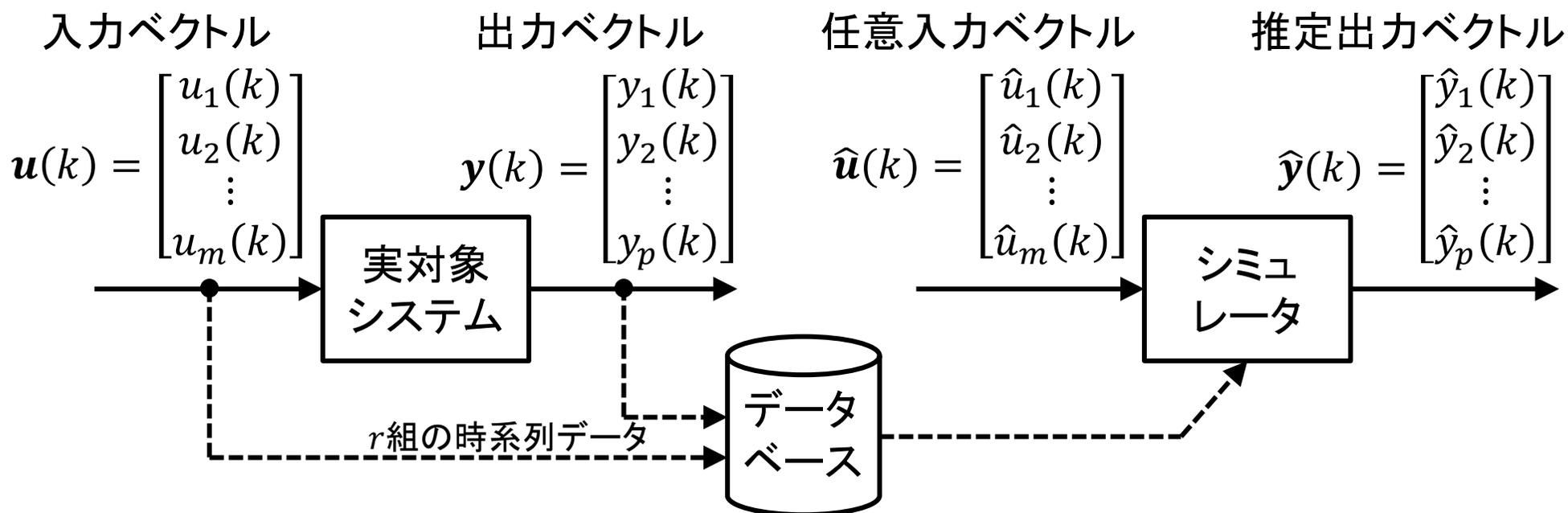
実験データ

$$k = 0, 1, \dots, N - 1$$

シンプルで実装が容易！

# 提案法 (CDDS法) - 多入出力系

多入出力(MIMO)システムの場合 (入力数 $m$ 、出力数 $p$ )



MIMOでも実装が容易！

# 提案法 (CDDS法) - 多入出力系

多入力多出力のシステムの場合 (入力数  $m$ 、出力数  $p$ )

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \begin{bmatrix} u_1^{(1)}(k) & u_1^{(2)}(k) & \cdots & u_1^{(r)}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_m^{(1)}(k) & u_m^{(2)}(k) & \cdots & u_m^{(r)}(k) \end{bmatrix}$$

1回目の  
実験データ
2回目の  
実験データ
r回目の  
実験データ

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \begin{bmatrix} y_1^{(1)}(k) & y_1^{(2)}(k) & \cdots & y_1^{(r)}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_p^{(1)}(k) & y_p^{(2)}(k) & \cdots & y_p^{(r)}(k) \end{bmatrix}$$

$k = 0, 1, \dots, N - 1$

# 提案法 (CDDS法) - 多入出力系

多入力多出力のシステムの場合

現時刻の  
推定出力

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \sum_{i=0}^k \tilde{\mathbf{y}}(k-i) \mathbf{v}(i)$$

$$\mathbf{v}(k) = \tilde{\mathbf{u}}(0)^{-1} \left( \hat{\mathbf{u}}(k) - \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{\mathbf{u}}(k-i) \mathbf{v}(i) \right)$$

実験データ

中間変数

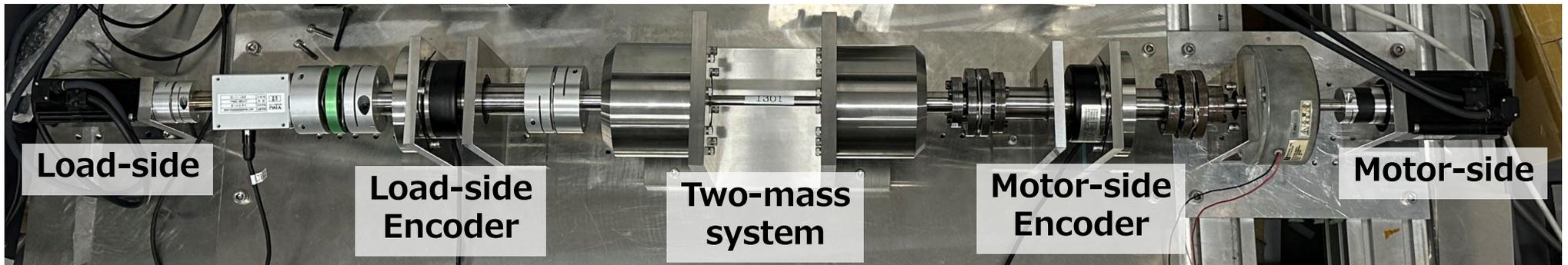
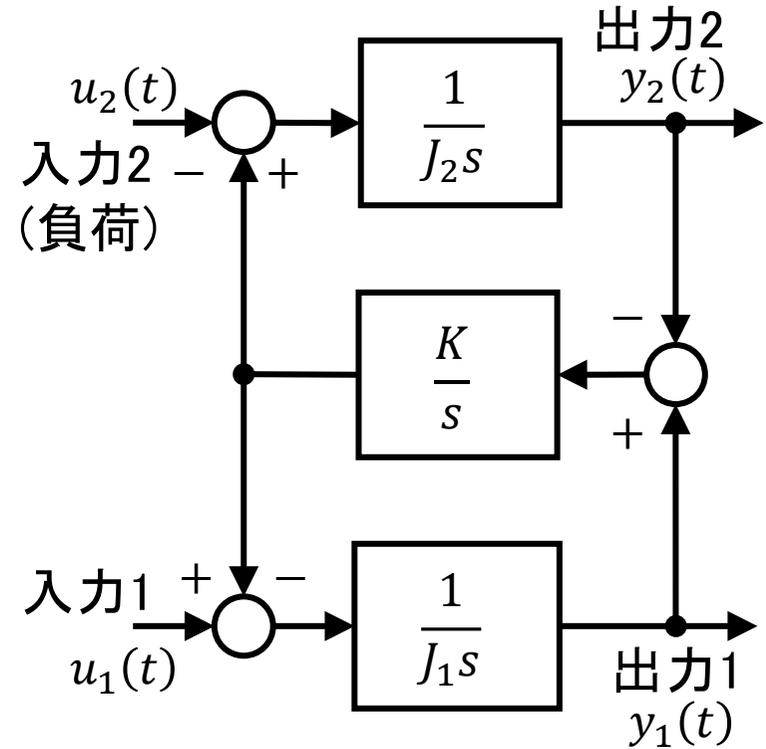
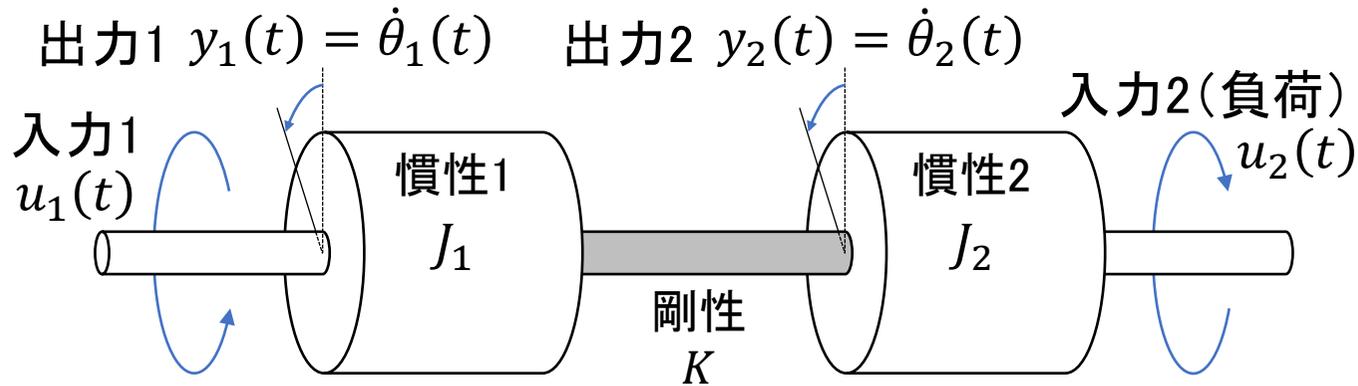
仮想入力

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

MIMOでも実装が容易！

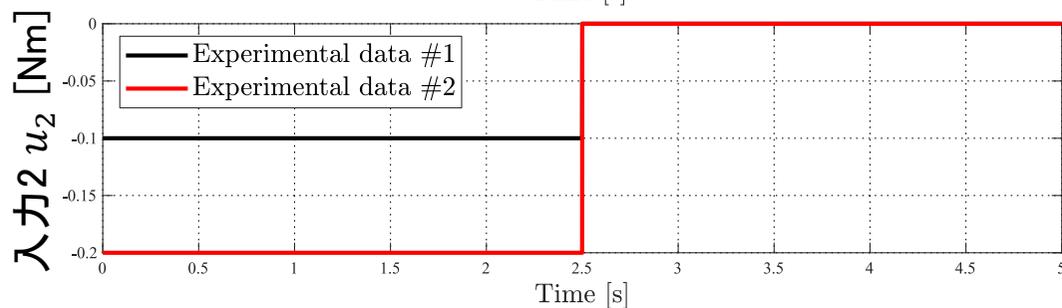
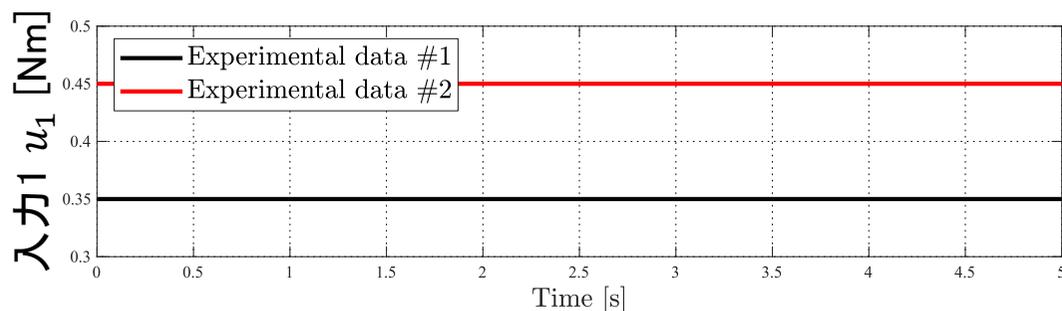
# 提案法 (CDDS法) - 多入出力系

適用例: 2慣性システム  
(2入力2出力)

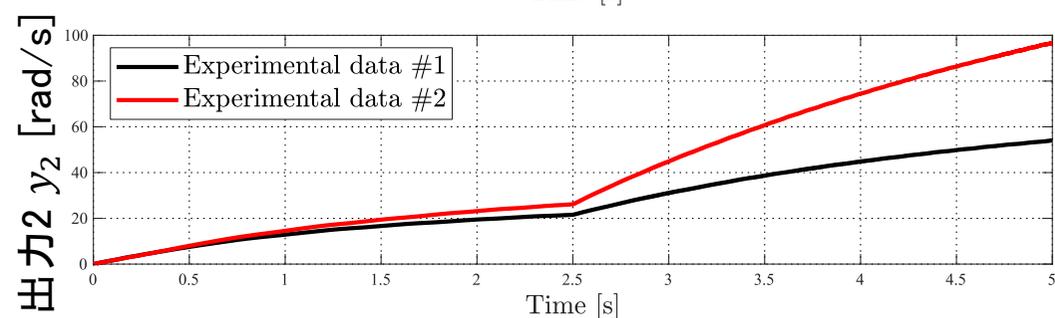
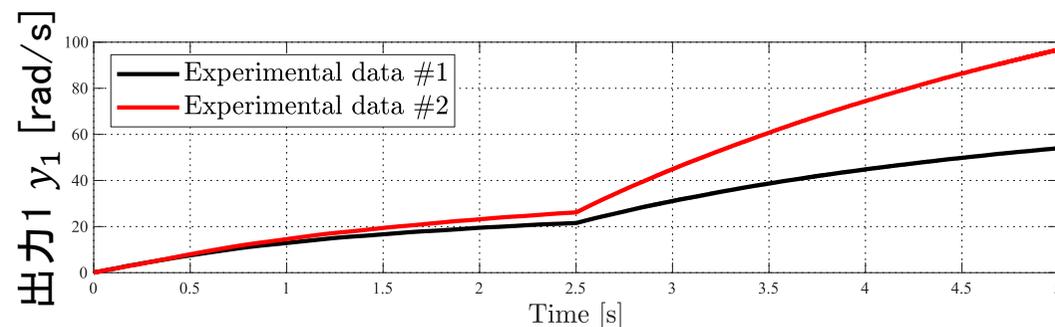


# 提案法(CDDS法) - 多入出力系

適用例: 2慣性システム(2入力2出力) - データ取得



実験データ(入力)

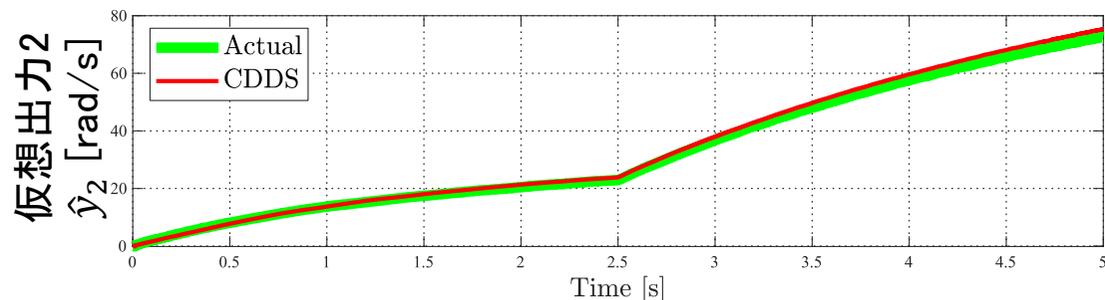
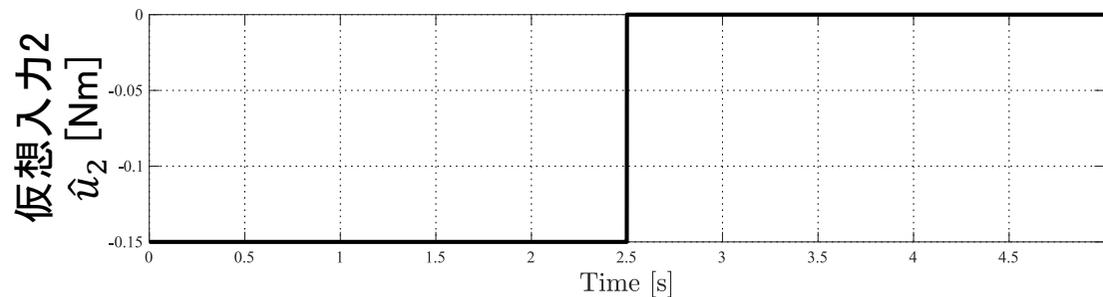
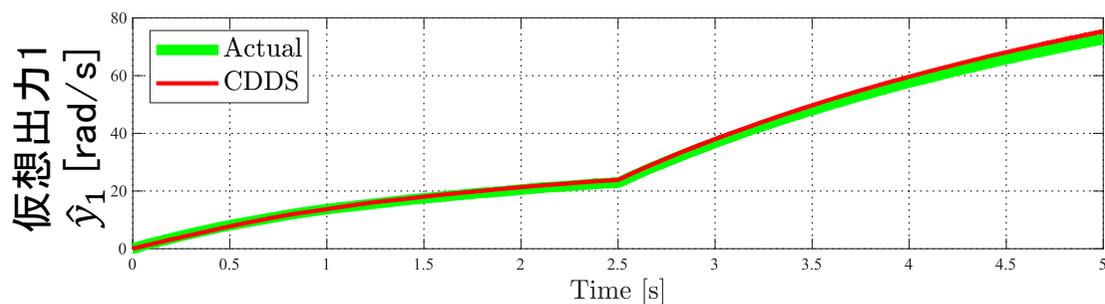
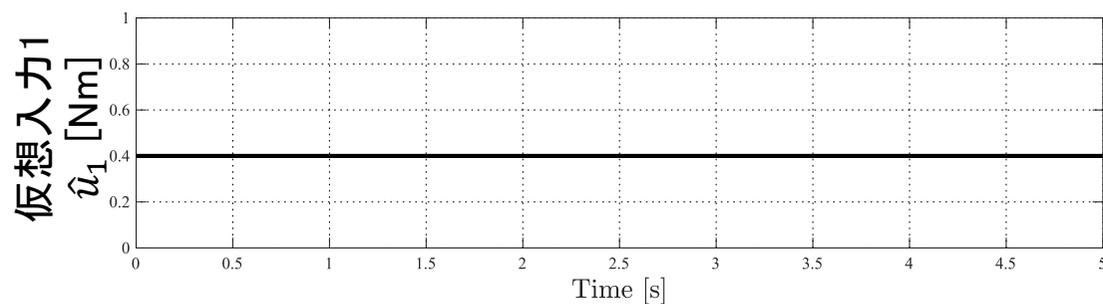


実験データ(出力)

実験によるデータ取得を2回実施

# 提案法 (CDDS法) - 多入出力系

適用例: 2慣性システム (2入力2出力) - 対象の挙動再現



仮想入力

推定出力と実出力 (比較用)

推定誤差は約5%以下  
高精度なデータ駆動型シミュレーションを実現

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- ・ 少数の入出力データから制御対象の挙動を精度よく計算機上で再現可能
- ・ 多入力・多出力(MIMO)の対象を扱うことが可能
- ・ アルゴリズムが単純で計算量が少なく、実装が容易
- ・ 従来、制約となっていた制御器の線形性は不要  
⇒ 制御と無関係に対象システムのシミュレーションが可能となり、汎用性が向上

## 想定される用途

- ・ 動的挙動を再現するデジタルツインをデータのみから構築、シミュレータ上でシステムの評価・調整・最適化
- ・ 膨大な試行が必要なロボット等の実世界システムの強化学習において、計算機上で高精度に試行が可能
- ・ 部品パラメータのばらつきに対して均一な性能保証を可能にする制御パラメータの自動調整
- ・ 保守点検時等の現場でのパラメータの再調整
- ・ 電気・機械システムから生化学プラントまで幅広い対象に適用可能（複雑でモデル構築が難しい対象に有効）

# 実用化に向けた課題

- ・ 現在、対象システムは線形システムに限定  
⇒ 非線形システムに適用できるように理論を拡張中
- ・ 推定精度の更なる向上

## 企業への期待

- ・ 様々な入出力データを提供いただくことにより、推定精度向上に向けた手法の改良が可能になる

以下のような企業との共同研究を希望

- ・ データを利活用したい企業
- ・ システムのパラメータ調整を効率化したい企業
- ・ ロボット等の実世界システムの機械学習の展開を考えている企業

## 企業への貢献、PRポイント

- ・ 入出力データセットを用意いただくだけで、簡易シミュレーションソフトを提供可能
- ・ シミュレータの開発コストの低減が可能
- ・ システムの評価・調整・最適化のコスト低減が可能
- ・ 現実とシミュレーションのギャップを解消可能
- ・ 本格導入にあたっての技術指導等

# 本技術に関する知的財産権

- ・ 発明の名称 : 推定システム、推定方法、プログラム
- ・ 出願番号 : 特願2023-218560
- ・ 出願人 : 横浜国立大学
- ・ 発明者 : 藤本康孝、亀谷直生

# 産学連携の経歴

- 直近5年(2019年度以降)  
企業との共同研究実績33件
- 2015年-2020年  
NEDO次世代AI・ロボット中核技術開発事業に採択

# お問い合わせ先

横浜国立大学

研究推進機構 産学官連携推進部門

産学官連携支援室

TEL : 045-339-4450

FAX : 045-339-3057

e-mail : [sangaku-cd@ynu.ac.jp](mailto:sangaku-cd@ynu.ac.jp)