



System Robotics Laboratory
Department of Robotics
Graduate School of Engineering
Tohoku University
東北大学
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、東北大学流体力学研究所三坂孝志先生との共同研究の内容を含みます

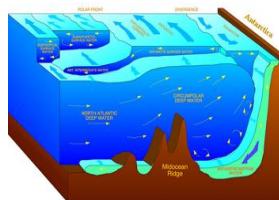
データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

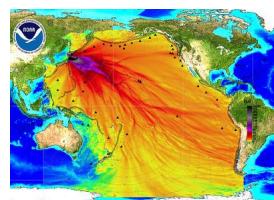
水環境モニタリング



- 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/img_lrg/cold_water.jpg
As of 2014 June 16th



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



http://s3.ravenelbridge.net/large/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



◆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

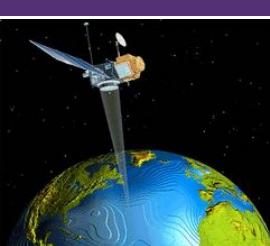
水質モニタリング装置分類



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

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory



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



<http://www.nauticexpo.es/prod/codar-oceansensors/sistemas-radar-hf-sistemas-violancia-rio-30828-377204.html>



<http://www.iot-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



システム構成要素

■ GPS



http://img.dxcdn.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
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
As of 2014 June 16th

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

目的



東北大学

◆水環境を長期間モニタリング可能な自律移動型センサトイ群の開発

- 発電
- 低エネルギー制御(流れを利用)
- 流速場の推定

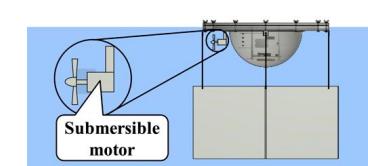
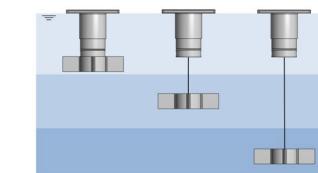
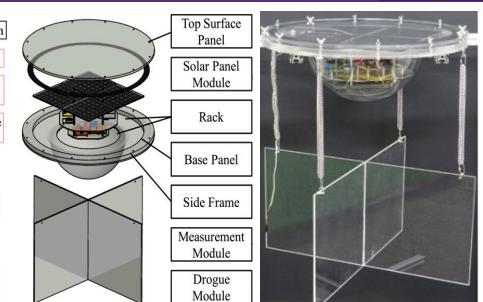
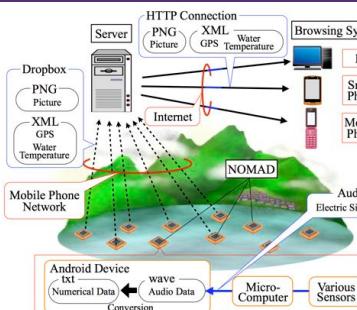
データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

NOMAD

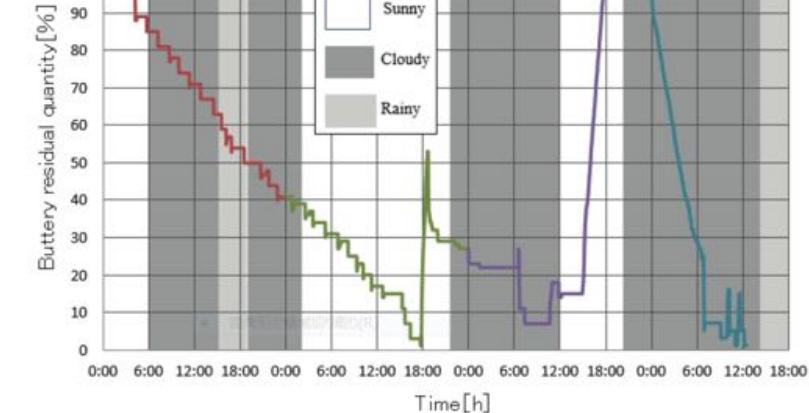


東北大学



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory



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

問題設定



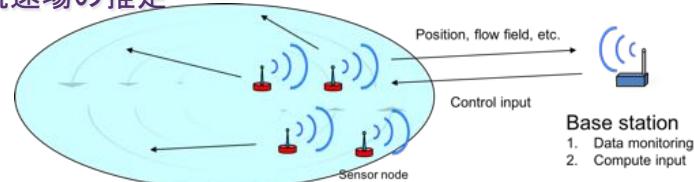
想定

- ◆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

モデル化: センサの運動方程式

◆センサ 加速度 推力 外力

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{1}{m} (u_x + w_x) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} (u_y + w_y)\end{aligned}$$

◆水中から受ける力 流速

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

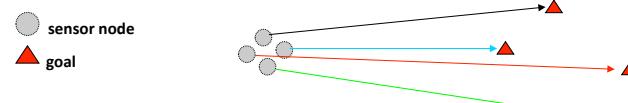
$$v_{fluid} = g(x, y) : \text{定常流を仮定}$$

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

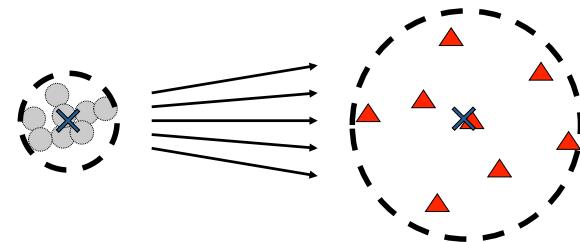


個々のセンサの目標位置を与えるのではなく、



グループとしての目標位置と分散を目標にする

Sensor node (initial)
Sensor node (final)
Centroid



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

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がどう決まるのか？

➤ 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

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

データ同化研究会

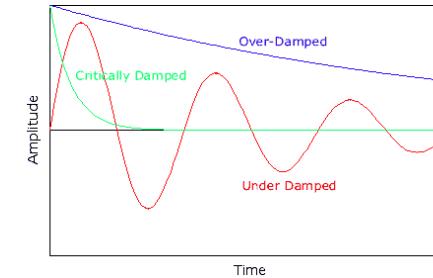
© System Robotics Laboratory

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)

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



データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

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 δ

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

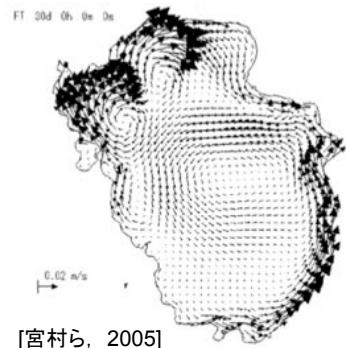
$$J = u^{\top} R u + \delta^{\top} Q \delta$$

重み

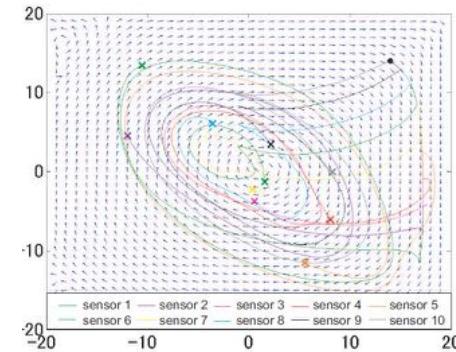
データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

提案制御則数値検証



[宮村ら, 2005]



データ同化研究会

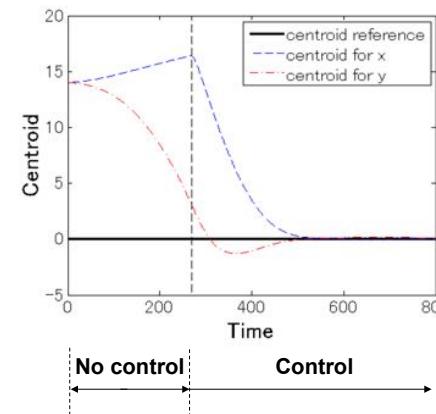
© System Robotics Laboratory

提案制御則数値検証

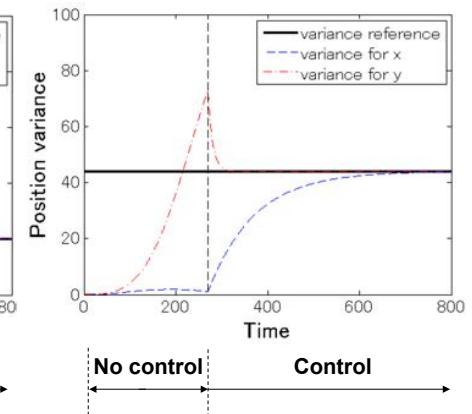


東北大学

Centroid



Position variance



データ同化研究会

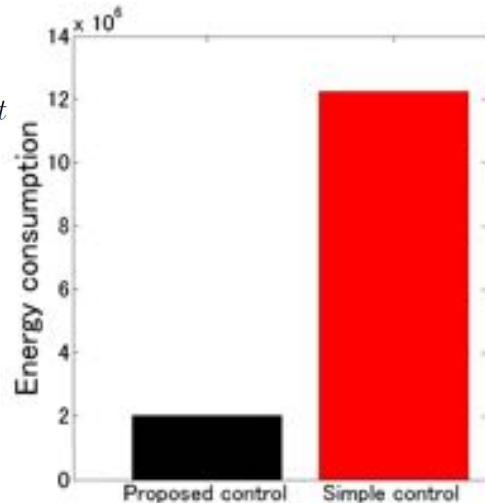
© System Robotics Laboratory

提案制御則数値検証



◆エネルギー消費

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



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

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

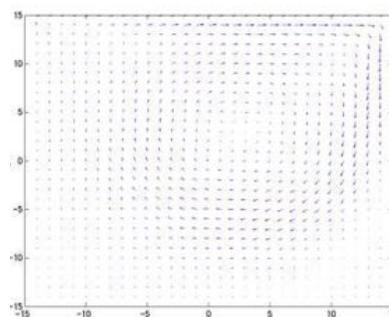
$$\xi_{k+1|k}^{\mathbb{I}_{\text{inside}}} = f_\xi(\xi_{k|k}^{\mathbb{I}_{\text{inside}}}, p_{k+1|k}^{\mathbb{I}}, \boldsymbol{\xi}^{\mathbb{I}_{\text{boundary}}})$$

$$\xi_{k|k}^{\mathbb{I}_{\text{inside}}} = h_\xi(\xi_{k|k-1}^{\mathbb{I}_{\text{inside}}}, p_{k|k}^{\mathbb{I}}, \boldsymbol{\xi}^{\mathbb{I}_{\text{boundary}}})$$

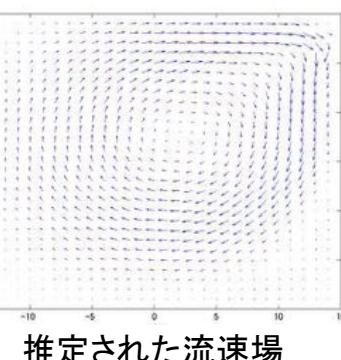
データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

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

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

流速場推定: 方法

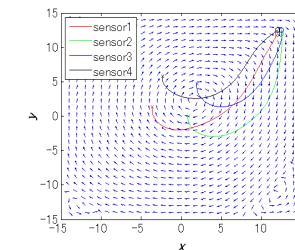


◆計測された流速を挿入し、収束するまで時間更新を行う

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}_{k+1|k}^{\mathbb{J}_k} = f_\xi(\hat{\boldsymbol{\xi}}_{k|k}^{\mathbb{J}_k}, \hat{p}_{k+1|k}^{\mathbb{I}}, \hat{\boldsymbol{\xi}}^{\mathbb{I}_{\text{boundary}}}, \mathbf{y}^{\mathbb{I}_k})$$

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}_{k|k}^{\mathbb{J}_k} = h_\xi(\hat{\boldsymbol{\xi}}_{k|k-1}^{\mathbb{J}_k}, \hat{p}_{k|k}^{\mathbb{I}}, \hat{\boldsymbol{\xi}}^{\mathbb{I}_{\text{boundary}}}, \mathbf{y}^{\mathbb{I}_k})$$

↑
流速データ



データ同化研究会

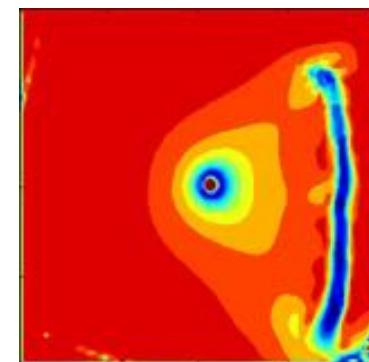
© System Robotics Laboratory

流速場推定: 検証

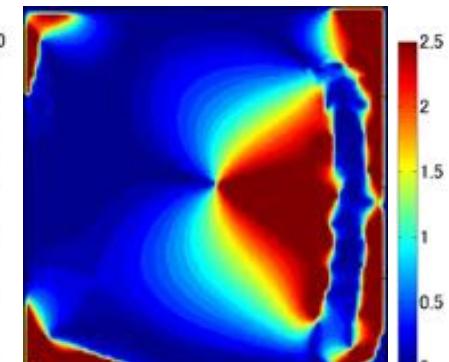


◆Magnitude error

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



Magnitude error

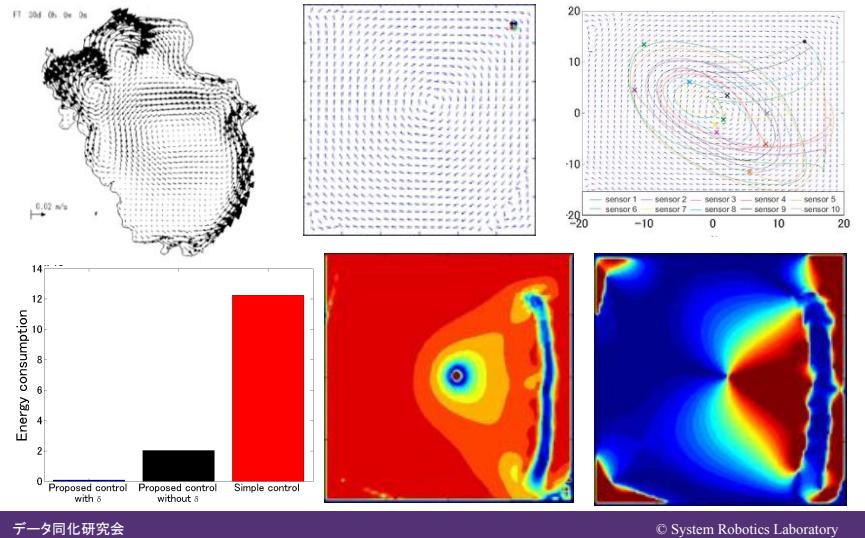


Direction error

データ同化研究会

© System Robotics Laboratory

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



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

概要



東北大学

◆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

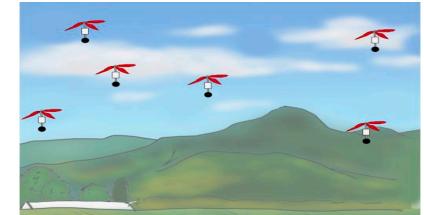
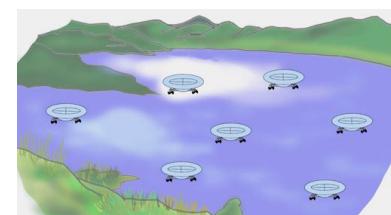


東北大学

◆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ブ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
- センサブ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