



東北大学

System Robotics Laboratory  
Department of Robotics  
Graduate School of Engineering  
Tohoku University  
大学院 工学研究科  
ロボティクス専攻  
小菅・衣川研究室／荒井研究室

## 超低消費エネルギー自律移動型 環境モニタリングシステム

東北大学大学院工学研究科ロボティクス専攻  
荒井翔悟

本発表には、日本大学工学部遠藤央先生、東北大学流体科学研究所三坂孝志先生との共同研究の内容を含みます

データ同化研究会

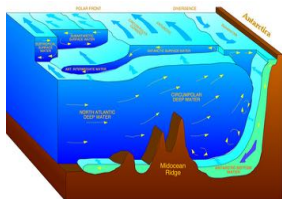
© System Robotics Laboratory

### 水環境モニタリング

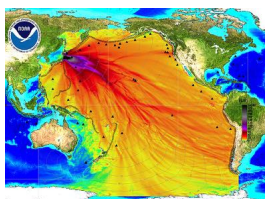


東北大学

- 水循環メカニズムの解明
- 水質汚染予測
- 構造物の建設
- CO2貯留
- 放射性廃棄物処分



[http://www.learner.org/courses/envsci/visual/img\\_lrg/cold\\_water.jpg](http://www.learner.org/courses/envsci/visual/img_lrg/cold_water.jpg)  
As of 2014 June 16th



<http://fukushimaupdate.com/wpcontent/uploads/2013/04/noawater.jpg>  
As of 2014 June 16th



[http://s3.ravenelbridge.net/larger/jul\\_04\\_east\\_pier\\_construction.jpg](http://s3.ravenelbridge.net/larger/jul_04_east_pier_construction.jpg)  
As of 2014 June 16th

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

### アウトライン



東北大学

#### ◆ 水環境モニタリングシステム

- 背景
- 水環境モニタリング装置分類
- 研究目的
- システム
- 制御則
- 流れ場推定

#### ◆ 超低消費エネルギー自律移動型環境モニタリングシステム

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

### 水質モニタリング装置分類



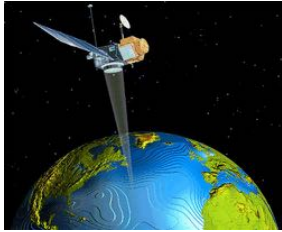
東北大学

- ◆ 人工衛星
- ◆ 高周波レーダ
- ◆ 非自走式センサバイ
- ◆ 自走式センサバイ

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## 水質モニタリング装置分類



<http://www.kidsgeo.com/geography-for-kids/0035-remote-sensing.php>



<http://www.neuflixoo.es/prod/codcar-oceansensors/sistemas-gadar-hf/sistemas-violancia-rio-30828-377294.html>



<http://www.101-spain.com/?cat=65>



<http://float.berkeley.edu/project/experiments/2012-may-walnut/boat-walnut-grove-may-09-2012-part-3>



<http://criepi.denken.or.jp/result/pub/annual/2008/08katsudou34.pdf>

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## 目的



### ◆水環境を長期間モニタリング可能な自律移動型センサ群の開発

- 発電
- 低エネルギー制御 (流れを利用)
- 流速場の推定

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## システム構成要素



### ■ GPS



[http://img.dxcn.com/productimages/sku\\_194466\\_5.jpg](http://img.dxcn.com/productimages/sku_194466_5.jpg)  
As of 2014 June 16th

### ■ IMU



<http://www.designworldonline.com/uploads/Imagegallery/6DoF-IMU-from-SensorDynamics.jpg>  
As of 2014 June 16th

### ■ Communication unit



### ■ Microcomputer



[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Raspberry\\_Pi\\_-\\_Model\\_A.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Raspberry_Pi_-_Model_A.jpg)  
As of 2014 June 16th

### ■ Battery with solar cell



<http://www.sunstore.co.uk/images/P/30wSemiPortable.jpg>  
As of 2014 June 16th

### ■ Actuators and screw

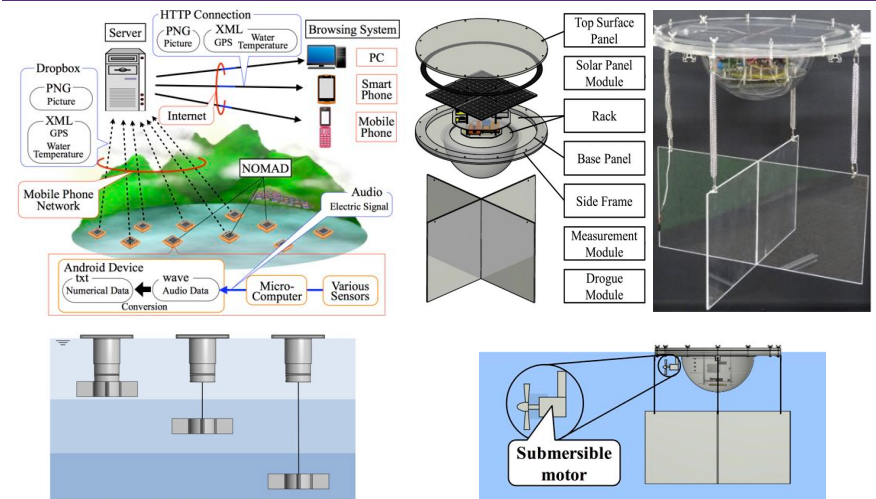


[http://float.berkeley.edu/fsn/?q=webfm\\_send/75](http://float.berkeley.edu/fsn/?q=webfm_send/75)  
As of 2014 June 16th

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

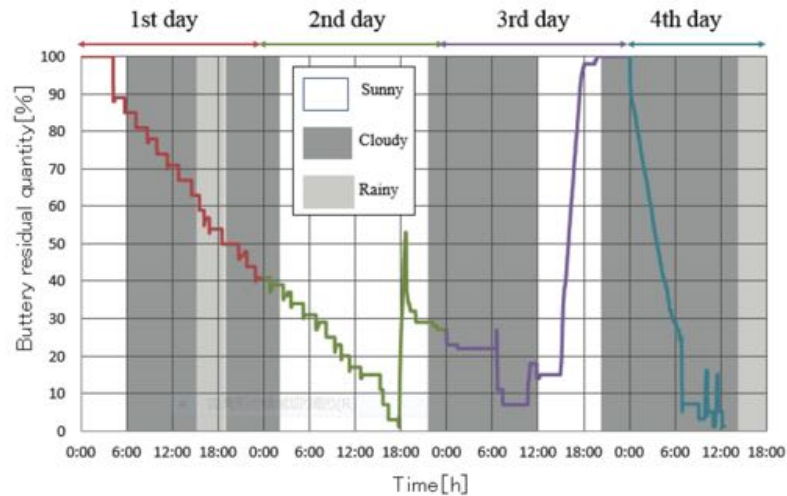
## NOMAD



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## NOMAD: 消費電力と発電量



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## 問題設定

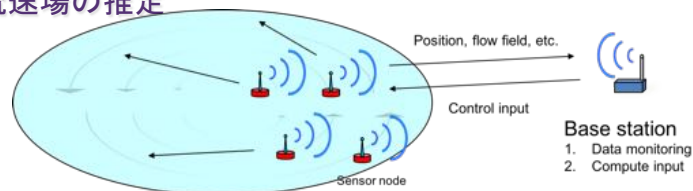


想定

- ◆集中制御
- ◆流速場は未知かつ定常
- ◆センサ通過点の流速を計測

目的

1. 低エネルギー制御
2. 流速場の推定



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## アウトライン



### ◆水環境モニタリングシステム

- 背景
- 水環境モニタリング装置分類
- 研究目的
- システム
- 制御則
- 流れ場推定

### ◆超低消費エネルギー自律移動型環境モニタリングシステム

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## モデル化: センサの運動方程式



### ◆センサ 加速度 推力 外力

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (u_x + w_x)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} (u_y + w_y)$$

### ◆水中から受ける力 流速

$$w = f(\dot{x}, \dot{y}, v_{fluid})$$

$$v_{fluid} = g(x, y) : \text{定常流を仮定}$$

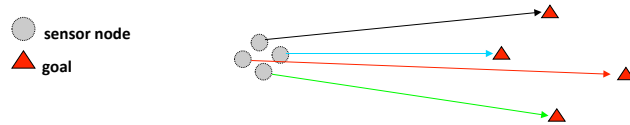
データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

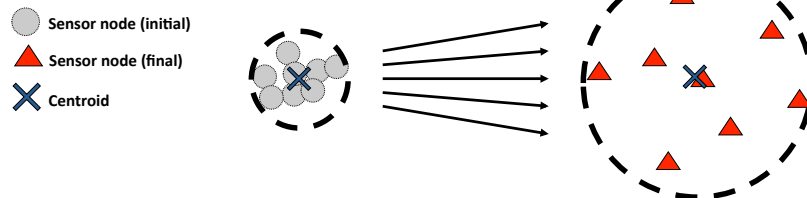
## 提案制御則概要: 目標の与え方 1



個々のセンサの目標位置を与えるのではなく、



グループとしての目標位置と分散を目標にする

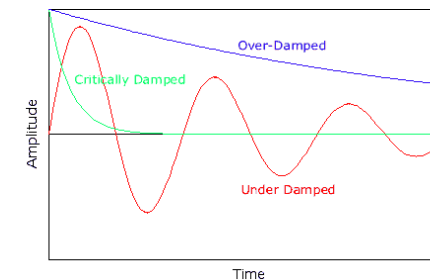


## 提案制御則概要: 目標の与え方 2



1. グループの目標平均位置と位置分散を設定
2. 目標偏差の時間変化を2階微分方程式として設定 (=各時刻での目標を決める)

$$\ddot{e} + c\dot{e} + ke = f$$



## 提案制御則概要 3



1. グループの目標平均位置と位置分散を設定
2. 目標偏差の時間変化を2階微分方程式として設定 (=各時刻での目標を決める)

$$\ddot{e} + c\dot{e} + ke = f$$

3. 次の時刻の制御入力はどう決まるのか？

- グループの次時刻の平均位置と位置分散を、次時刻の目標と一致させる入力の中で、グループのエネルギー消費量を最小とするように入力が決められる

$$A(x)(u + w) = b(x, X_r) + \delta$$

## 提案制御則



### ◆ 目標偏差

$$\ddot{e} + c\dot{e} + ke = f$$

### ◆ 制御則

$$A(x)(u + w) = b(x, X_r) + \delta$$

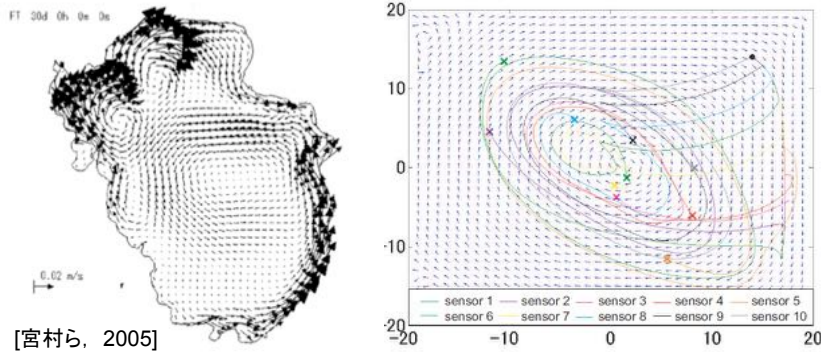
### ◆ 付加項 $\delta$

$$\delta = -(A^{\dagger\top} R A^{\dagger} + Q)^{-1} A^{\dagger\top} R (A^{\dagger} b - A^{\dagger} A w)$$

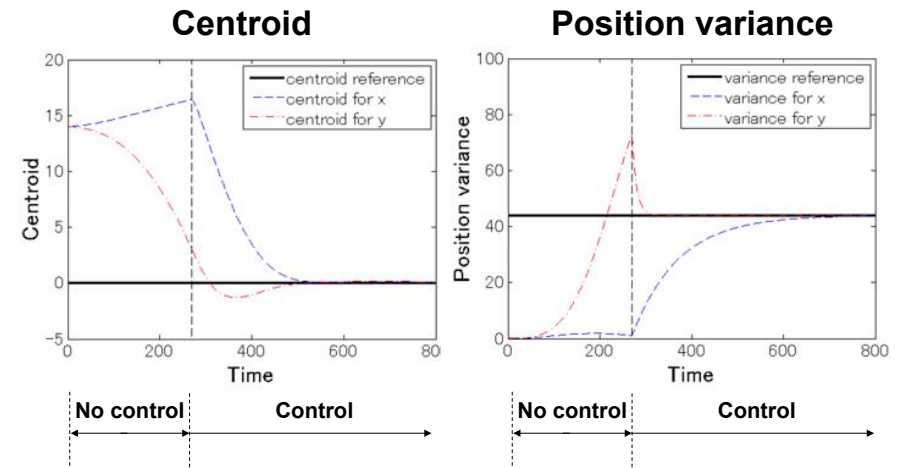
$$J = u^{\top} R u + \delta^{\top} Q \delta$$

重み

## 提案制御則数値検証



## 提案制御則数値検証

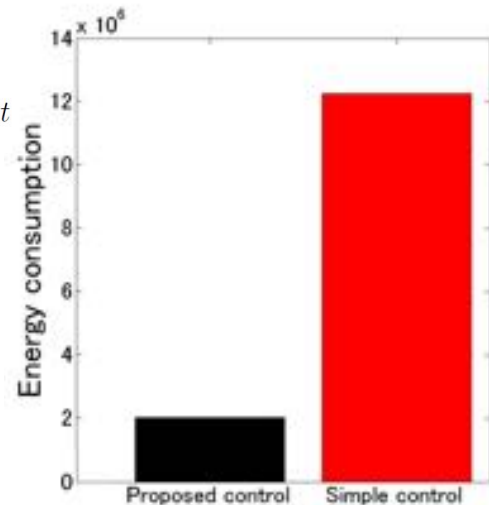


## 提案制御則数値検証



### ◆エネルギー消費

$$E(T) = \int_0^T \mathbf{u}^\top(t) \mathbf{u}(t) dt$$



## アウトライン



### ◆水環境モニタリングシステム

- 背景
- 水環境モニタリング装置分類
- 研究目的
- システム
- 制御則
- 流れ場推定

### ◆超低消費エネルギー自律移動型環境モニタリングシステム

## 流速場推定: 方法



### ◆Navier–Stokes equations (二次元非圧縮)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} &= -\frac{\partial \xi^2}{\partial x} - \frac{\partial \xi \eta}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} &= -\frac{\partial \xi \eta}{\partial x} - \frac{\partial \eta^2}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

### ◆時空間の離散化

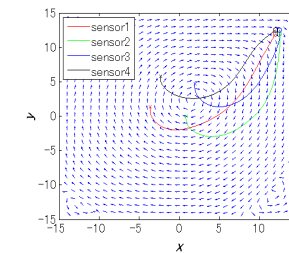
$$\begin{aligned}\xi_{k+1|k}^{\text{inside}} &= f_{\xi}(\xi_{k|k}^{\text{inside}}, p_{k+1|k}^{\text{I}}, \xi^{\text{Iboundary}}) \\ \xi_{k|k}^{\text{inside}} &= h_{\xi}(\xi_{k|k-1}^{\text{inside}}, p_{k|k}^{\text{I}}, \xi^{\text{Iboundary}})\end{aligned}$$

## 流速場推定: 方法



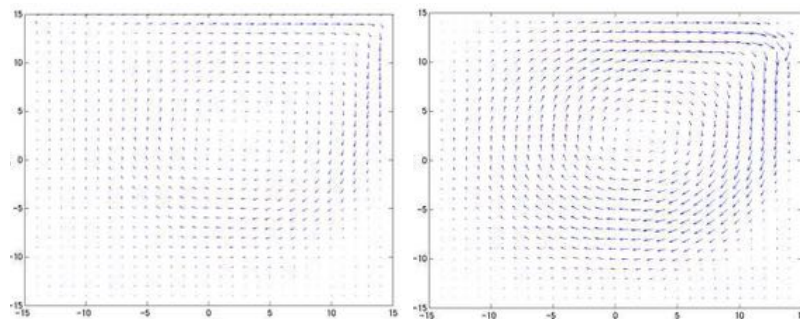
### ◆計測された流速を挿入し, 収束するまで時間更新を行う

$$\begin{aligned}\hat{\xi}_{k+1|k}^{\text{I}} &= f_{\xi}(\hat{\xi}_{k|k}^{\text{I}}, \hat{p}_{k+1|k}^{\text{I}}, \hat{\xi}^{\text{Iboundary}}, \mathbf{y}^{\text{I}}) \\ \hat{\xi}_{k|k}^{\text{I}} &= h_{\xi}(\hat{\xi}_{k|k-1}^{\text{I}}, \hat{p}_{k|k}^{\text{I}}, \hat{\xi}^{\text{Iboundary}}, \mathbf{y}^{\text{I}})\end{aligned}$$



↑  
流速データ

## 流速場推定: 検証



正解データ

推定された流速場

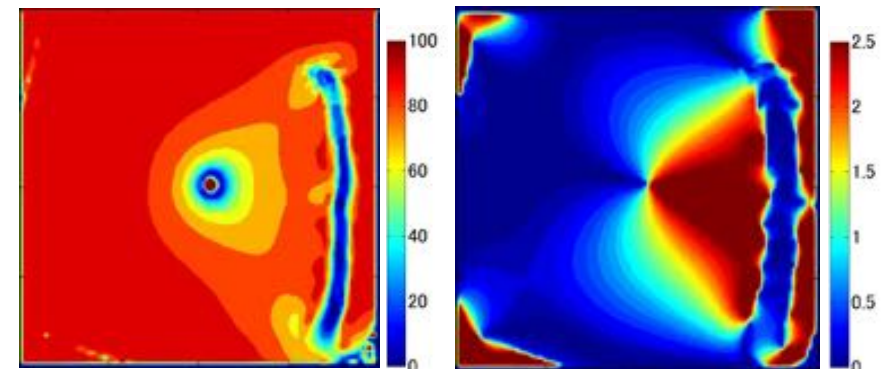
|                 | Floating sensor approach | Proposed monitoring |
|-----------------|--------------------------|---------------------|
| Magnitude error | 41%                      | 29%                 |
| Direction error | 0.30 rad                 | 0.28 rad            |

## 流速場推定: 検証



### ◆Magnitude error

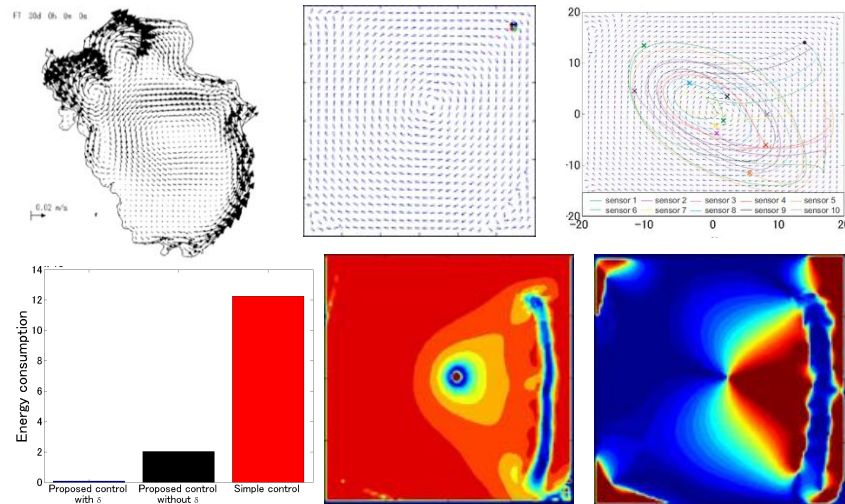
$$\epsilon_{i,j} := \frac{|\sqrt{\hat{\xi}_{i,j}^2 + \hat{\eta}_{i,j}^2} - \sqrt{\xi_{i,j}^2 + \eta_{i,j}^2}|}{[\xi_{i,j}^2 + \eta_{i,j}^2]^{\frac{1}{2}}}$$



Magnitude error

Direction error

## 猪苗代湖を想定した数値シミュレーション



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## アウトライン



### ◆水環境モニタリングシステム

- 背景
- 水環境モニタリング装置分類
- 研究目的
- システム
- 制御則
- 流れ場推定

### ◆超低消費エネルギー自律移動型環境モニタリングシステム

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

## 概要



### ◆背景

- 海洋, 河川, 空, 山脈などのフィールドでは, 常に観測データが時間・空間解像度両面から不足している.

### ◆目的

- フィールドのモニタリング, 調査, 探査を効率的に行う超低消費電力型の自律移動マルチエージェントシステム実現のための制御・推定技術開発

### ◆アイデア

- フィールド(場)のエネルギーをエージェントに移動に活用

### ◆波及効果

- 提案する技術・システムによって, 長期間かつ空間的に一様とみなせる観測データの収集が可能となる
- 観測データの充足は, フィールドに関する知見・理解を促進させ, 環境アセスメント, 生態調査, 宇宙探査, 地球科学, 建築など多分野の発展に貢献する

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

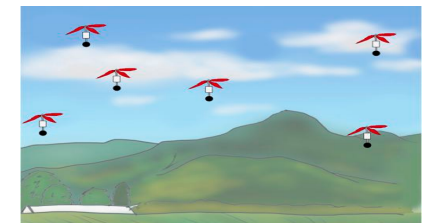
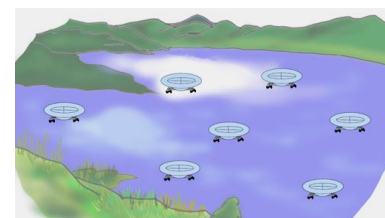
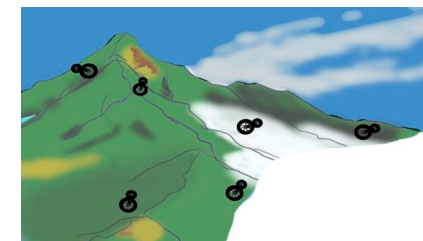
## 想定フィールド: 湖, 河川, 海洋



### ◆山

### ◆湖, 川, 海

### ◆空



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

- ◆水環境を長期間モニタリングするための自律移動型センサバイ群の開発について報告した
  - 発電機能を有するNOMADシステム
  - センサバイ群の低エネルギー制御
  - 流速場の推定
- ◆将来展望として場のエネルギーを利用した超低消費エネルギー自律移動型環境モニタリングシステムのコンセプトを紹介した
  - 推定と制御の統合による効率的なモニタリング
  - リアルタイムデータ同化