

深層展開を用いた モデルベース制御系設計

小蔵 正輝

大阪大学
大学院情報科学研究科
バイオ情報工学専攻

電気通信普及財団研究調査助成「深層学習を用いた超高精度な行列因子分解」
阪大情報科学研究科スタートアッププログラム「深層展開によるモデルベース制御系設計:汎用性・有効性・使用性への挑戦」
JST CREST「CyPhAI: Formal Analysis and Design of AI-intensive Cyber-Physical Systems」
科学研究費基盤研究(A)「深層展開に基づく信号処理アルゴリズム構築論の深化と展開」

深層展開

高信頼制御通信研究会(RCC)

[[schedule](#)] [[select](#)]

専門委員長 林 和則 (阪市大)
 副委員長 東 俊一 (名大), 李 還幫 (NICT)
 幹事 石井 光治 (香川大), 林 直樹 (阪大)
 幹事補佐 加川 敏規 (NICT), 小蔵 正輝 (奈良先端大)

日時	2019年 1月25日(金) 13:30 - 21:00
議題	高信頼制御通信, 一般
会場名	電力中央研究所 大手町ビルディング 7階 733会議室
住所	〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1(大手町ビル7階、733会議室)

1月25日(金) 午後 イブニングセッション 18:00 - 21:00

(8)	18:00-21:00	<p>講師:名古屋工業大学 和田山 正 教授</p> <p>タイトル:無線物理層におけるデータ駆動アプローチ---深層学習への期待と展望---</p> <p>講演概要: 近年、深層学習技術の無線物理層への応用が注目されている。国際会議における 関連ワークショップ・セッションが増加傾向にあるなど、当該分野への研究者の興味の 高まりが感じられる。本講演では、通信系の研究を行っている研究者ならびに 学生を対象に、無線物理層における深層学習技術の有用性と可能性について論じる。深層学習に関する基礎的事項を概観するとともに、関連研究事例(自己符号化器に基づくアプローチ・MIMO検出など)の詳細を紹介する。講演の一部については、Google colaboratory上で実行できるコードを公開する予定である。</p> <p>参加費: 会員(5,000円)、非会員(15,000円)</p> <p>参加申し込みフォーム: https://goo.gl/forms/plwdPFhvRCpANAP53</p>
-----	-------------	---

既知の反復型型アルゴリズムに学習可能パラメータを埋め込み深層学習技術を利用してパラメータを学習

A recent survey: A. Balatsoukas-Stimming and C. Studer, arXiv: 1906.05774, 2019.

50

和田山, 非凸最適化に基づくアルゴリズムデザインと深層展開, 2019

- アルゴリズムの収束を加速
- 無線通信, 信号処理, 信号復元

■ 通常の勾配法

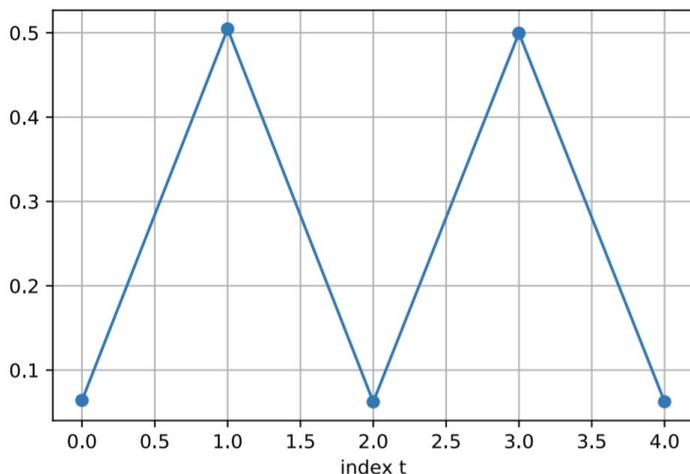
$$\mathbf{s}_{t+1} = \mathbf{s}_t - \gamma \nabla f(\mathbf{s}_t)$$

■ 学習型勾配法

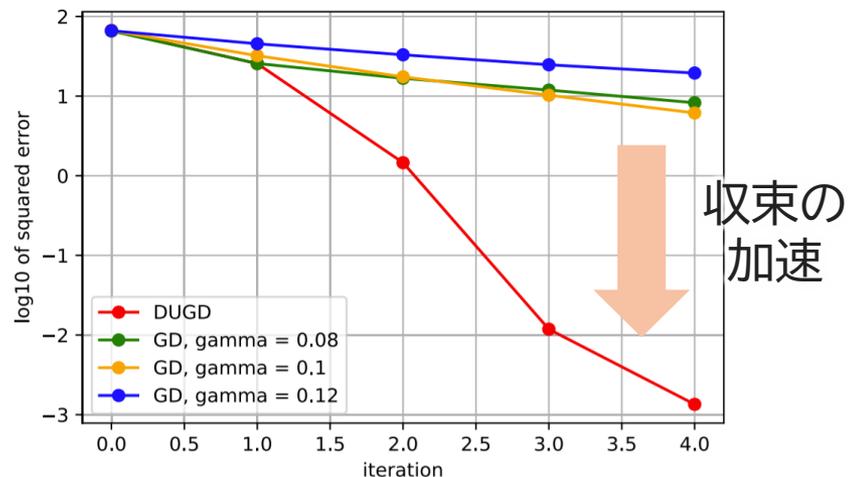
$$\mathbf{s}_{t+1} := \mathbf{s}_t - \gamma_t \nabla f(\mathbf{s}_t)$$

■ 実験

- 目的関数: $f(x_1, x_2) = x_1^2 + 8x_2^2$,
- 初期値: 各要素 $[-10, 10]$ 上の一様分布



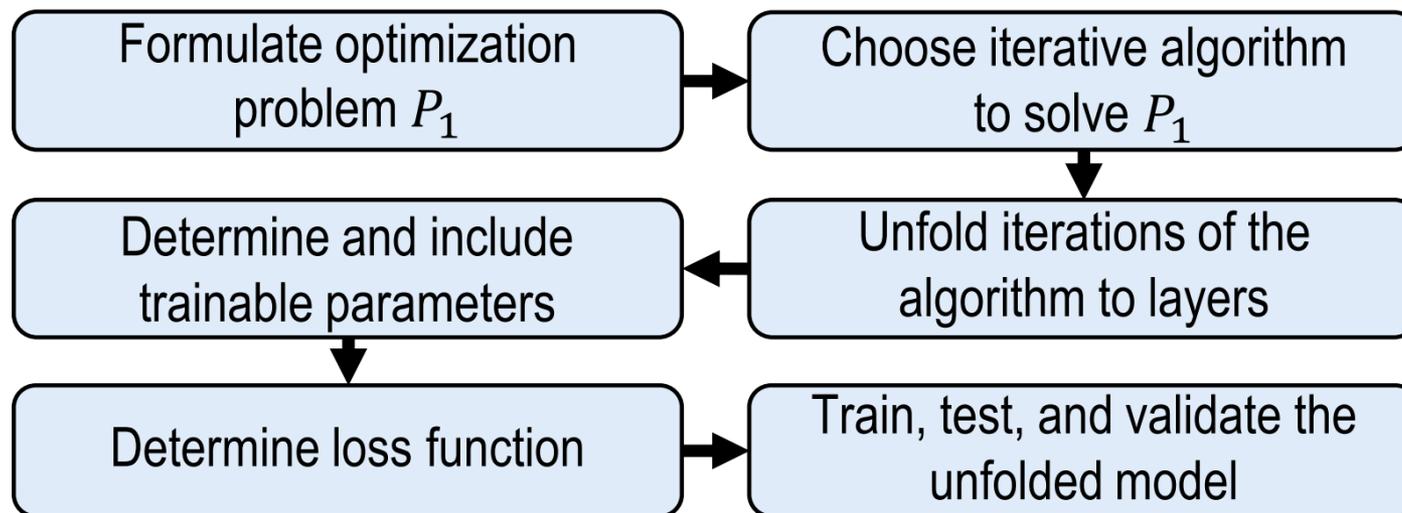
学習されたパラメータ γ_t



$\|\mathbf{s}_t\|^2$ (解の正確さ)

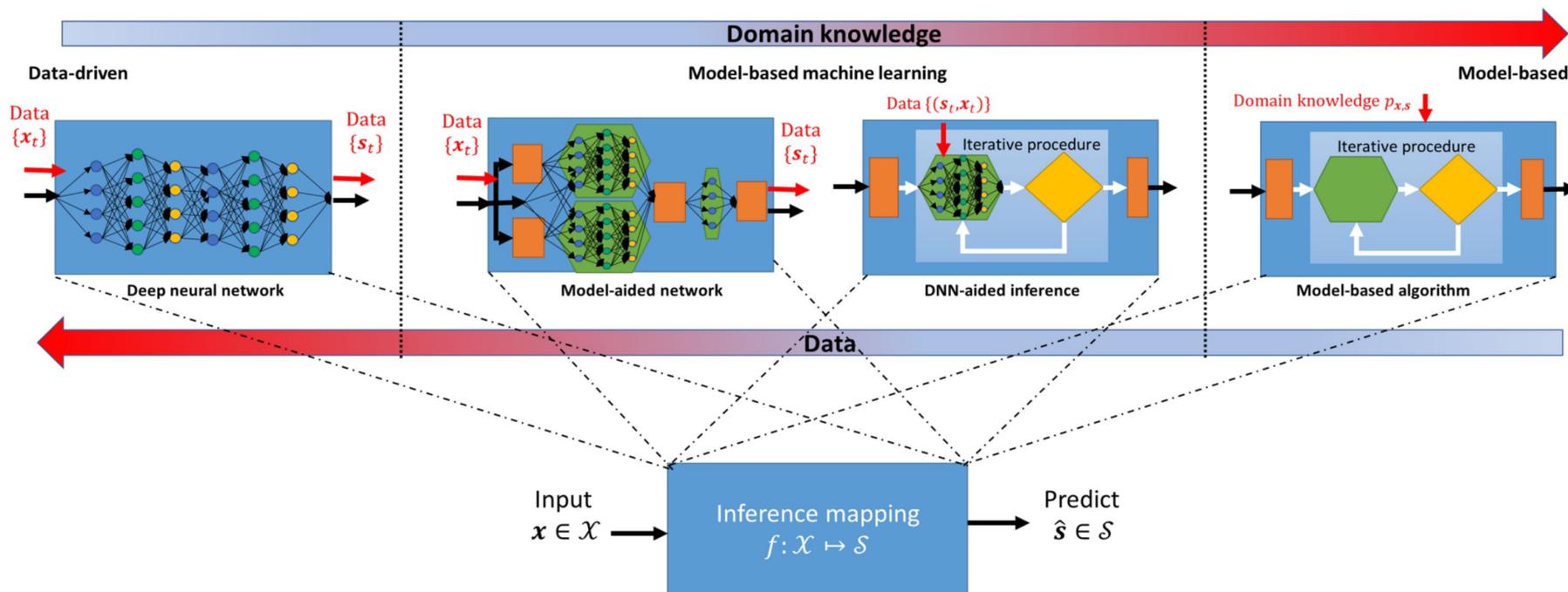
深層展開を用いた信号処理アルゴリズムの開発

- スパース信号復元
- 過負荷 IoT システムにおける信号検出
- ...

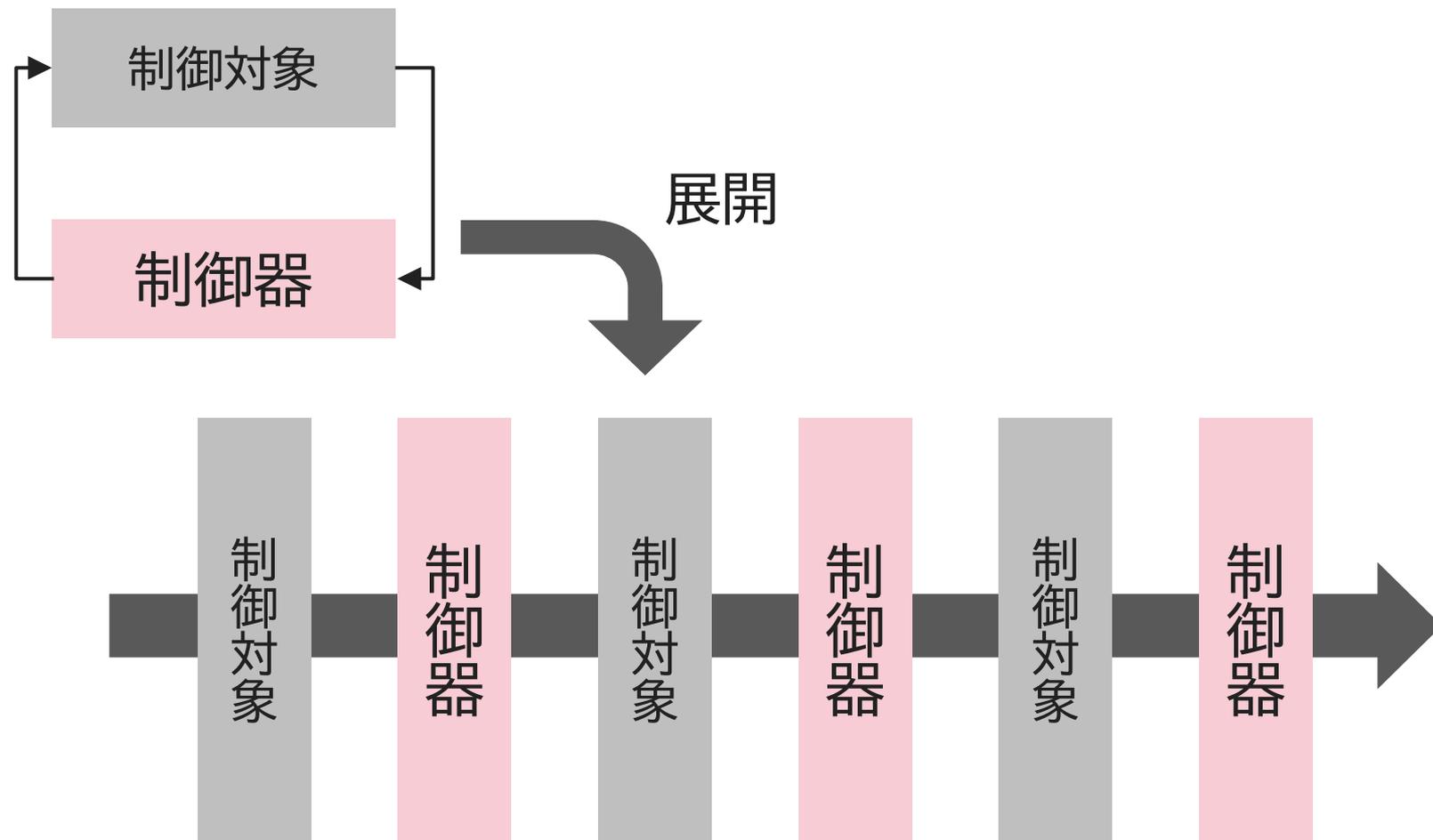


Jagannath, Jagannath, Melodia, "Redefining wireless communication for 6G: signal processing meets deep learning with deep unfolding," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2021.

深層ニューラルネットワーク × 数理モデル



Shlezinger, Whang, Eldar, Dimakis, "Model-based deep learning," 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2012.08405>.



深層展開を通じた学習 → 制御器の設計

平均合意制御



Kishida, Ogura, Yoshida and Wadayama, "Deep-learning based average consensus," *Information-Based Induction Science Workshop*, 2019

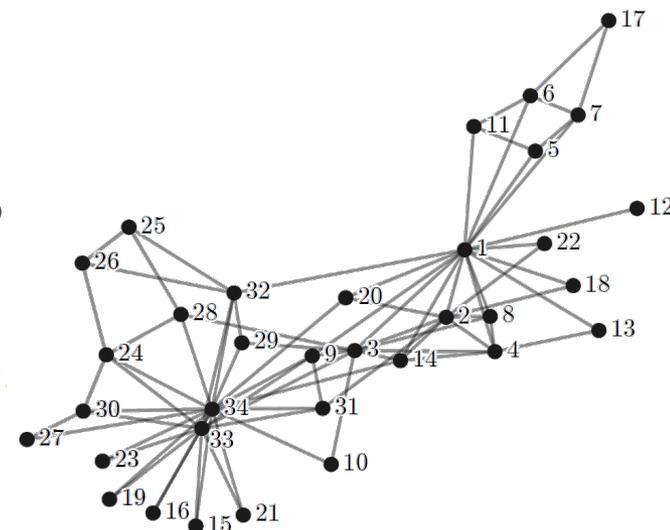
Kishida*, Ogura*, Yoshida, and Wadayama (*equal contribution), "Deep learning-based average consensus," *IEEE Access*, 2020.

マルチエージェントシステムの制御

- グラフ上の頂点に「エージェント」が存在
- エージェント i は実数の「状態変数」 x_i を有する
- 線形の更新則

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} w_{ij}(k)(x_j(k) - x_i(k))$$

- 目標: 漸近的な合意 $\lim_{k \rightarrow \infty} (x_i(k) - x_j(k)) = 0$



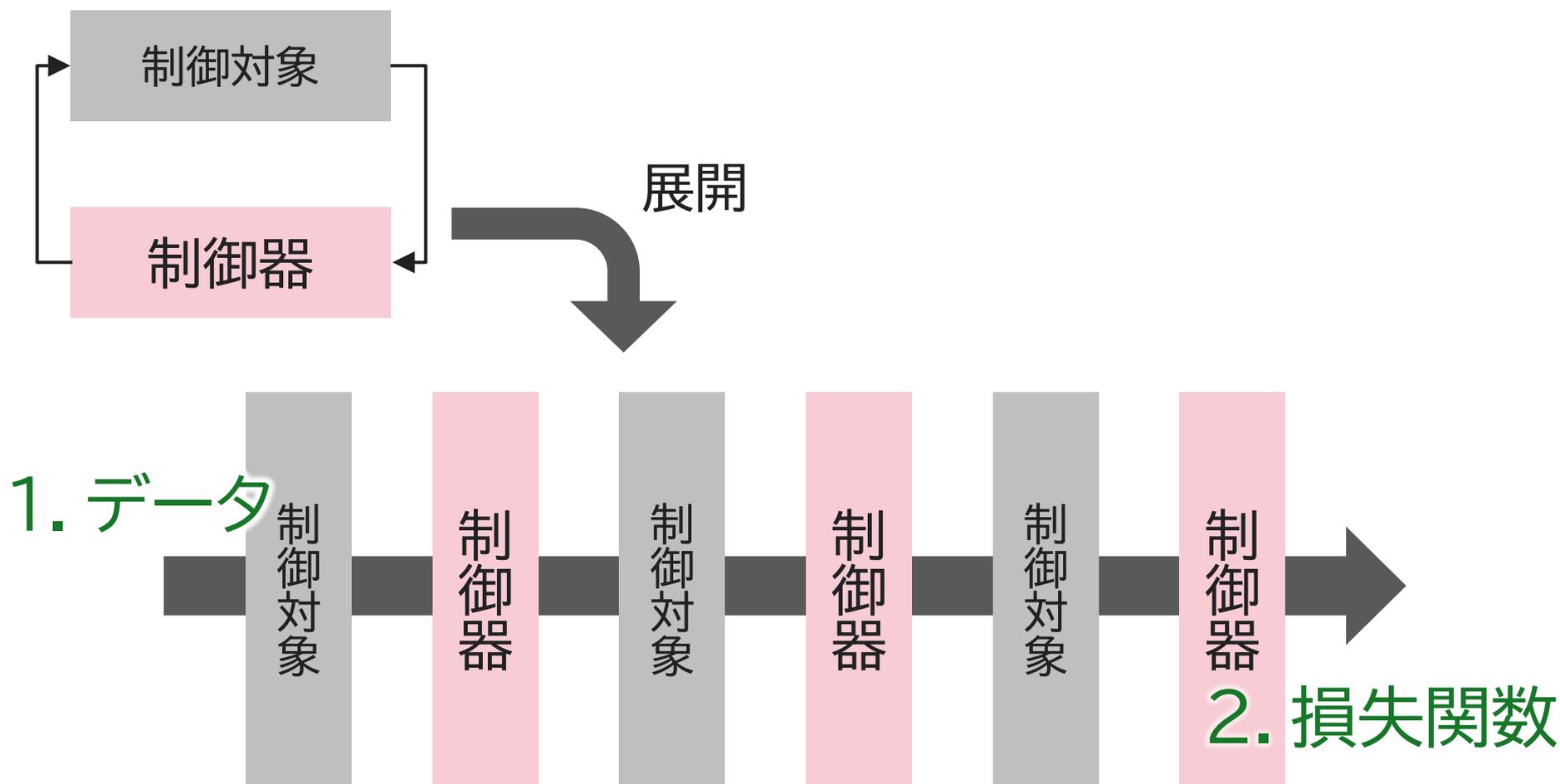
無限の時間がある場合

- 凸最適化による定数重みの最適化 [Xiao and Boyd, 2004, *Syst. Cont. Lett.*]

N (=頂点数)の時間がある場合

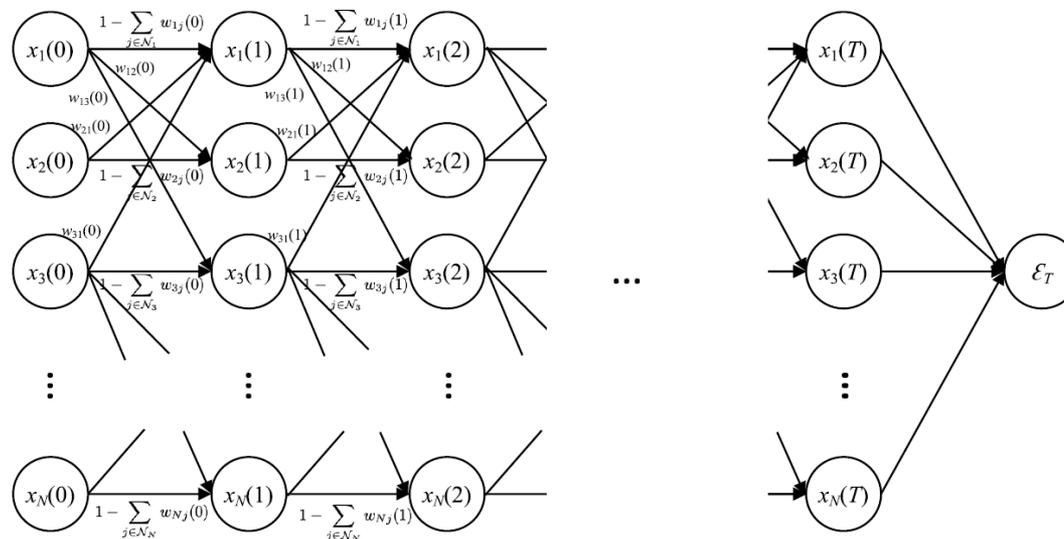
- 有限時間での合意達成 [Safavi and Khan, 2015, *IEEE SPL*]

問: より短い時間で合意したい場合は?



深層展開を通じた学習 → 制御器の設計

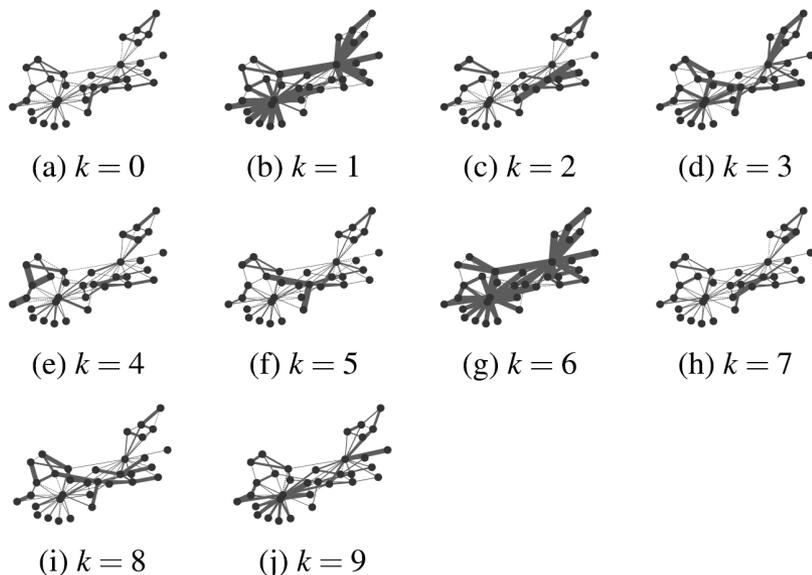
- データ: **様々な初期値のバリエーション**を確率分布に従って生成
 - どのような初期値に対しても合意を達成したいので
- 損失関数: ある時刻 T における合意誤差
 - 合意誤差を小さくしたいので
- 模式図



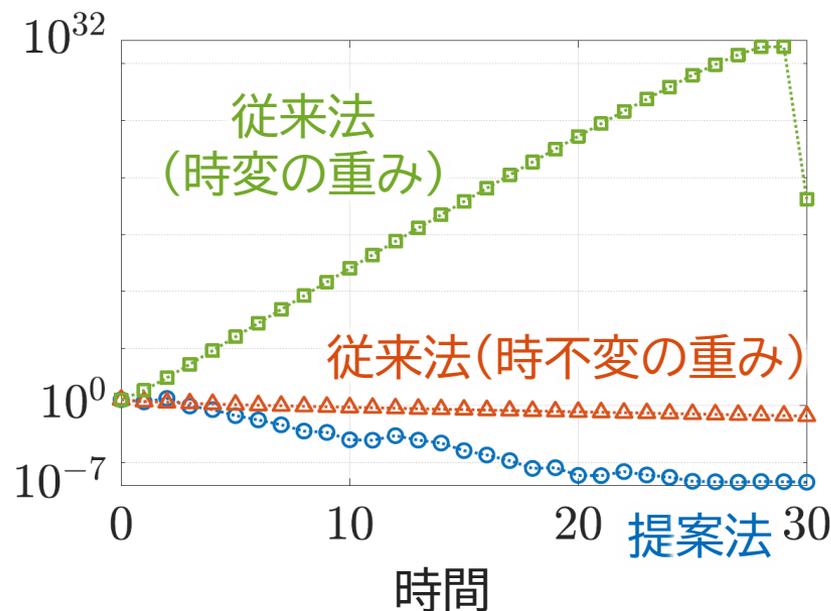
■ 比較

- 有限時間合意を達成する**時変の重み** [Safavi and Khan, 2015, *IEEE SPL*]
- 合意への収束レートを最大化する**時不変の重み** [Xiao and Boyd, 2004, *Syst. Cont. Lett.*]
- **提案法**. $T = 10$ における合意誤差を最小とする重みを周期的に時間方向へ展開

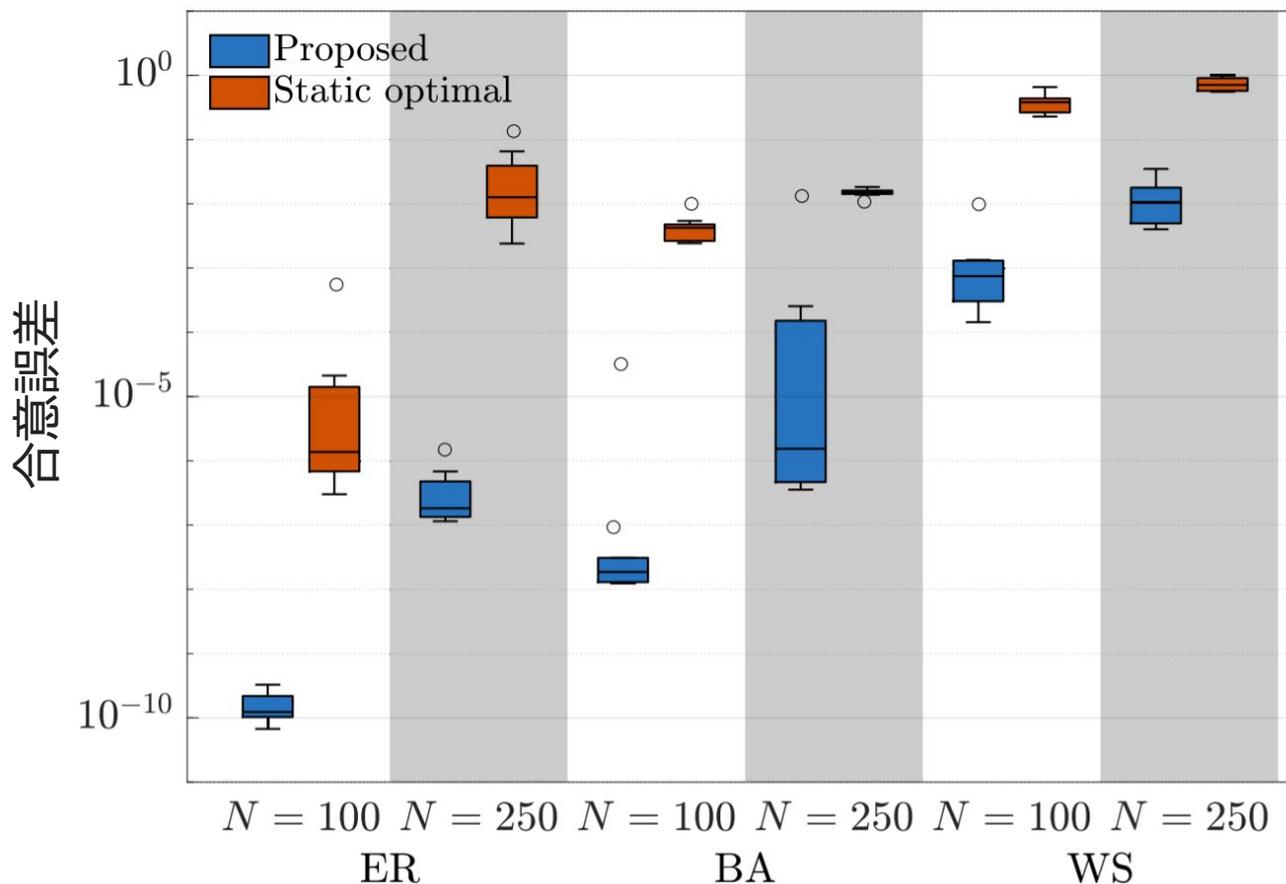
得られた辺の重み



平均の合意誤差の時間変化



■ $T = 10$ における合意誤差の分布



モデル予測制御



岸田, 小蔵, “時相深層展開の提案とその非線形制御への適用”, 第24回情報論的学習理論ワークショップ, 2021

Kishida* and Ogura*, “Temporal deep unfolding for constrained nonlinear stochastic optimal controls,” *IET Control Theory & Applications*, 2022. (*equal contribution)

■ モデル予測制御

- 理論的な保証を伴わない制御器の型
- 解析的な取り扱いの難しい制御対象の場合に活躍

■ アルゴリズム

- 制御を考える有限の時間区間(horizon)を設定
- この horizon 上に限定して制御問題を解く
- そして得られた制御入力列の最初の値を制御対象に印加

■ 例: 将棋

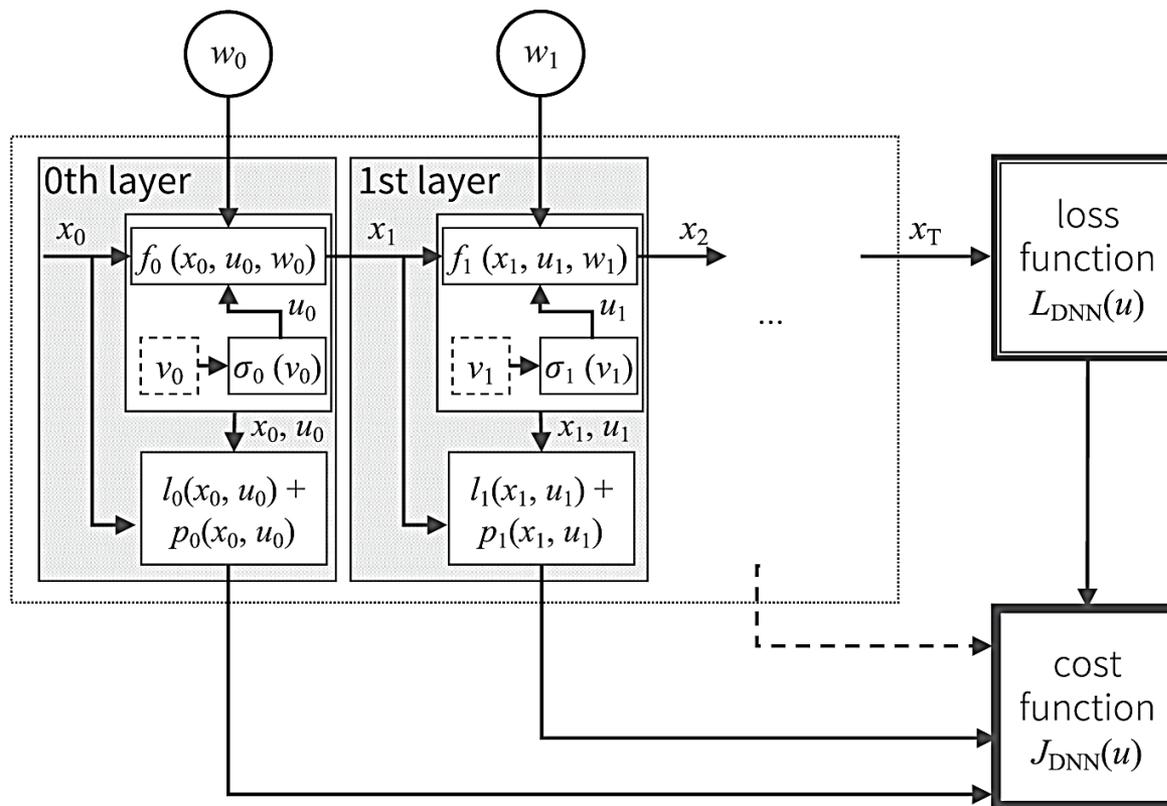
- 目的は最終的な勝利
- 一手一手(=制御入力)は horizon における状況を改善するように指される

■ 研究課題

- 確率的な外乱信号が存在する非線形な制御対象
- 有効なモデル予測制御手法が存在しない



- データ = 外乱信号 (確率分布を用いて生成可能)
- 損失関数 = モデル予測制御における目的関数
- アーキテクチャ



■ 完全混合槽型反応器モデル

$$\dot{C}_A = \frac{q}{V}(C_{Af} - C_A) - k_0 \exp\left(-\frac{E}{R\tau}\right) C_A + w_1,$$

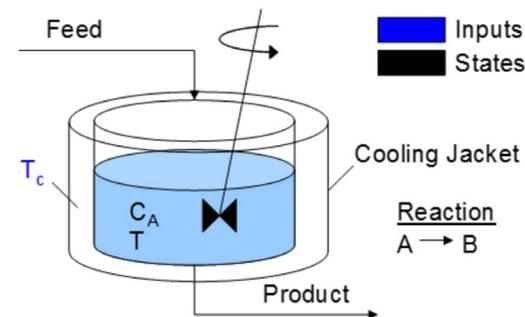
$$\dot{\tau} = \frac{q}{V}(\tau_f - \tau) - \frac{\Delta H}{\rho C_p} k_0 \exp\left(-\frac{E}{R\tau}\right) C_A$$

$$+ \frac{UA}{V\rho C_p}(\tau_c - \tau) + w_2,$$

- 制御入力 τ_c
- 高い非線形性をもつ動的システムとして知られる
- 制御入力: 温度

■ 三つの初期値から始めたシミュレーション

■ 制御入力に対する上下界制約

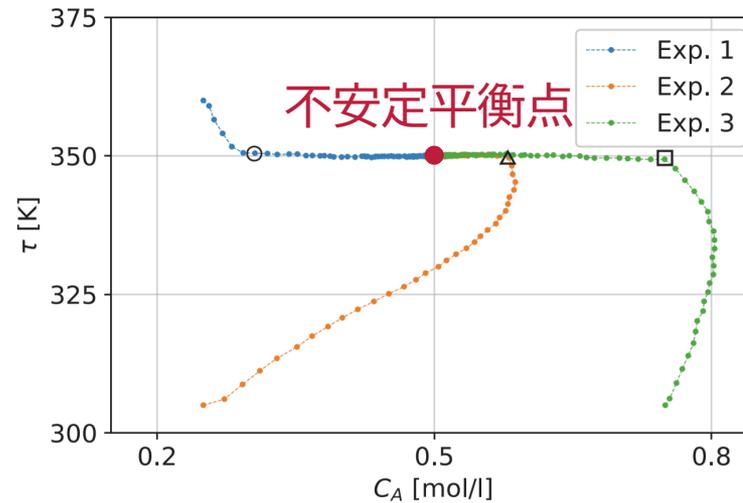


模式図

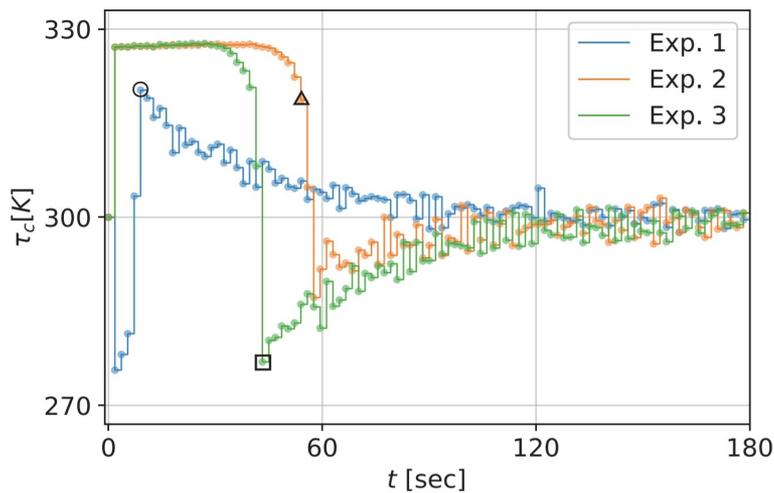
<https://chemical-engineering-review.com/cstr/>

■ 不安定平衡点への誘導制御

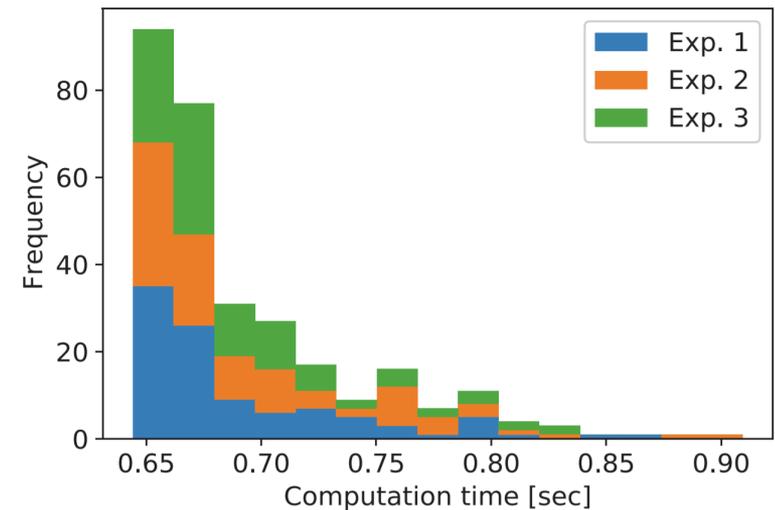
制御対象の状態推移



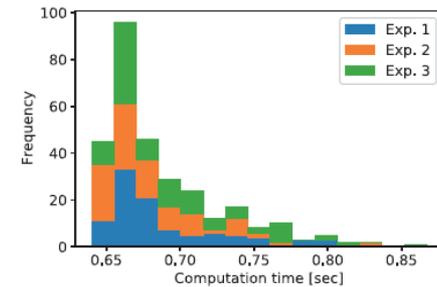
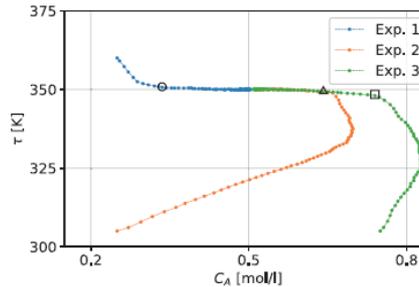
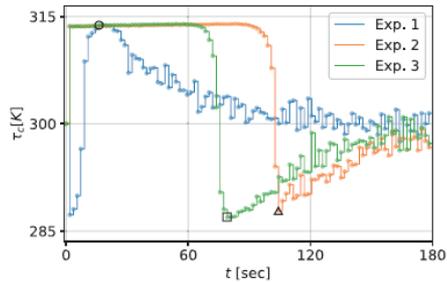
制御入力の変化



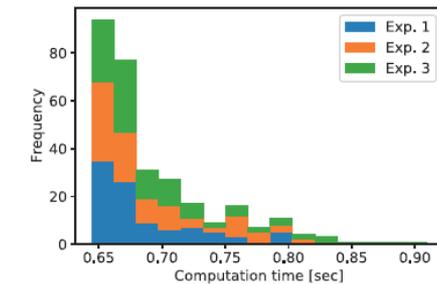
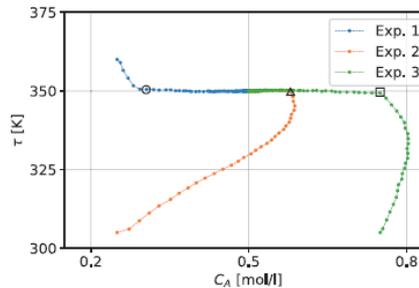
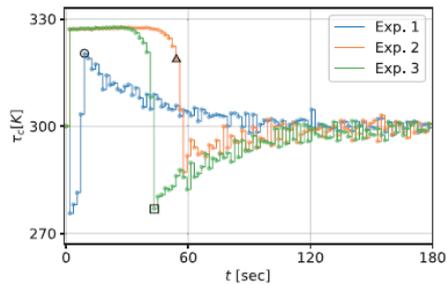
制御入力の計算時間の分布



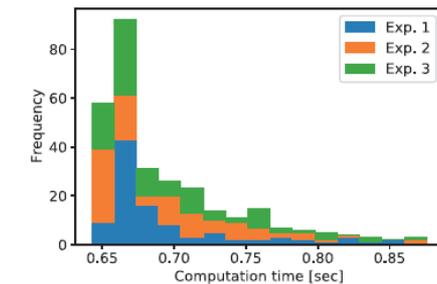
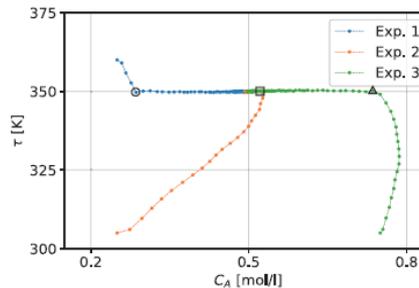
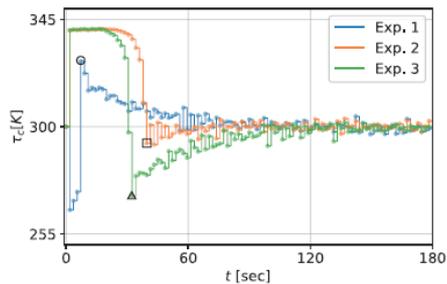
不安定平衡点への誘導制御



(a) $(\underline{u}, \bar{u}) = (285, 315)$



(b) $(\underline{u}, \bar{u}) = (270, 330)$



(c) $(\underline{u}, \bar{u}) = (255, 345)$

連続時間むだ時間系の 静的出力フィードバック安定化



小林, 小蔵, 杉本, “深層学習技術を用いたむだ時間システムの安定化の有効性評価,” 信学技報, vol. 120, no. 292, RCC2020-16, pp. 31-34, 2020.

M. Ogura, K. Kobayashi, and K. Sugimoto, “Static output feedback synthesis of time-delay linear systems via deep unfolding,” Submitted for publication.

むだ時間系

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-h), \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

静的出力フィードバック

$$u(t) = Ky(t)$$

安定化問題

- A, B, C, h が与えられたとする. 閉ループを安定化するゲイン K を求めよ.
- 従来法: 逐次線形行列不等式 [Barreau et al., ECC2018]
 - 「有限次元」のリアプノフ関数に基づく線形行列不等式による安定性解析
 - ゲイン設計のための双線形行列不等式
 - 逐次線形行列不等式への緩和

アルゴリズム

- $T > 0$ と自然数 N をとる
- $\|x(T/N)\|$ を損失関数として学習 (Neural Delay Differential Equation)
 - 線形行列不等式 [Barreau et al., ECC2018] を用いて閉ループの安定性を確認
 - 安定であると判定されれば終了
 - そうでなければ次ステップへ
- $\|x(2T/N)\|$ を損失関数として学習
 - ...
- $\|x(3T/N)\|$ を損失関数として学習
 - ...
- ...
- $\|x(T)\|$ を損失関数として学習

ランダムに開ループを100個生成

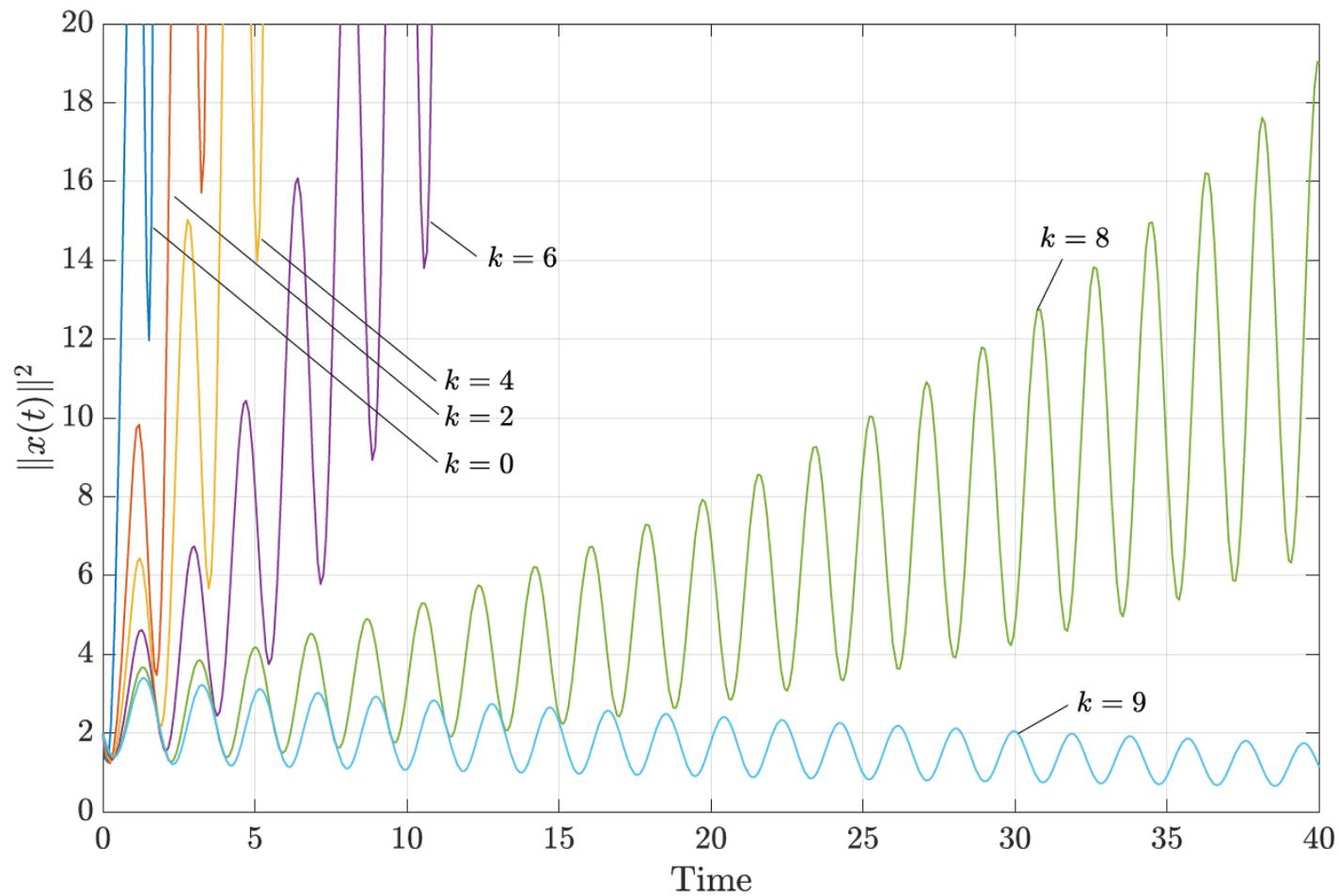
- 可安定性の保証は無し
- シナリオ1: $(n, m, p, h) = (4, 1, 2, 0.1)$
- シナリオ2: $(n, m, p, h) = (4, 2, 1, 0.1)$

比較対象

- BMI: 逐次線形行列不等式に緩和される前の**双線形**行列不等式 [Barreau et al., ECC2018] を解く
- ILMI: **逐次線形**行列不等式 [Barreau et al., ECC2018] を解く

結果

	Scenario 1		Scenario 2	
	# stabilized systems	Execution time [sec]	# stabilized systems	Execution time [sec]
Proposed	33	31,641	20	41,228
BMI	21	10,374	13	31,060
ILMI	0	32	0	32



深層展開に基づくモデルベース制御系設計

■ 手法としての汎用性

- 平均合意制御における辺の重み調整
- 完全混合槽型反応器モデルのモデル予測制御
- 連続時間むだ時間系の安定化 [*IFAC TDS*, under review]
- マルコフジャンプシステムのフィードバック安定化 [*IEEE TAC*, under review]
- マルチリンク系のモデル予測制御 [A君卒論]

今後の課題

- 実応用を視野に入れた有効性の検証
- ライブラリの作成

深層展開をお試し下さい

和田山, 高邊, 深層展開に基づく信号処理アルゴリズムの設計, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 2020, 14 巻, 1 号, p. 60-72

科学研究費基盤研究(A)「深層展開に基づく信号処理アルゴリズム構築論の深化と展開」