Reduced Order Model Predictive Control of a Fish Schooling Model

Masaki Ogura and Naoki Wakamiya

Osaka University, Japan

背景：群れ行動の理解と制御

pixabay.com

pixabay.com

pixabay.com

pixabay.com

定置網漁業における魚種選択性

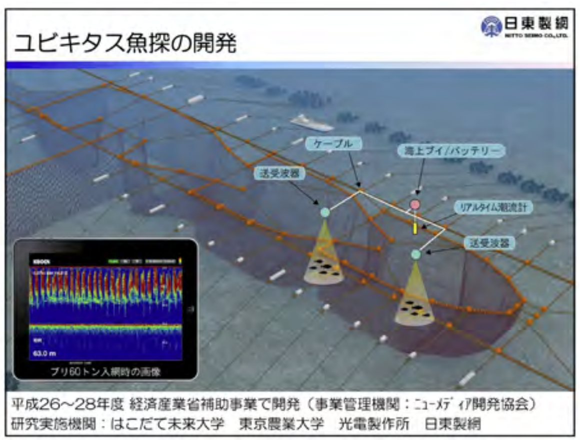
- 日本における沿岸漁業漁獲量の約4割
- 低い魚種の選択性
- 積極的な資源管理が困難なため, 改正漁業法への対応が困難

> 新漁業法においては、資源評価に基づき、持続的に生産可能な最大の漁獲量（MSY）の達成を目標とし、数量管理を基本とする新たな資源管理システムを導入することとしています。

水産庁 https://www.jfa.maff.go.jp/j/press/kanri/200930.html

資源管理性を高めるための試み

リモートセンシング



定置網の技術研究会, 水産庁
https://www.jfa.maff.go.jp/j/study/kenkyusidoka/teichi.html

光刺激による行動変容

Southworth et al., “Artificial light improves escapement of fish from a trawl net,” *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2020

発表のねらい

魚群モデルの誘導は制御工学において未開拓の問題(？)

目的: モデル予測制御による魚群モデルの誘導

- Gautrais ら（Annales Zoologici Fennici, 2008）の魚群モデル
- 縮約した予測モデルの提案

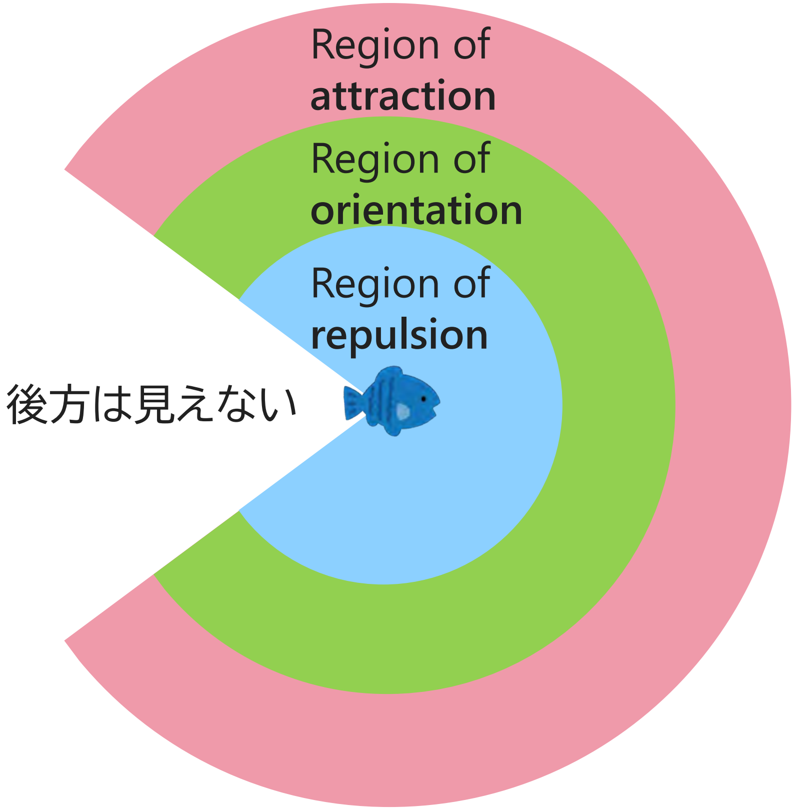
魚群の動的モデル: 概要

3 次元空間 $\mathbb{R}^3$ におけるマルチエージェントシステム

- 各個体は一定の速度 v で移動

向きの更新

- 視界内にいる個体の位置と向きに依存
- 三種類の領域
  - Repulsion, orientation, attraction

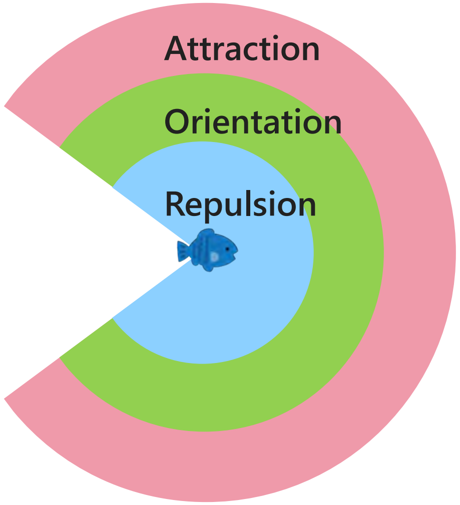


Gautrais et al., “Key behavioural factors in a self-organised fish school model,” *Annales Zoologici Fennici*, 2008

魚群の動的モデル: 詳細

- 離散時間モデル
  - 連続時間のダイナミクスを周期 $\tau > 0$ で離散化
  - 離散時刻 k における魚 i の位置を $x_i(k)$, 向き(単位ベクトル)を $V_i(k)$ とする
- 三種類の向き
  - Repulsion: $R_i(k) = -\sum_{j \in \mathcal{N}_{r,i}(k)} \phi(x_j(k) - x_i(k))$
  - Orientation: $O_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{N}_{o,i}(k)} V_j(k)$
  - Attraction: $A_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{N}_{a,i}(k)} \phi(x_j(k) - x_i(k))$

ϕ は正規化作用素



- 理想の向き

$$D_i(k) = \begin{cases} R_i(k), & \text{if } Z_{r,i}(k) \neq \emptyset, \\ O_i(k) + \eta A_i(k) & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- 向きの更新

$$V_i(k+1) = \phi\ [\text{ランダムな回転行列}]\ D_i(k)$$

提案するモデルと制御問題

制御モデル

- 理想の向きに対して加法的な入力を加えられる状況を仮定

$$D_i(k) = \begin{cases} R_i(k), & \text{if } Z_{r,i}(k) \neq \emptyset, \\ O_i(k) + \eta A_i(k) + \xi_i w_i(k), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

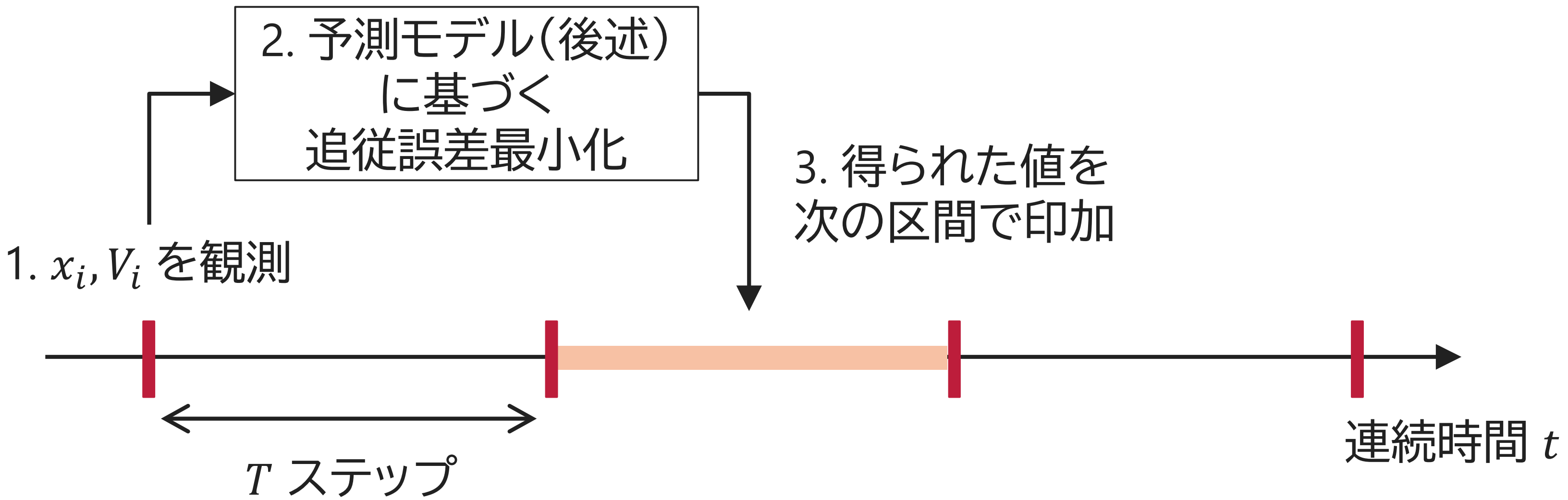
感度パラメータ

単位ベクトル

  - 主に光による刺激を想定

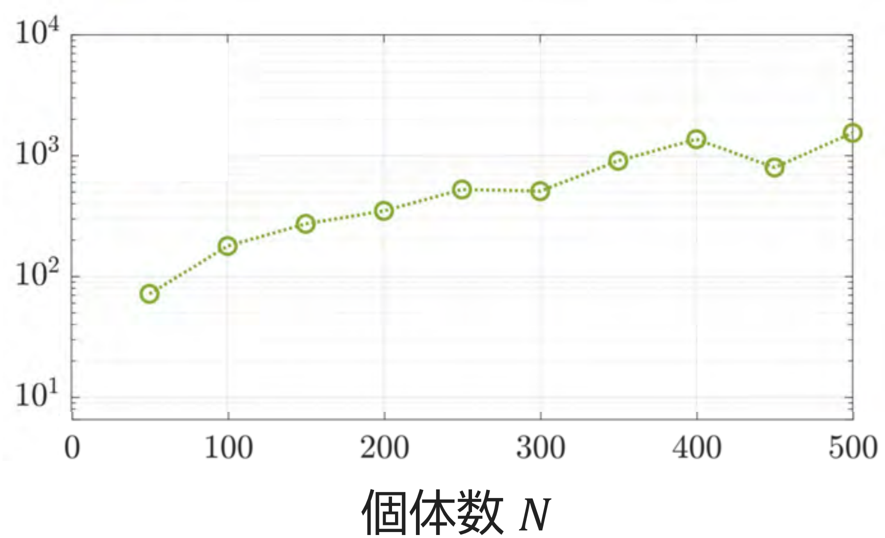
制御問題

- むだ時間つきの状態フィードバック制御による追従



計算時間の問題

- 単純な予測モデル
  - 元のダイナミクスからランダムな回転を除いたもの
  - $6N$ 次元の状態空間（位置と向きがそれぞれ3次元）
  - 心配事：大規模群の場合に計算時間は？
- 例
  - 計測周期=2秒，予測区間=8秒，離散化周期=0.1秒，100秒間にわたって制御
  - 素朴な最適化ルーチンを使用（fmincon, MATLAB）
  - 制御入力の計算に要した時間の平均

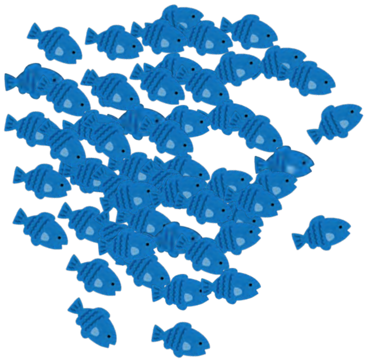


計測周期内に
制御入力の計算が
終わっていない

縮約に基づく予測モデル

着想

群れ



仮想的に一匹に縮約
魚 i の重み $\alpha_i \geq 0$

位置 $\langle x \rangle_\alpha = \Sigma_{i=1}^{N} \alpha_i x_i$
向き $\langle V \rangle_\alpha = \Sigma_{i=1}^{N} \alpha_i V_i$

問

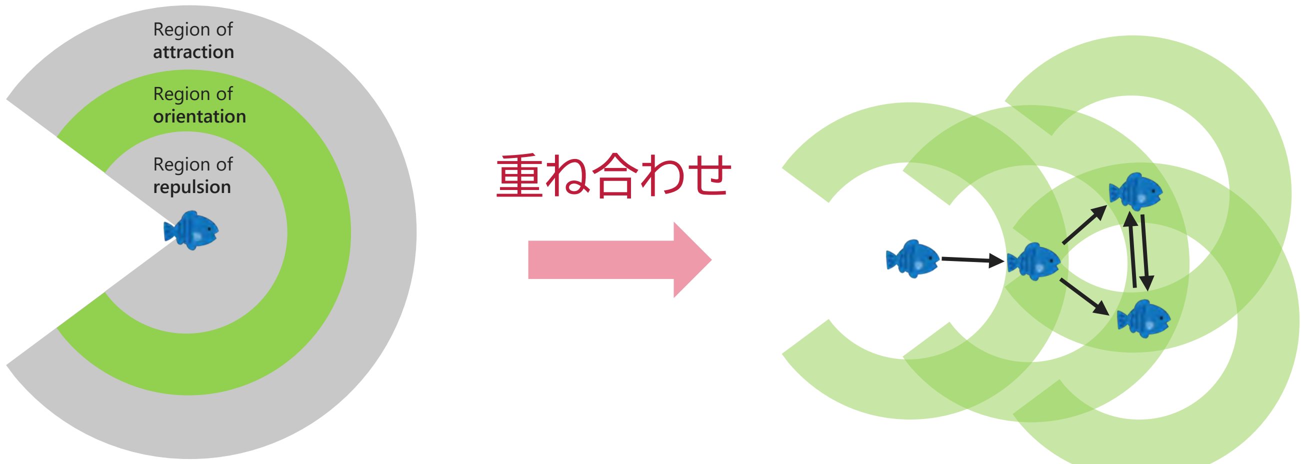
1. $\langle V \rangle_\alpha$ の予測モデルはどうあるべきか？
2. 重み α_i はどのように選ぶべきか？

結果1: 縮約に基づく予測モデル

予測モデル

$$\hat{V}(k+1) = \phi\left(\hat{V}(k) + A(k) + w(k)\right)$$

- $A(k) \ = \ \eta \, \Sigma_{i=1}^{N} \, \alpha_i / n_i(k) \, A_i(k)$
- $w(k) \ = \Sigma_{i=1}^{N} \, \alpha_i / n_i(k) \, \xi_i(k) w_i(k)$
- $n_i(k)$ = region of orientations から構成されるグラフにおける出次数

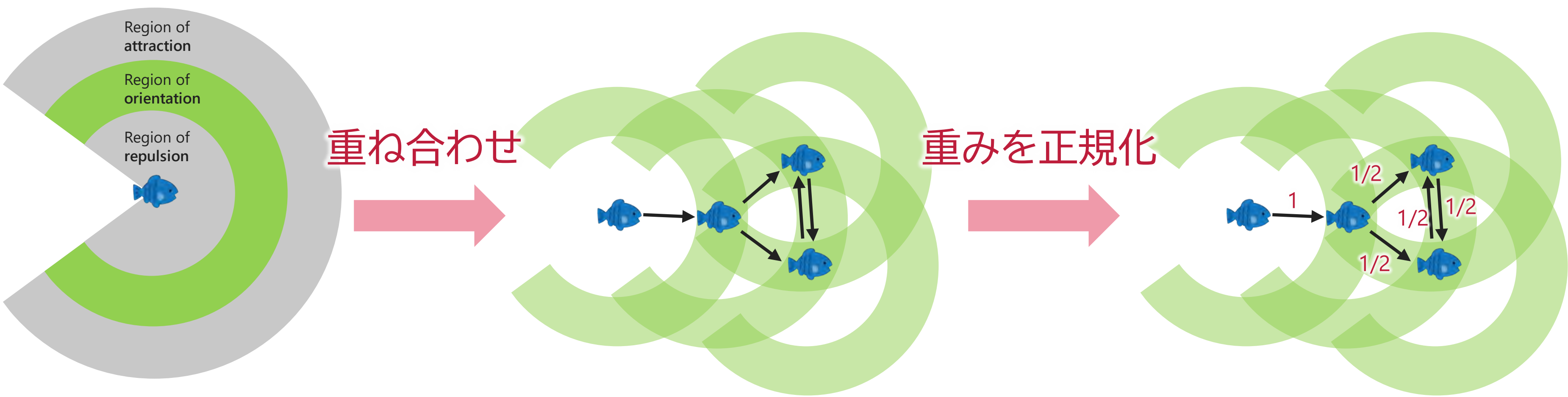


Ogura, Wakamiya, Submitted to CDC2021

結果2：誤差解析

予測モデルの予測誤差 $\|\hat{V}(k+1) - \langle V(k+1) \rangle_\alpha\|$

- 固定された重み α に対する予測誤差の上界
- 上界を小さくするような重みの選び方
  - Region of orientations から構成されるグラフの normalized eigenvector centrality
  - Normalization は正規化作用素 ϕ に由来



Ogura, Wakamiya, Submitted to CDC2021

シミュレーション

3つの予測モデル

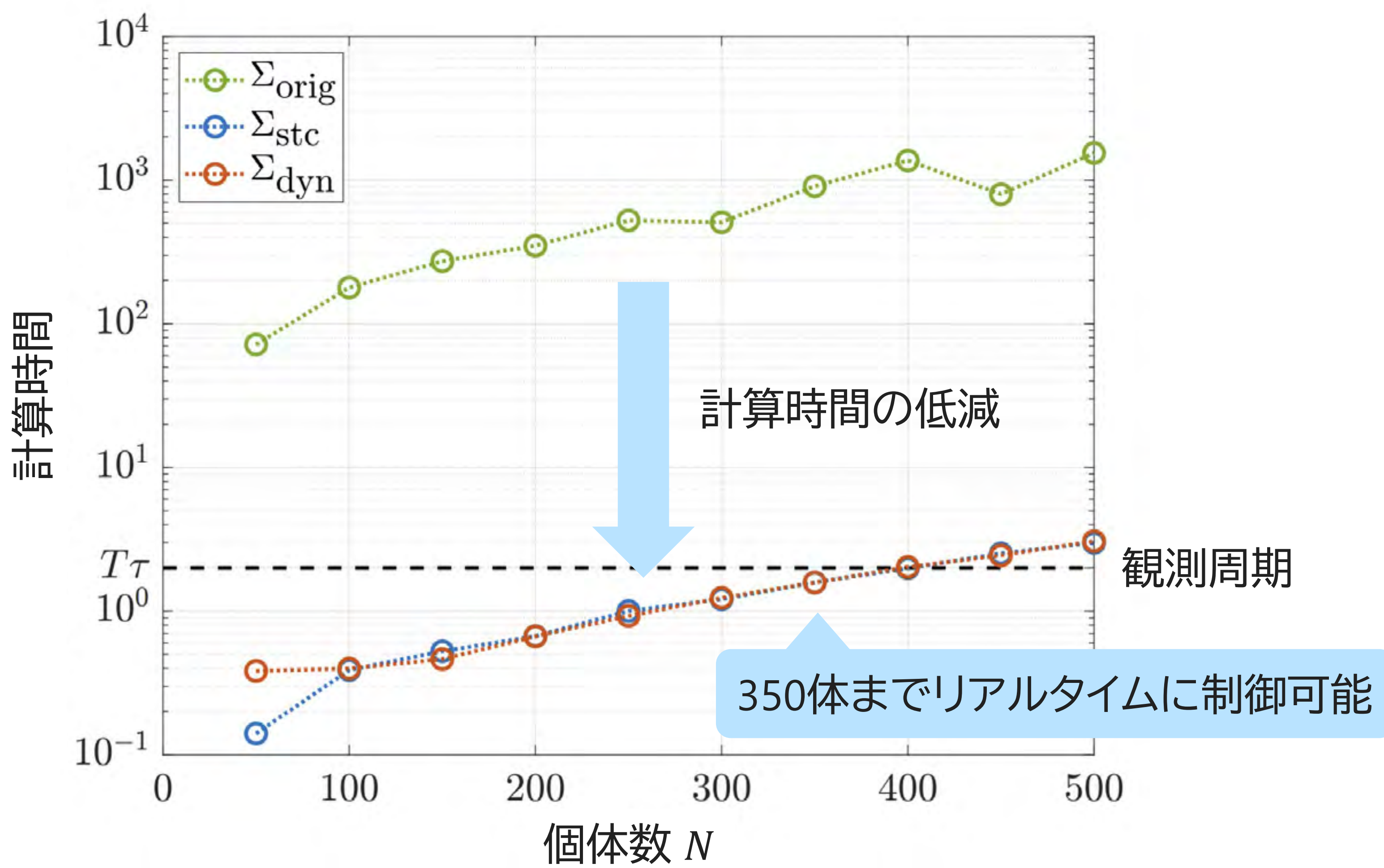
- Σ_{orig}：元々のモデル. ただしランダムな回転を与えない
- Σ_{stc} ：平等な重み $\alpha_i = 1/N$ に基づく縮約モデル
- Σ_{dyn}：Normalized eigenvector centrality で重みを定める縮約モデル

設定

- 魚のパラメータ：Gautrais (2008) に基づき決定
- Reference set：半径 r の球面
- 制御入力 $w_1, \dots, w_N$ は共通
- 感度 $\xi_1, \dots, \xi_N$ も共通
- 初期時刻において魚群の重心は reference set 上に配置
- 向きはランダム

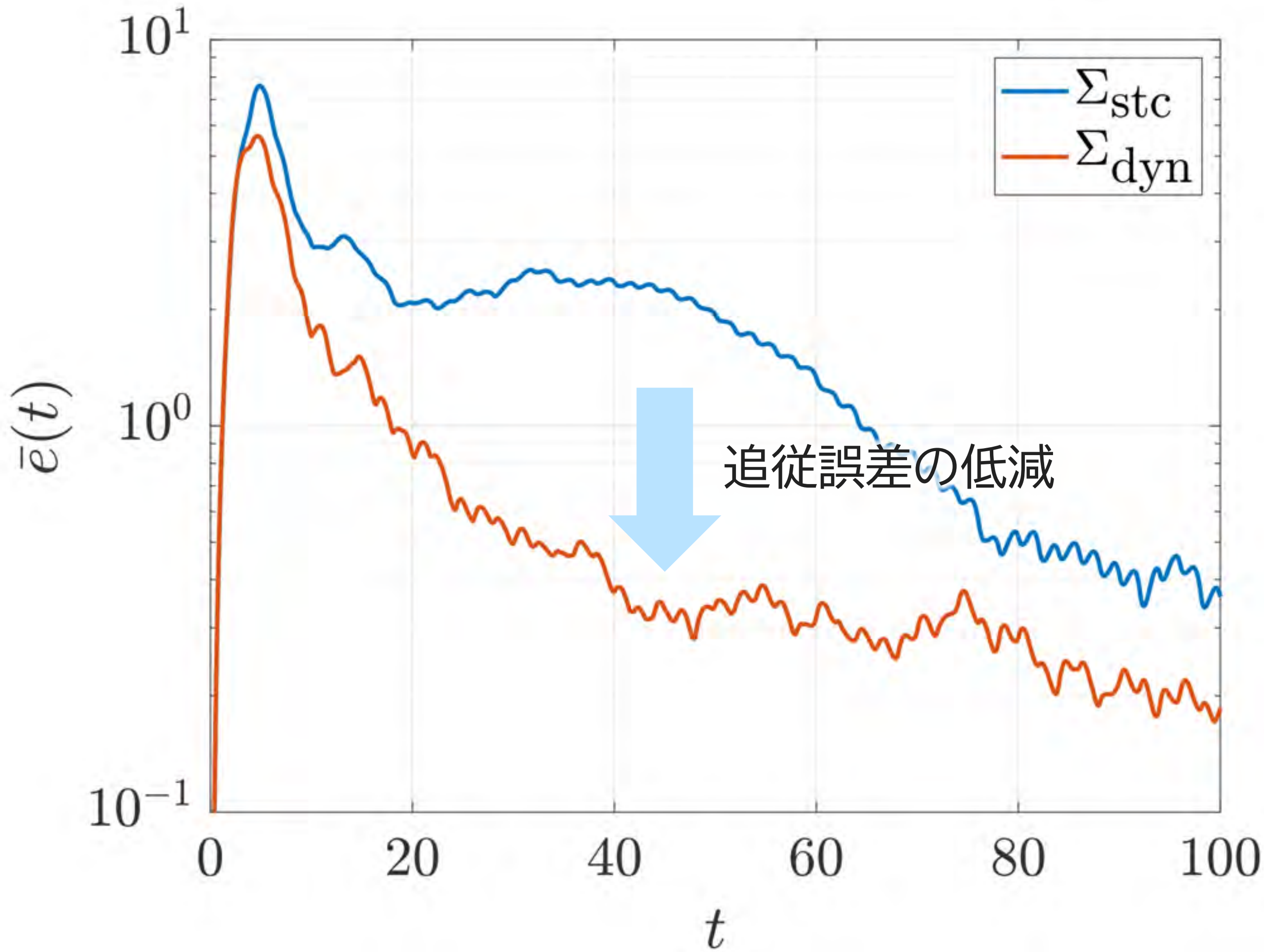
シミュレーション

- 制御入力の計算に要する時間の比較

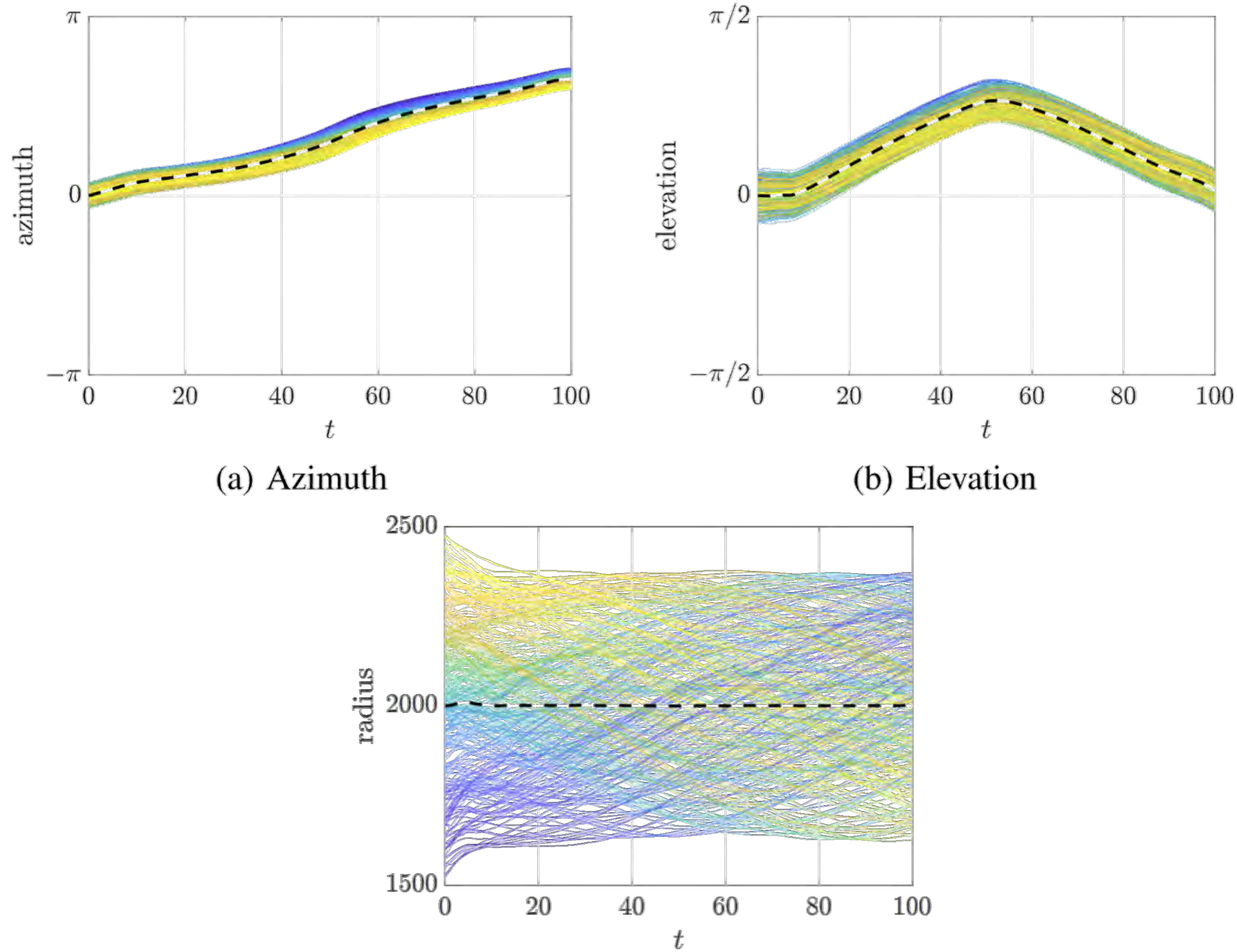


シミュレーション

誤差の比較：100回の試行における平均. $N = 300, r = 2000$.



予測モデル Σ_{dyn} を用いた追従制御の様子



(a) Azimuth

(b) Elevation

(c) Radius

まとめ

魚群のモデル予測制御

- Gautrais ら（Annales Zoologici Fennici, 2008）の魚群モデル
  - Repulsion, orientation, attraction
- 「理想の向き」への加法的な入力を想定
  - 現実の魚での実現は挑戦的な課題
- 縮約した予測モデルの提案
  - 大規模群の場合に顕著となる計算時間的な困難を克服
- 縮約で用いる重みに関する知見
  - Normalized eigenvector centrality の有効性を理論的に示唆し, かつ数値的に確認