

自律型水中ロボットと海底ステーションによる 水中構造物の 全自動・長期モニタリングシステム(その1)

東京大学 生産技術研究所
巻 俊宏

海洋構造物の水中観測

- 構造物の例
 - － 港湾(岸壁、防波堤…)
 - － 沿岸(棧橋式空港、石油基地…)
 - － 沖合・海中(石油リグ、漁礁…)
- 観測の目的
 - － 保守点検 (肉厚、外観…)
 - － 環境調査 (堆砂、水質、生物…)
 - － セキュリティ (外観、パトロール…)
- 現在の観測手法
 - － 船舶
 - － ダイバー
 - － 遠隔操縦ロボット(ROV)



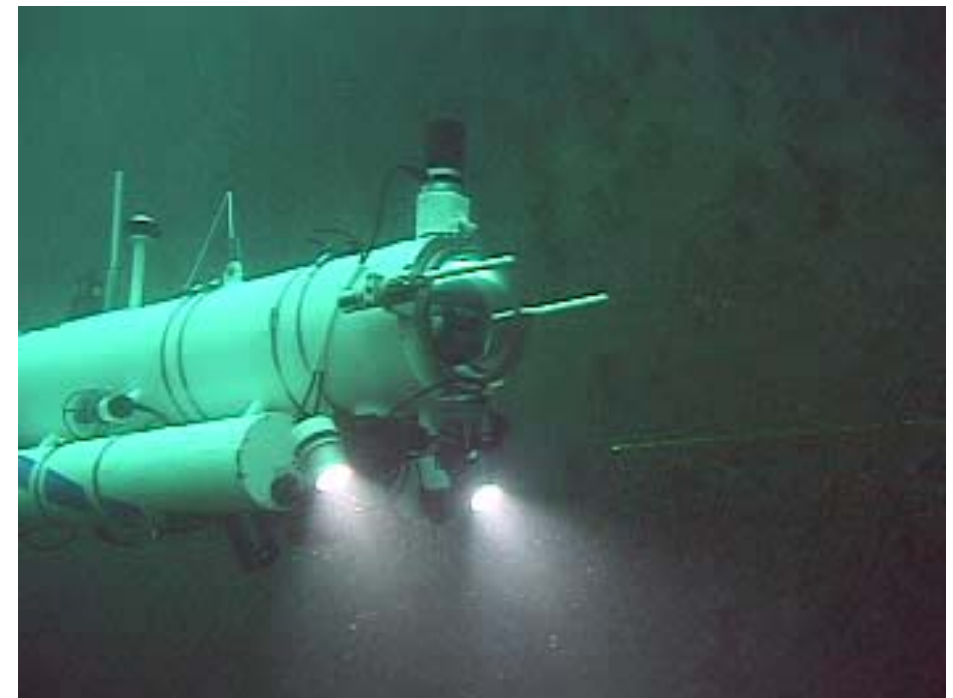
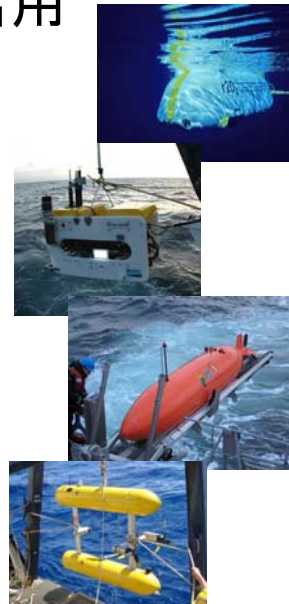
http://www.haneda-d.jp/d_now/photo.php



<http://www.shibuya-diving.co.jp/index.php>

自律ロボットの活用

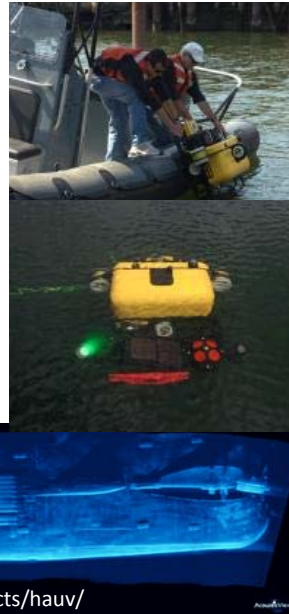
- 自律型海中ロボット(AUV)
 - － エネルギー源と制御装置を内蔵し、無索・全自動で観測活動を行う
 - － 資源探査、学術調査、防衛等の分野で実用化されている
- 構造物観測における利点
 - － ケーブルが無いため、構造物に絡まる心配がない
 - － 観測の質を一定に保つことができる
 - － 人間が監督する必要がなく、低コスト



海外の事例

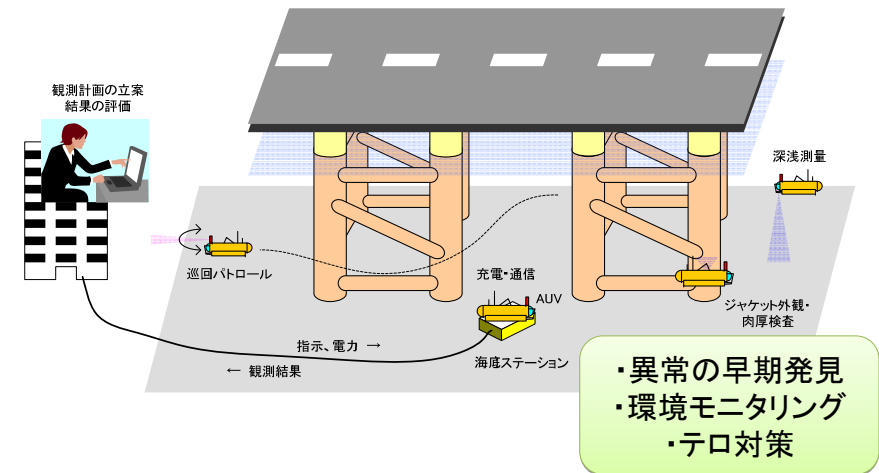
• HAUV

- 米国Bluefin Robotics社の製品
- DVLにより船や構造物に沿って走ることができる
- 音響ビデオカメラによる観測



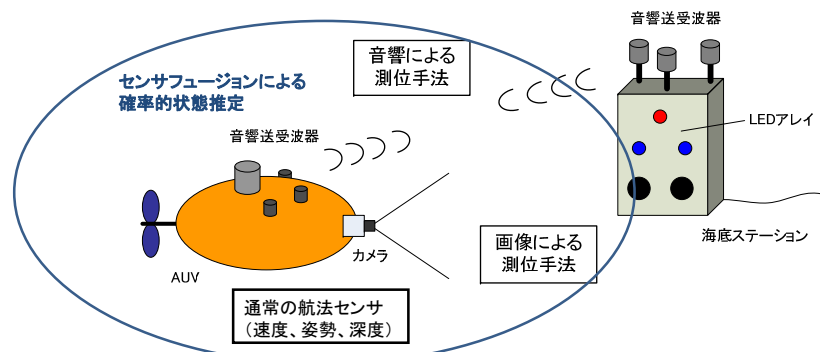
<http://www.bluefinrobotics.com/products/hauv/>

提案：AUVと海底ステーションによる構造物の長期モニタリング



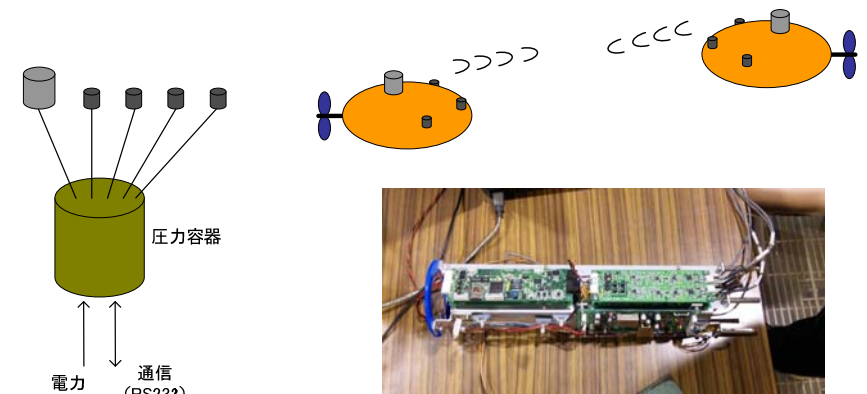
本年度の実施内容

- ステーションを基準とするAUVの測位手法の開発
 - 音響による測位装置 (ALOC) の実海域試験
 - 画像による高精度相対測位手法の開発
 - 両者の統合による広域・高精度測位手法の開発

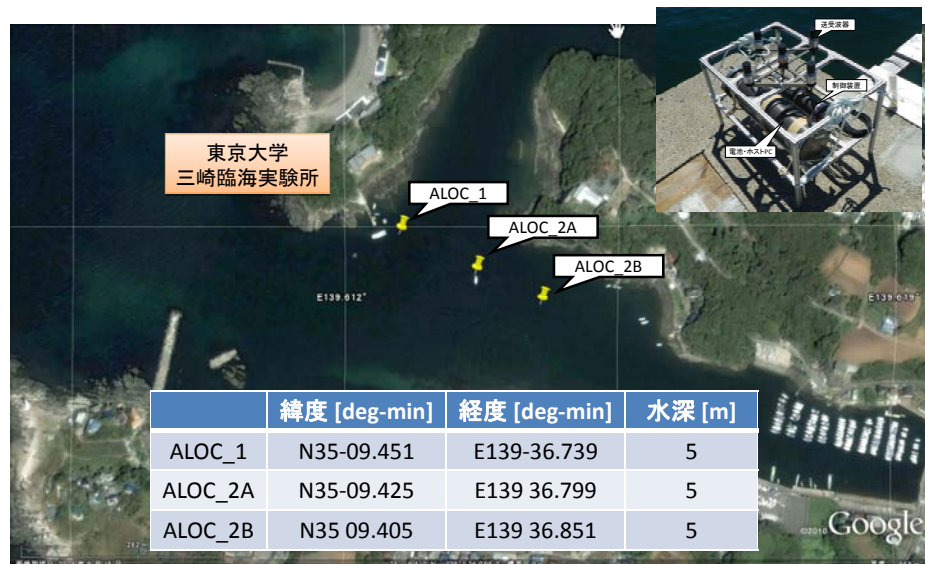


ALOC

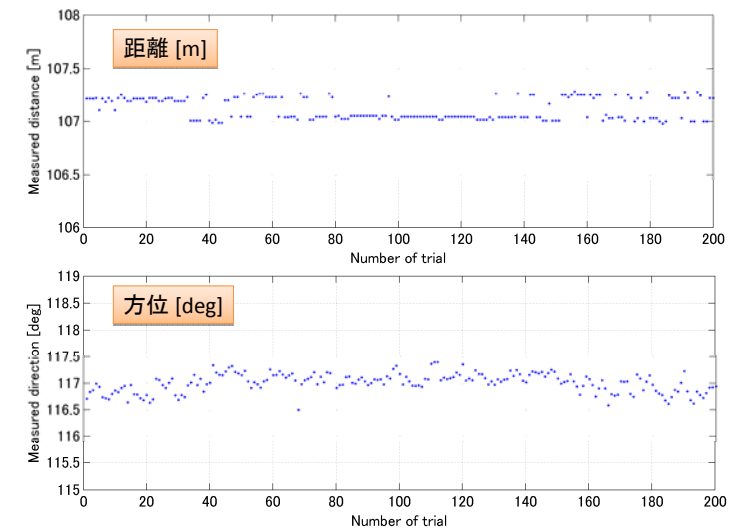
- Acoustic Localization and Communication System
- 音響による水中相対測位・通信システム



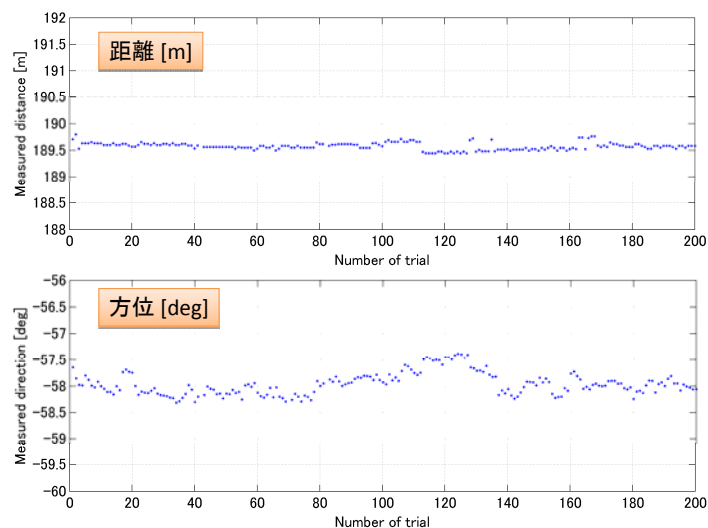
ALOCの実海域試験



結果 (ALOC2_A)



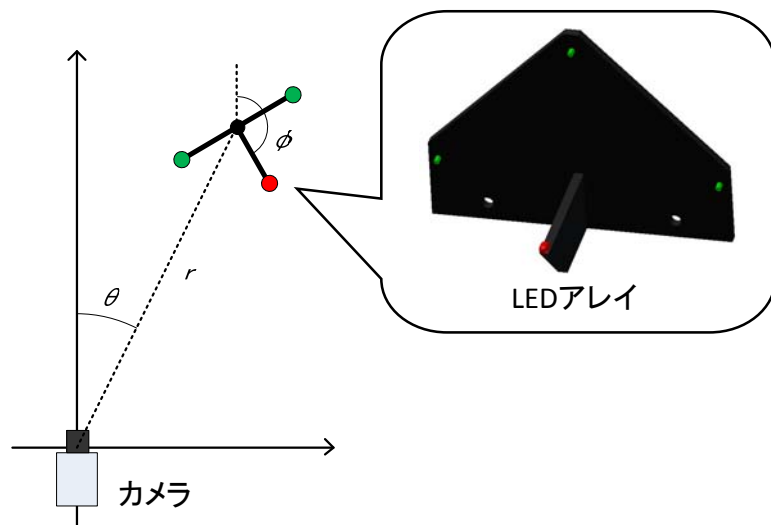
結果 (ALOC2_B)



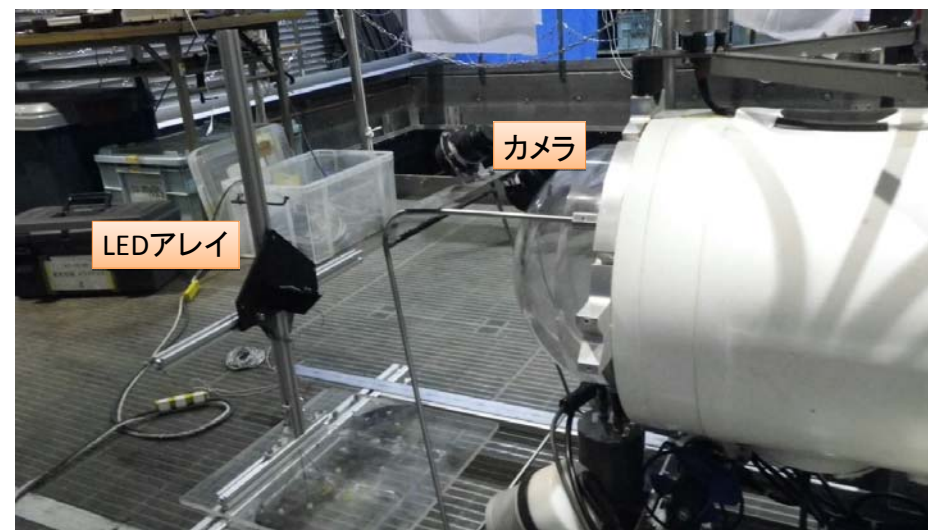
結果まとめ

ターゲット	ALOC_2A	ALOC_2B
相対距離 [m]	103	190
測位成功率	1.00	0.99
通信成功率	0.57	0.10
距離計測値の平均 [m]	107.12	189.58
距離計測値の標準偏差 [m]	0.10	0.07
方位計測値の平均 [m]	116.98	-57.92
方位計測値の標準偏差 [m]	0.38	0.51

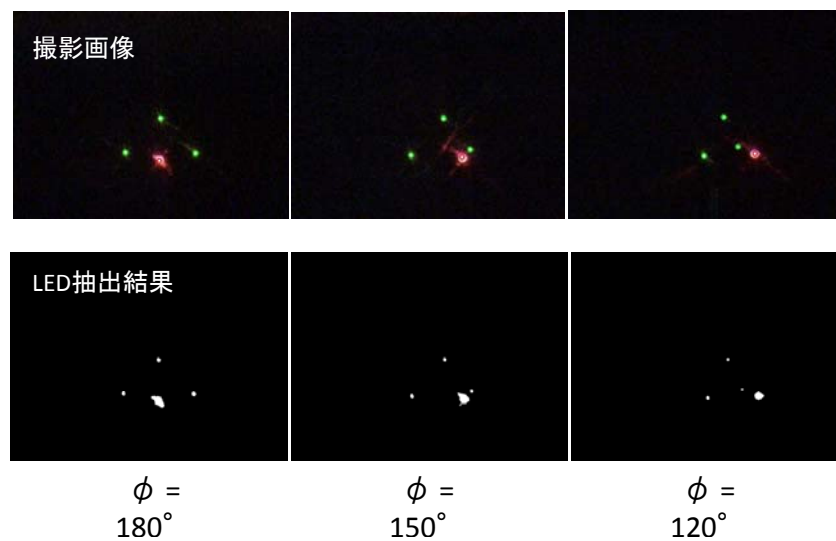
画像による近距離精密測位



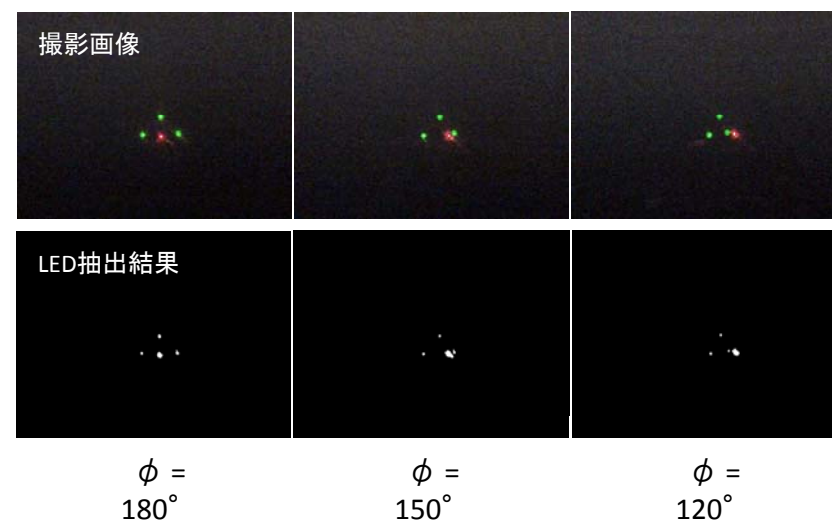
水槽試験



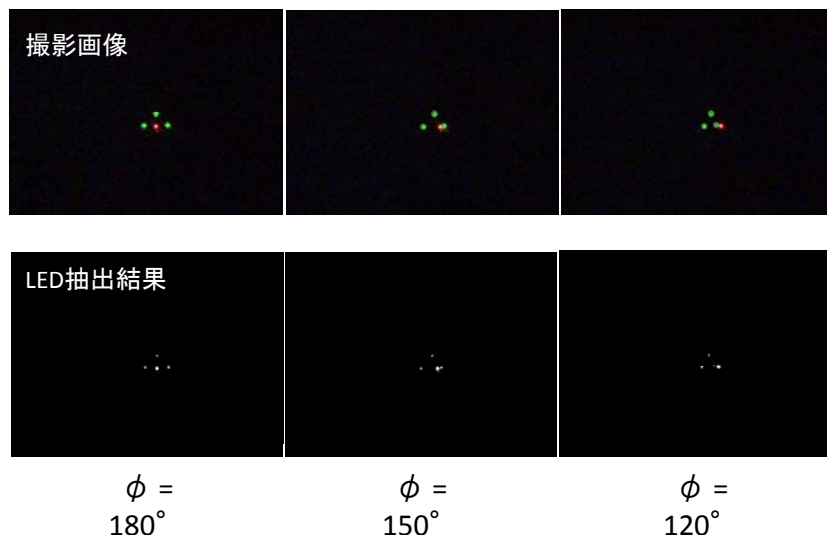
撮影結果 ($r = 0.5\text{m}$)



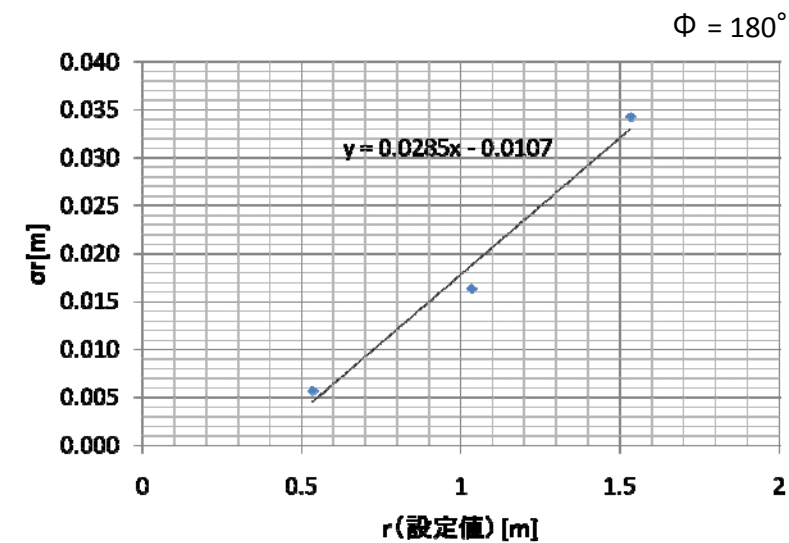
撮影結果 ($r = 1.0\text{m}$)



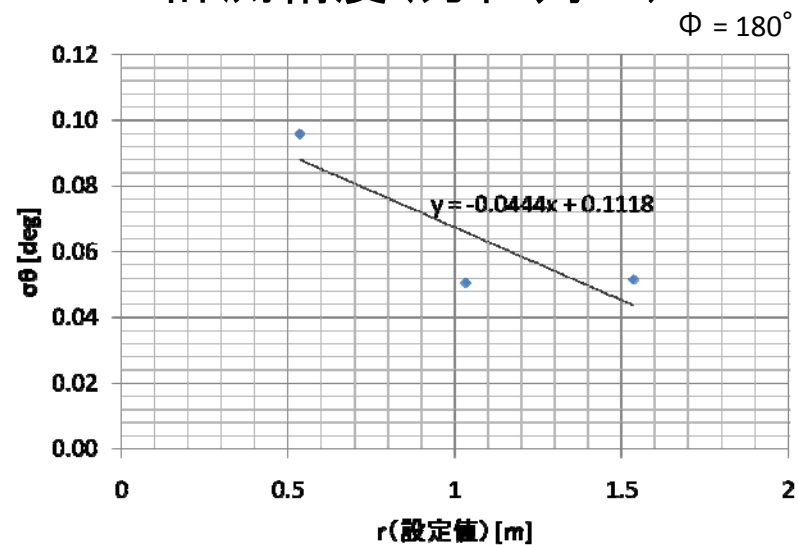
撮影結果 ($r = 1.5\text{m}$)



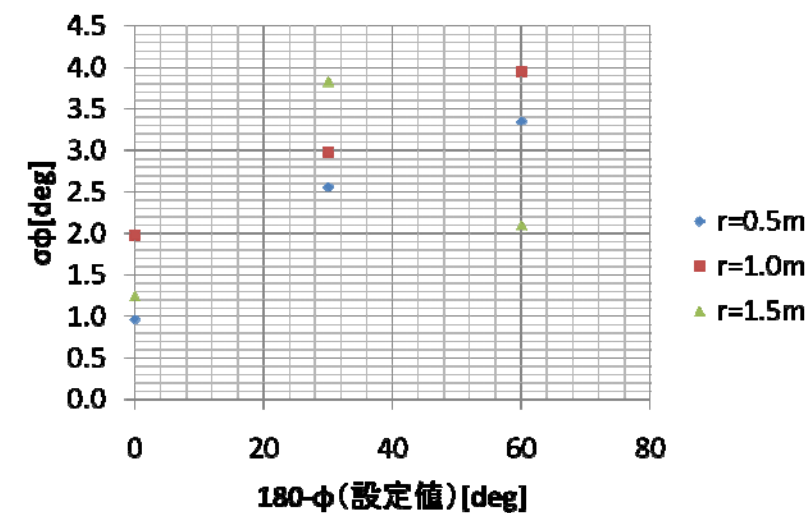
計測精度 (距離 r)



計測精度 (方位角 θ)



計測精度 (相対角 ϕ)

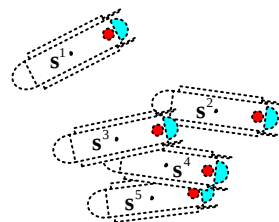


両センサの融合による測位手法

• パーティクルフィルタ

- モンテカルロ法によるベイズフィルタの実装
- 任意の状態遷移モデル、観測モデルを導入可
- 非ガウシアン状態推定可能
- サンプル数により計算量と精度の調整可能

$$Bel(x_t) = \{s_t^i, w_t^i\}, i = 1, \dots, m$$



• ベイズフィルタ

$$Bel(x_t) = \eta \underbrace{p(o_t | x_t)}_{\text{観測確率}} \int \underbrace{p(x_t | x_{t-1}, a_{t-1})}_{\text{状態遷移確率}} Bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$$

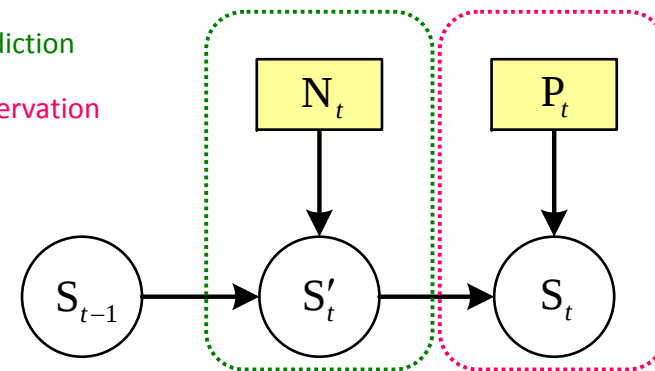
観測確率
プロファイラによる

状態遷移確率
ナビゲーション情報による

状態更新手順

1. Prediction

2. Observation



$$Bel(x_t) = \eta \underbrace{p(o_t | x_t)}_{\text{観測確率}} \int \underbrace{p(x_t | x_{t-1}, a_{t-1})}_{\text{状態遷移確率}} Bel(x_{t-1}) dx_{t-1}$$

Prediction

for $i = 1, \dots, m$

- $Bel(x_{t-1})$ の表す確率分布から一点サンプリング

$$\rightarrow s_{t-1}^i = \{x', \psi'\}$$

- 計測した速度に基づき移動させる

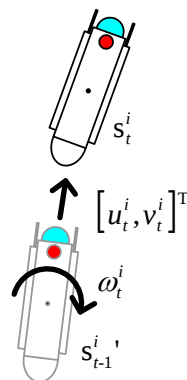
$$\rightarrow s_t^i = \{x, \psi\}$$

$$x = x' + \Delta t R(\psi') \begin{bmatrix} u_t^i \\ v_t^i \end{bmatrix}$$

$$\psi = \psi' + \Delta t \omega_t^i$$

$$\begin{aligned} u_t^i &\sim N(\hat{u}_t, \sigma_u^2) \\ v_t^i &\sim N(\hat{v}_t, \sigma_v^2) \\ \omega_t^i &\sim N(\hat{\omega}_t, \sigma_\omega^2) \end{aligned}$$

u, v : 水平移動速度, ω : 方位角速度



Observation → Output

for $i = 1, \dots, m$

- ステーションとの相対位置関係による重み付け

$$w^i = \prod_j \max_k \{L^{ijk}\}$$

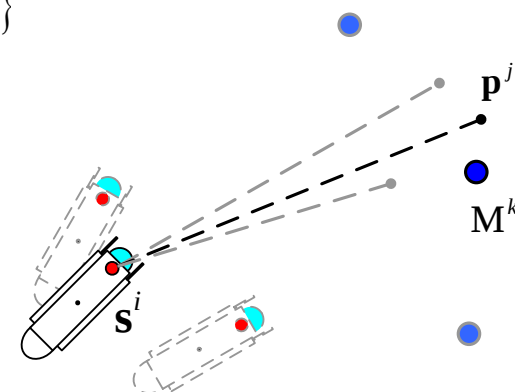
$$L^{ijk} = L(p^j | s^i, M^k)$$

- 正規化

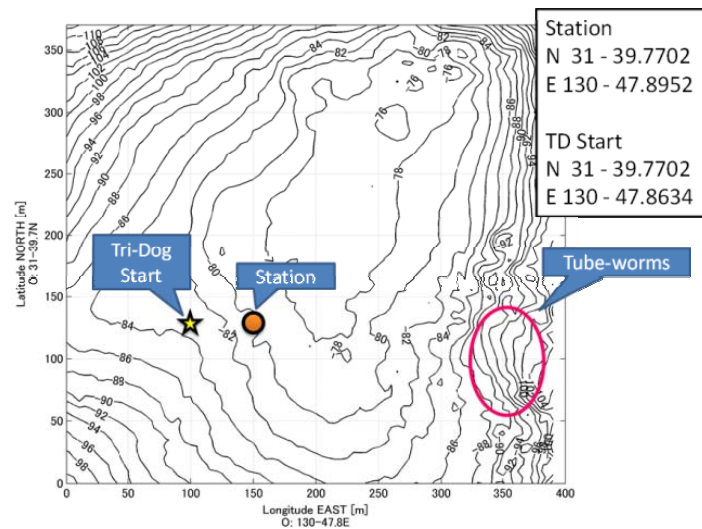
$$w^i = \frac{w^i}{\sum_j w^j}$$

- 代表値を出力

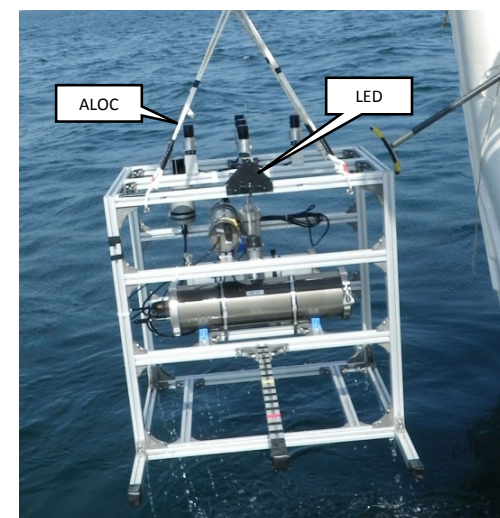
$$[x, \psi]^T = \sum_i w^i s^i$$



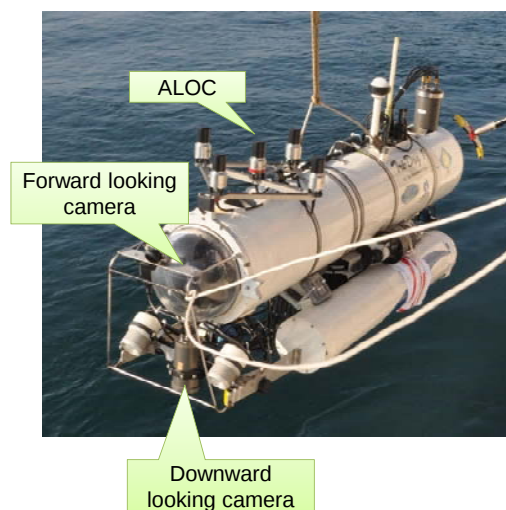
総合試験



海底ステーション

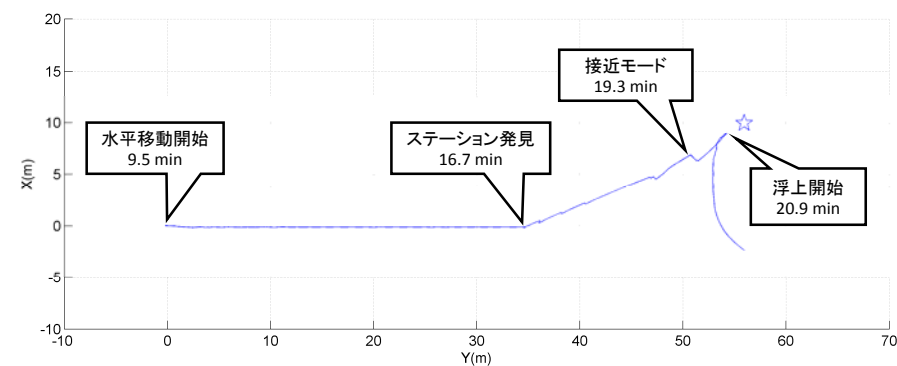


Tri-Dog 1

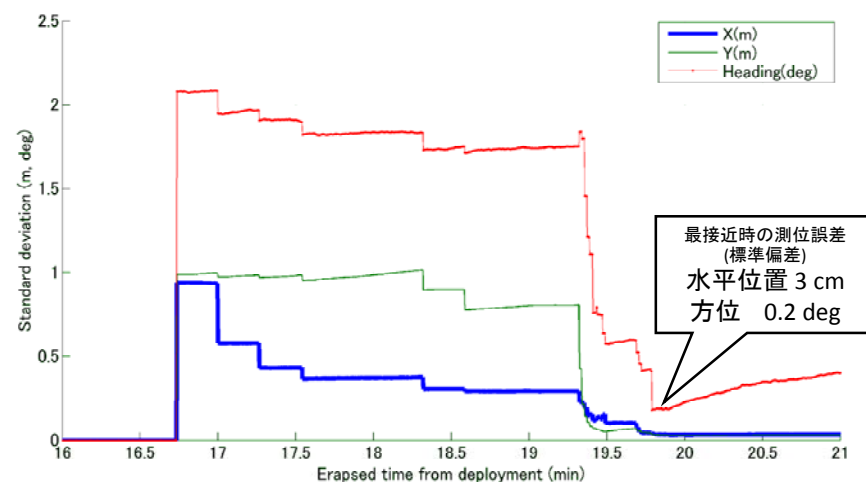


Length	2.0 m
Width	0.6 m
Height	0.9 m
Max. depth	110 m
Duration	4 hours
Thrusters	100W x 6
Processor (Main)	Pentium M 1.1 GHz
Processor (Vision)	Pentium 4 2.4 GHz

Tri-Dog 1の航跡



測位誤差の推定値



前方カメラの撮影画像



海底画像観測結果



範囲: 20 x 10 m

まとめ

- 本研究では、海底ステーションとAUVによる構造物の長期モニタリングを実現するための、AUVの測位手法を提案した。
- 提案手法は音響と画像によりステーションとの位置関係を計測し、速度や深度等の他のセンサ情報も用いて確率的に推定する。これにより長レンジとステーション近傍での高精度を両立する。
- 提案手法を個別に精度評価試験を行うと共に、両者を融合した総合試験を水槽及び実海域で実施した。これにより提案手法の有効性を確認した。