

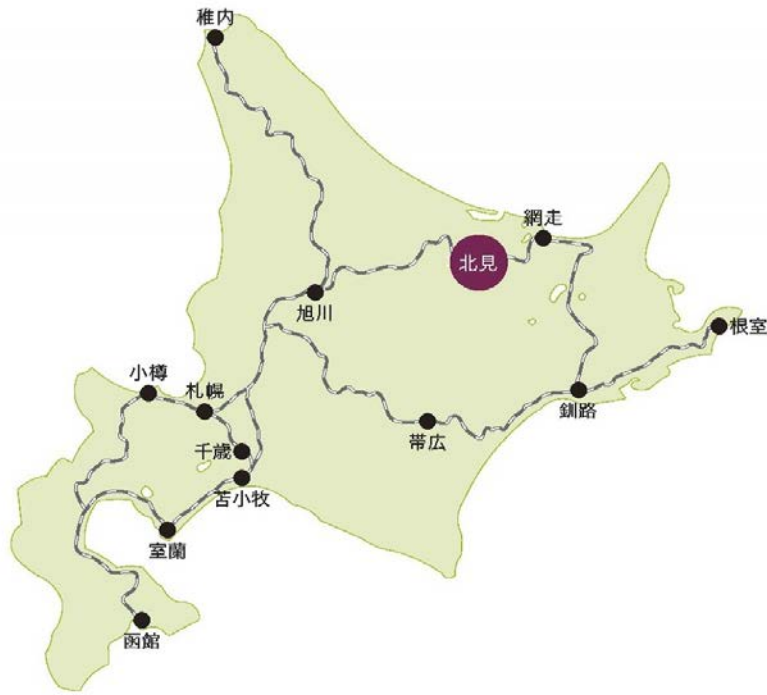
サブメータ級水中音響測位技術

2022年10月4日～10月31日
イノベーションジャパン2022～大学見本市Online

北見工業大学 工学部 情報通信系
吉澤 真吾

北見工業大学とは？

- 北海道北見市にある日本で最北の国立大学
 - オホーツク地域に立地する唯一の工業大学として強みと生かした研究・教育を行う



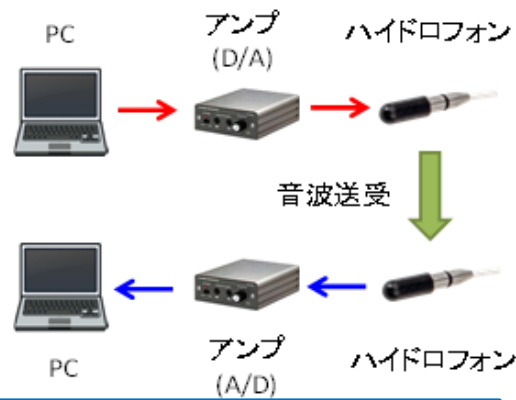
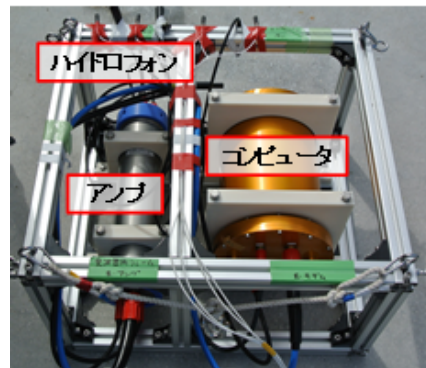
北見工業大学キャンパスマップ・パンフレットより引用



研究紹介(北見工業大学 吉澤研究室)

海の中のIoT (モノのインターネット, Internet of Things)

✓ 電磁波は海水中で著しく減衰する。遠距離用途で音波を利用

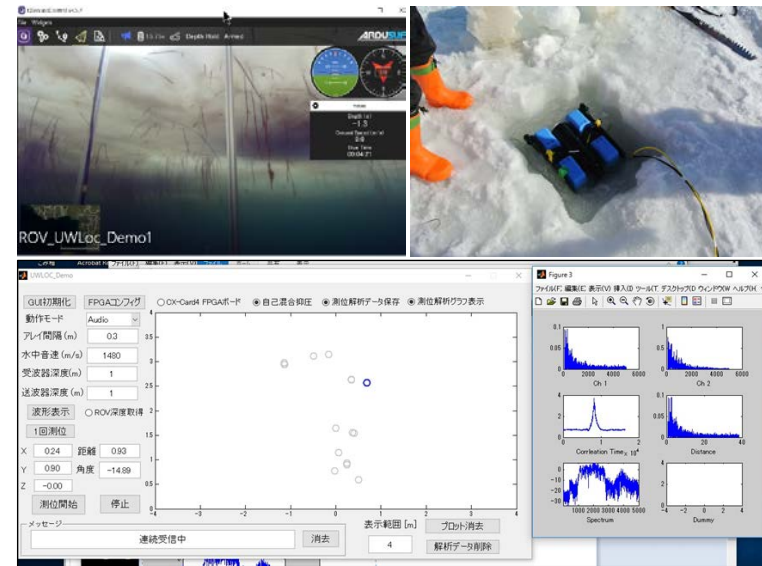


従来技術では困難な
浅海域(港湾)水中音響通信・
測位の実用化を目指す

水中音響通信試験装置の開発



実海域での実証試験



水中音響測位装置の開発

目次

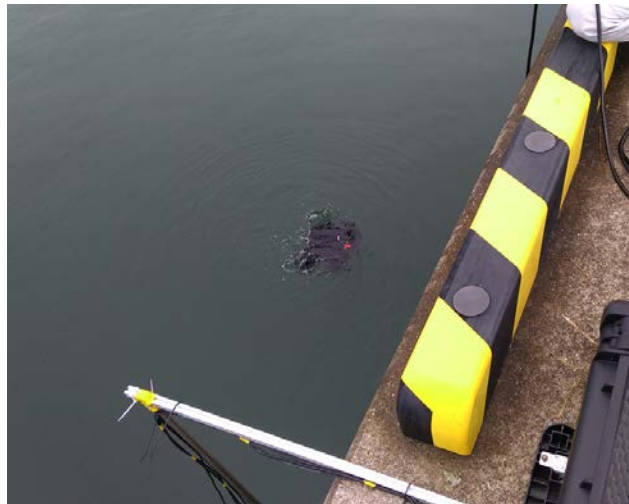
- 音響測位の概要
- USBL方式測位
- SBL方式測位
- LBL方式測位
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

水中音響測位とは？

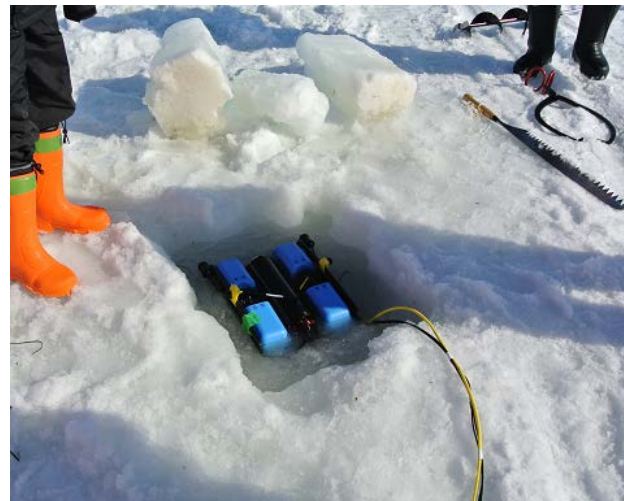
- 水中ロボット(ドローン)は海中での位置が把握しにくい
 - 濁度の高い水域
 - GPS衛星からの電波が海中(水中)で減衰して届かない



対象物が発する音波を手掛かりに位置を見つける



千葉県浦安市河口付近

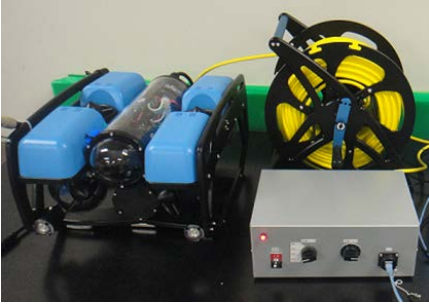


北海道サロマ湖氷上

音響測位の利用例

- ✓ 水中ロボット・ダイバーの位置把握
- ✓ 水中ロボット自動運転
- ✓ 海中・海底測量
- ✓ 水中構造物の姿勢把握
 - 多点同時計測
- ✓ 水中無線通信
 - 対象位置に音波・電磁波・光ビームを集中させる

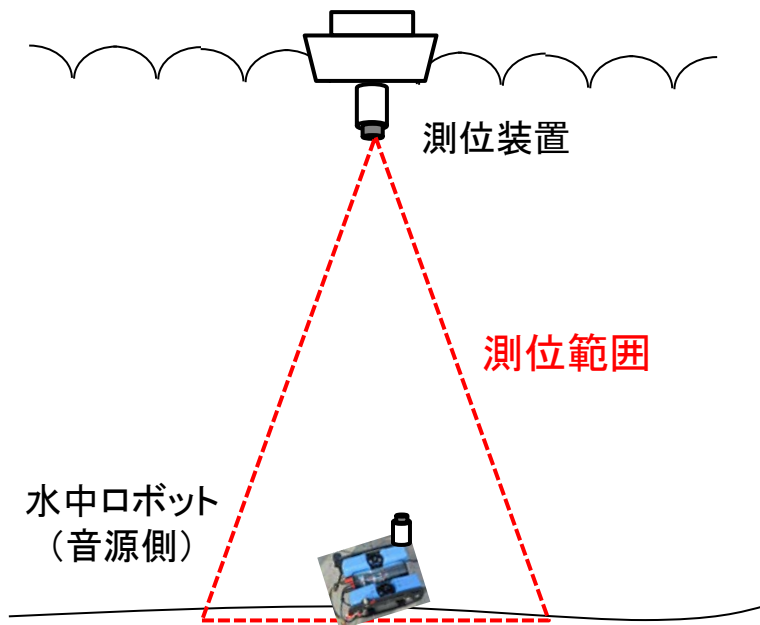
小型水中ロボット搭載型の音響測位装置例

型名	WaterLinked Underwater GPS G2	Cerulean Sonar ROV MK III	水中ドローン社(SIX VOICE) Shallow Compass
測位範囲	100 or 300 m	300 m	100 m
周波数帯域	31 – 250 kHz	25 / 43 kHz	50 – 70 kHz or 12 – 32 kHz
分解能	角度 1度	角度 0.1 度	距離 1 cm
測位方式	SBL / LBL	USBL	SBL
外観・引用元	https://www.waterlinked.com/	https://ceruleansonar.com/	 https://underwaterdrone.stores.jp/

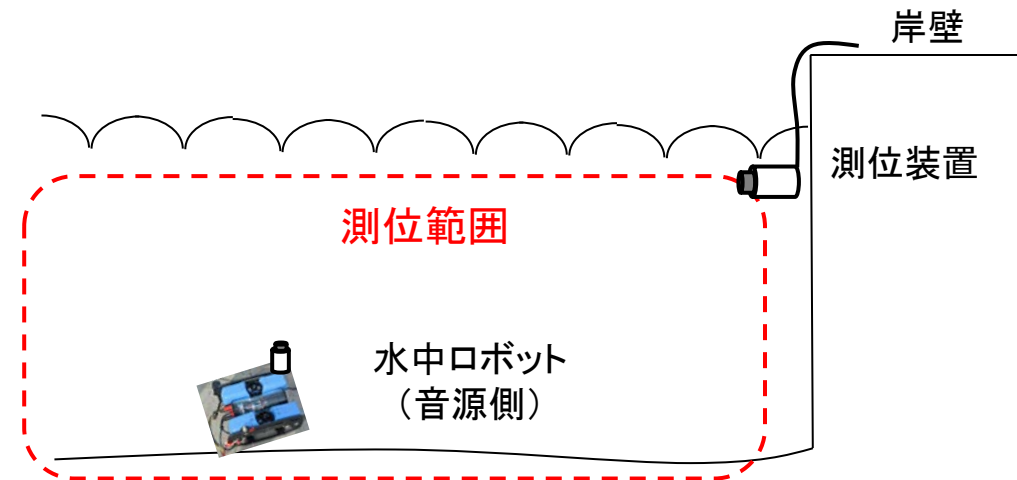
水中音響測位システムの技術課題

- 水深が浅い海域や水平方向の音響測位は誤差が大きい
 - 音波反射が大きく影響する

従来の音響測位システム
主に鉛直方向で測位



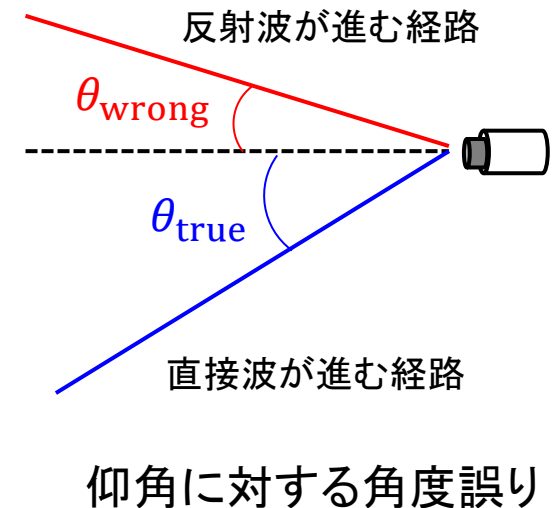
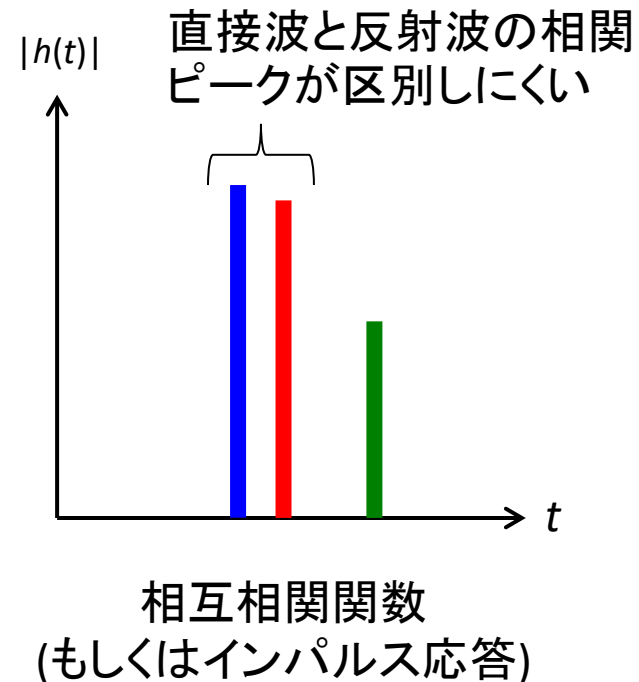
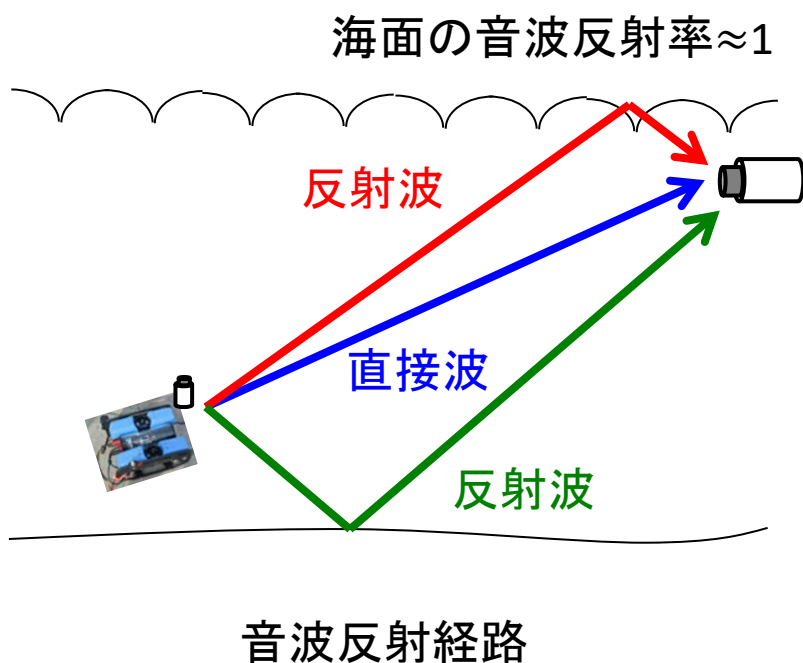
新しい音響測位システム
浅海域、水平方向で測位



市販の音響測位装置でも水平方向測位は可能であるが
測位誤差が大きくなる

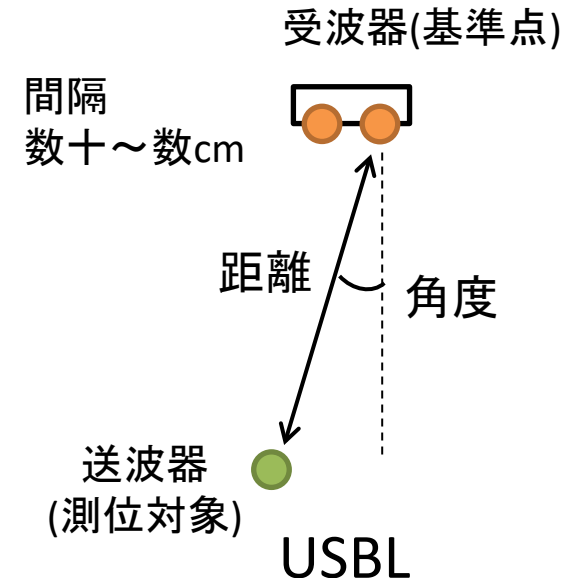
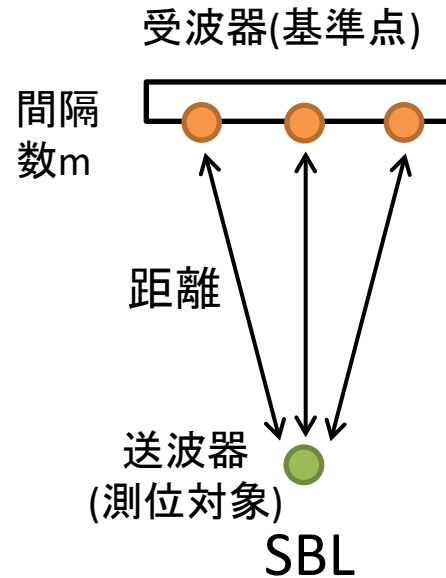
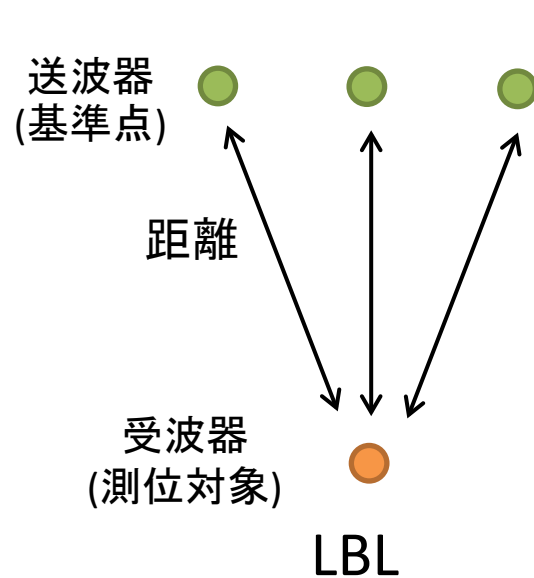
なぜ水平方向の測位は難しいのか？

- 水中音響では海面で反射した波がほとんど減衰しない
- 直接波ではなく反射波の到来方向を誤って検出してしまう場合がある



音響測位方式

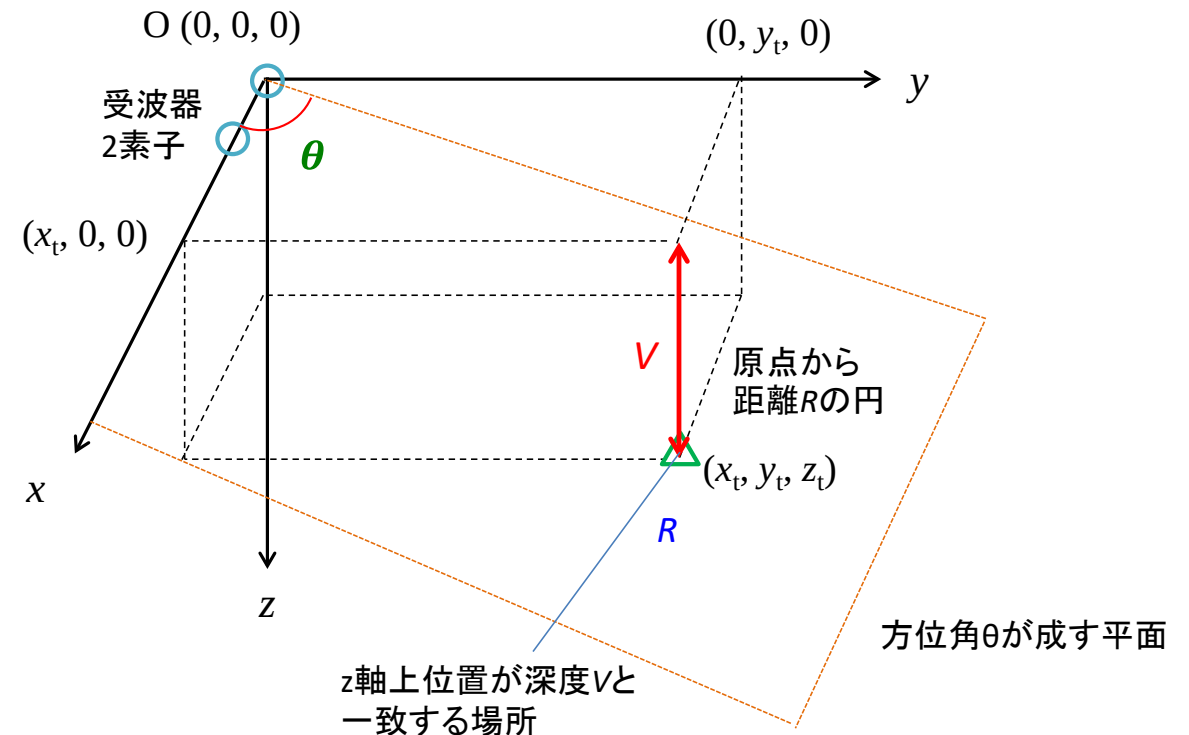
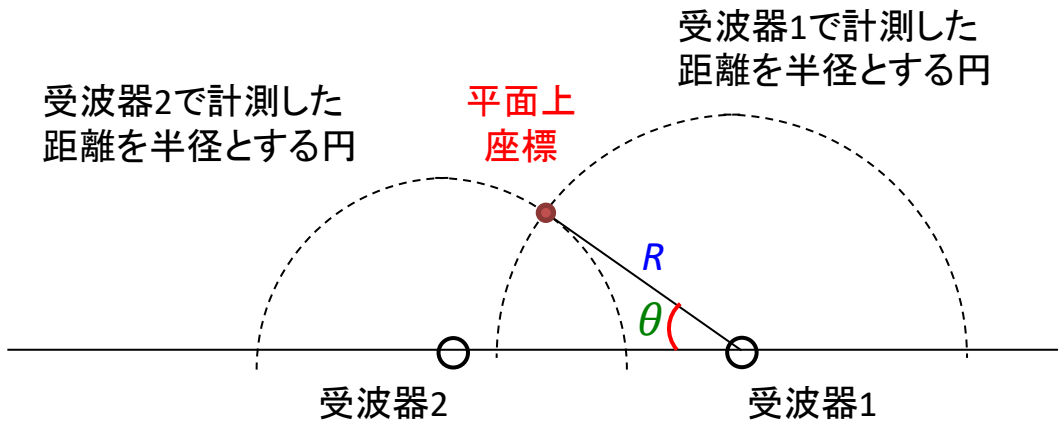
- 基準点からの相対的な距離や角度を音波で測る
 - LBL (Long Base Line)
 - SBL (Short Base Line)
 - USBL (Ultra Short Base Line)*



*SSBL (Super Short Base Line)とも呼ばれる

2次元・3次元座標計算

- 2次元座標
 - 基準位置からの距離を計測し、平面上の座標を計算
- 3次元座標
 - 手法1: 距離、方位角、仰角から座標計算
 - 手法2: 深度センサで取得した深度値を加えて方位角、距離、高さ位置から座標計算

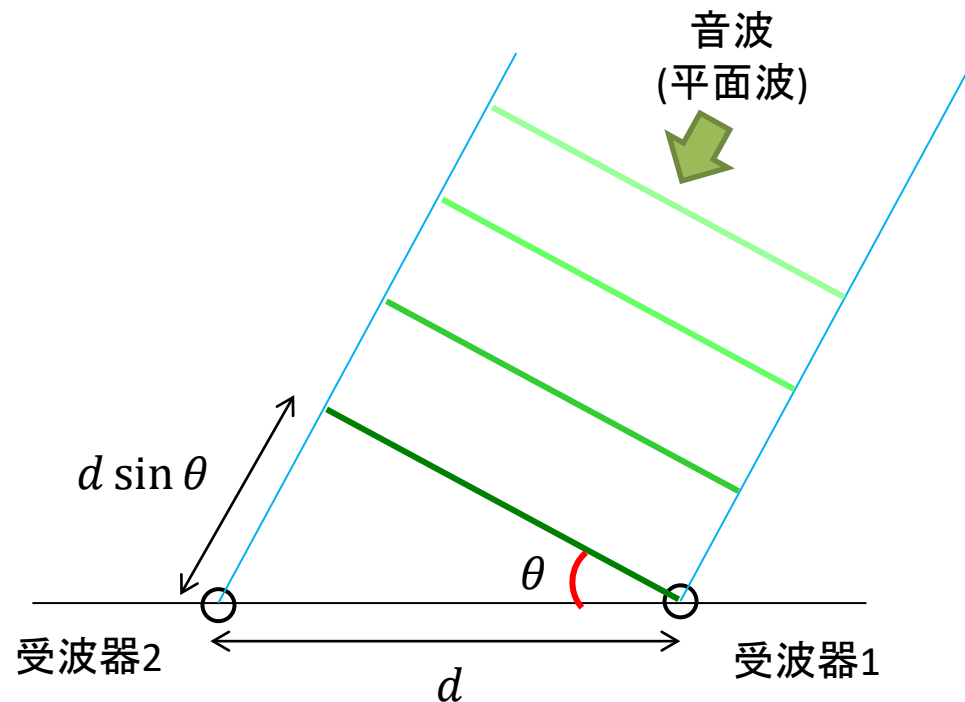


目次

- 音響測位の概要
- **USBL方式測位**
- SBL方式測位
- LBL方式測位
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

到来方向推定

- 複数の受波器に到達する音波から到達時間差(TDOA, Time Difference of Arrival)を計測
- 時間差を角度に換算



$$d \sin \theta = c \Delta t$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{c \Delta t}{d} \right]$$

c : 水中音速 [m/s]

d : アレイ間隔[m]

Δt : 到達時間差 [s]

時間差測定アルゴリズム(1)

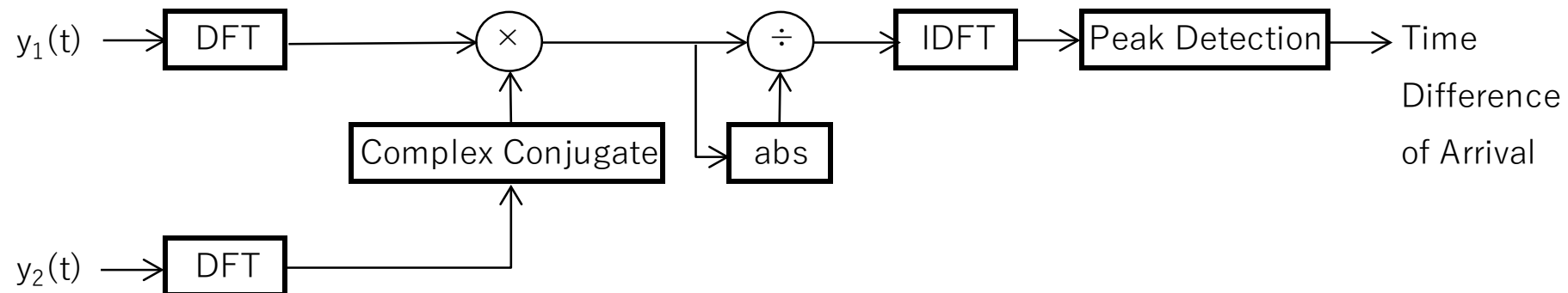
- 水深の浅い海域では音波反射に影響されやすい
- 音波反射と雑音の両方に強い手法(IR-GCC-PHAT) [1]を発表

	受信側での参照信号	音波反射耐性	雑音耐性
一般化相互相関関数 GCC-PHAT	不要	強	弱
整合フィルター MF	必要	弱	強
インパルス応答一般化 相互相関関数 IR-GCC-PHAT	必要	強	強

[1] Shingo Yoshizawa, "Underwater Acoustic Localization Based on IR-GCC-PHAT in Reverberant Environments," International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Vol. 15, pp.164-171, Mar. 2021.

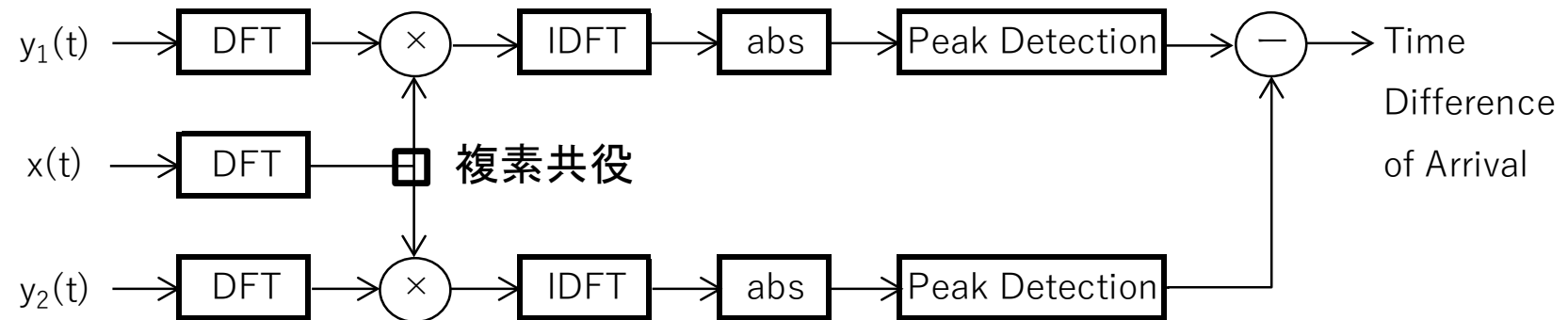
時間差測定アルゴリズム(2)

- 一般化相互相関関数(GCC-PHAT)
 - 2つの信号に対する相関スペクトルを求めてから白色化し、逆フーリエ変換から相互相関関数を求める
 - 相関関数ピーク位置から時間差を検出



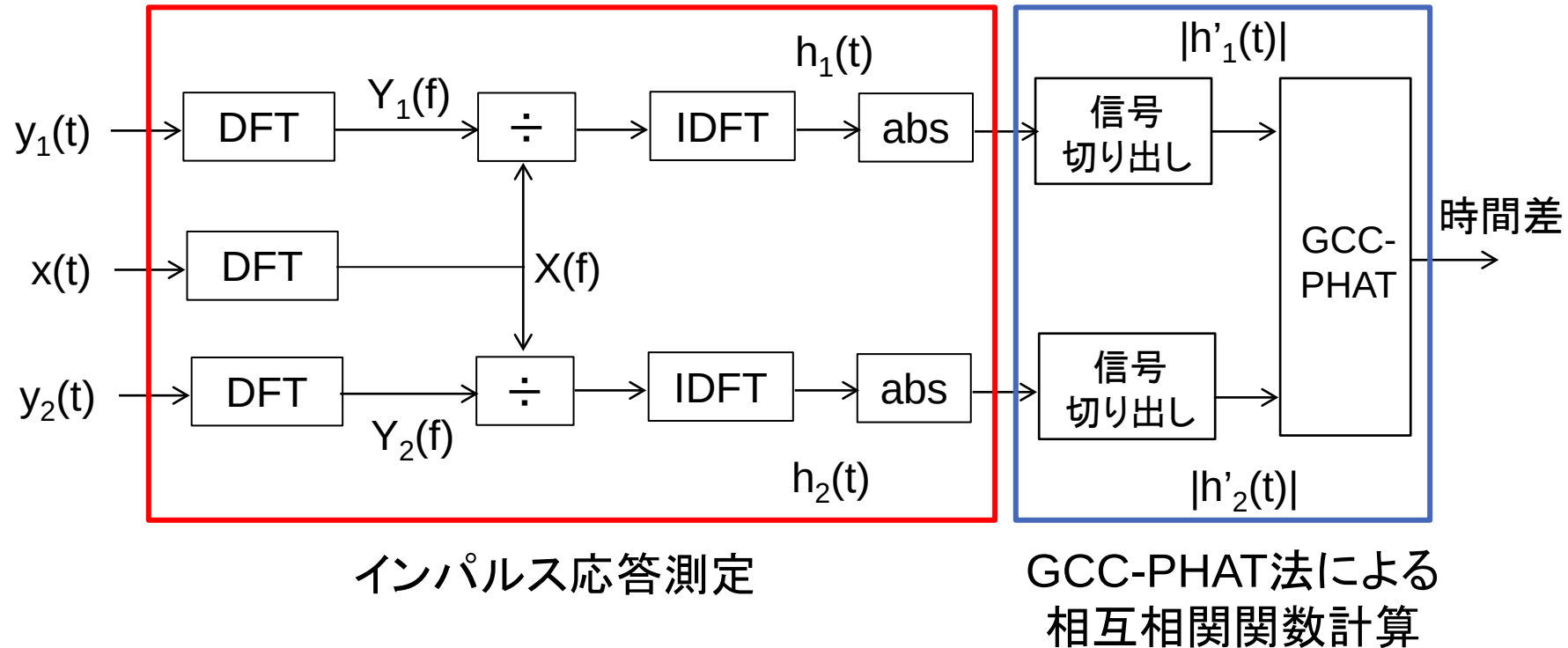
時間差測定アルゴリズム(3)

- 整合フィルタ (Matched Filter)
 - PN系列(M系列)のランダム信号を参照信号として使用する
 - 受信信号と参照信号の相関関数計算を行い、相関関数のピーク位置から2つの受信信号に対する到達時刻を求める
 - 到達時刻の差分を計算して到達時間差に変換



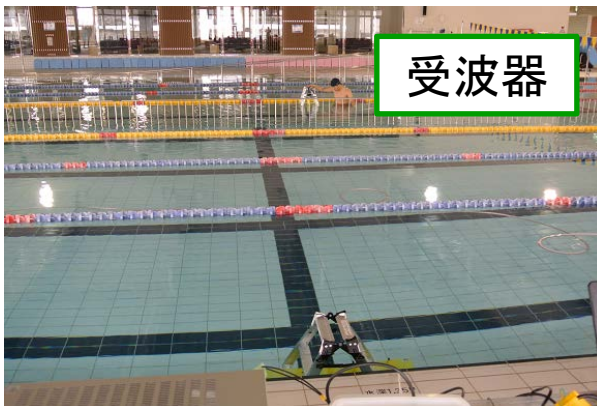
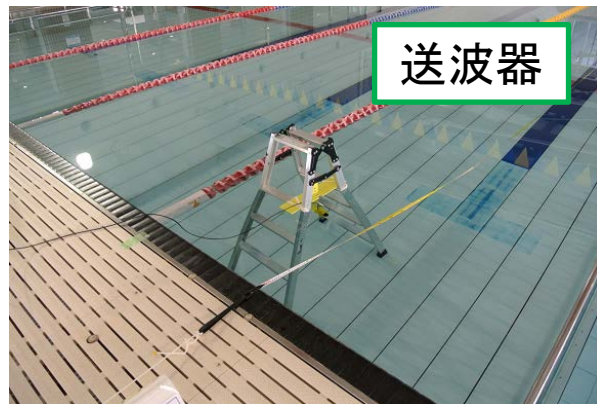
時間差測定アルゴリズム(4)

- インパルス応答一般化相互相関関数(IR-GCC-PHAT)
 - 前半部のインパルス応答測定はMF法の相関関数計算と同じ
 - インパルス応答測定後の波形に対してGCC-PHATを適用して時間差測定を行う

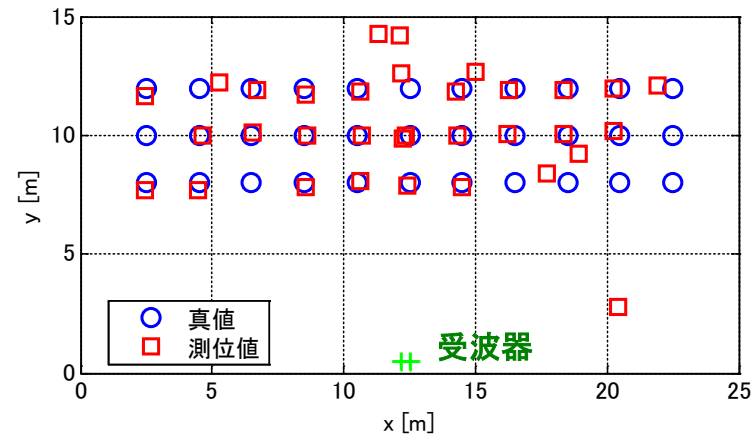


プールでの測位実験

- 最も劣悪(?)な環境での音響測位
 - 周囲壁からの音波反射も強く影響する

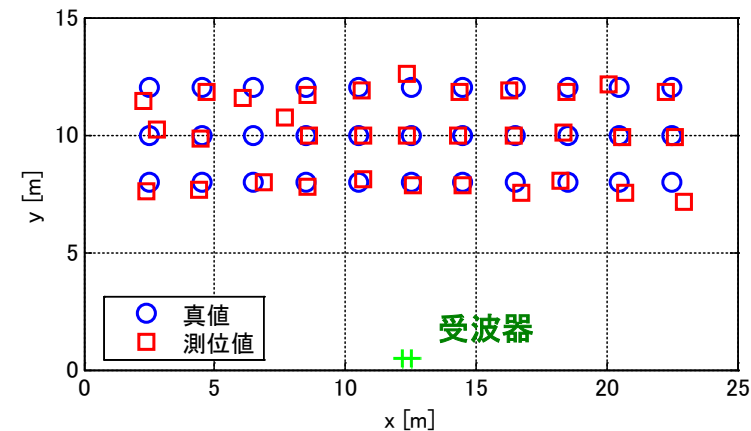


受波器間隔 0.3 m



従来方式
(GCC-PHAT)

誤差平均
1.63 m

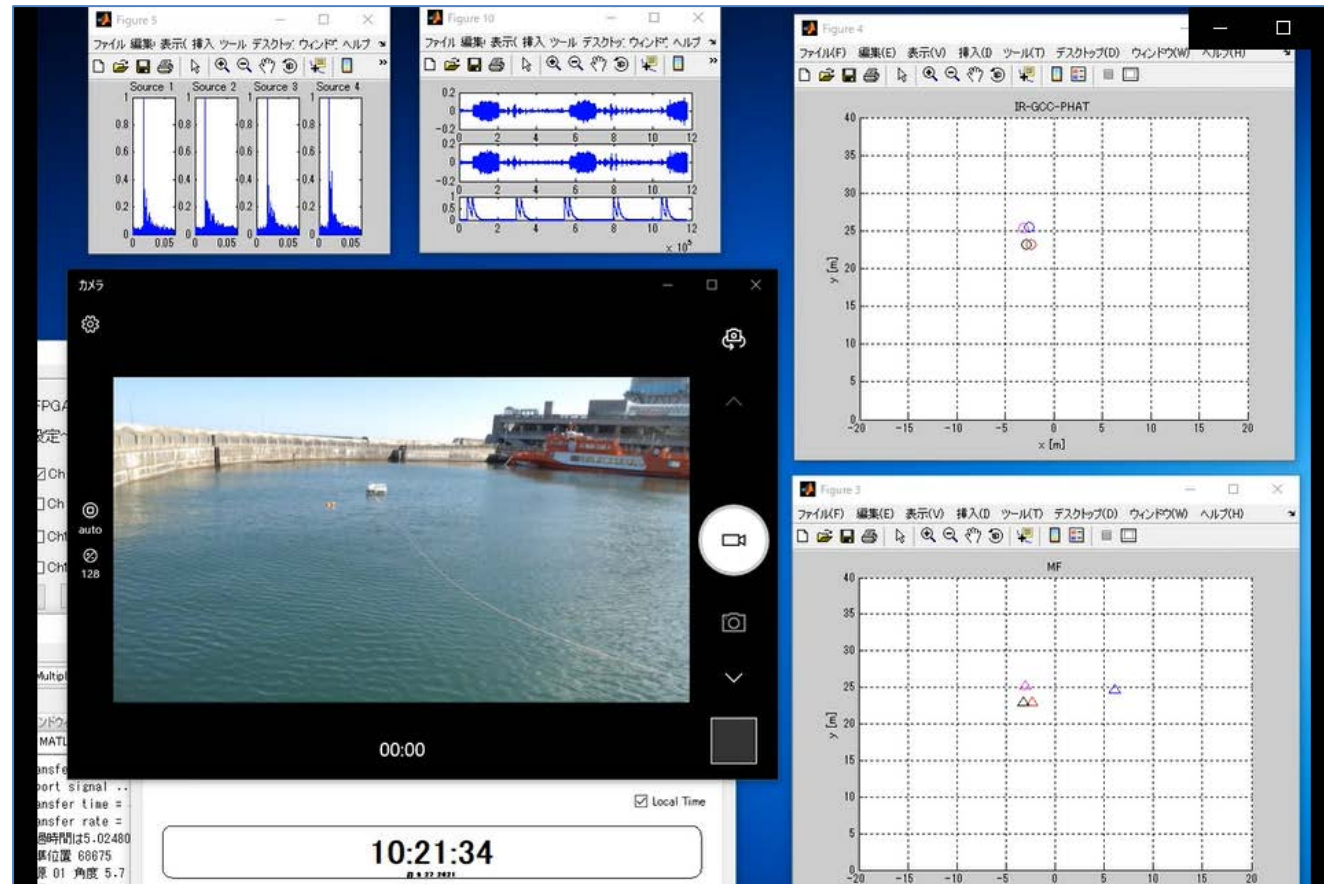


提案方式

誤差平均
0.34 m

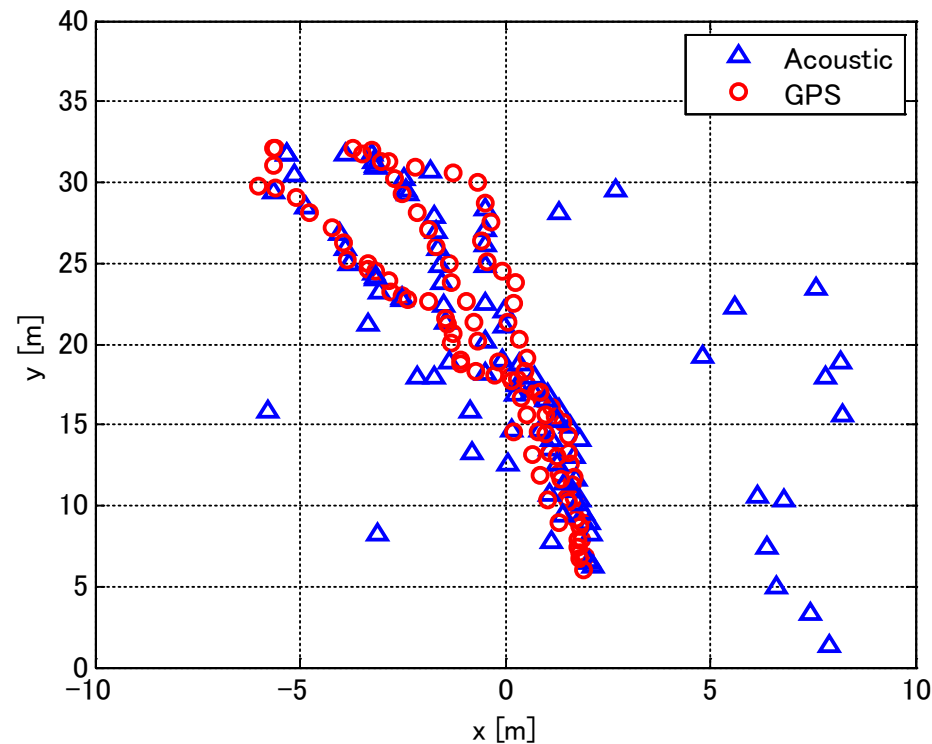
実海域での測位

- 2021年9月 北海道紋別市オホーツクタワー周辺で実施
- ゴムボートにGPSアンテナと音源を取り付けて測位位置を比較

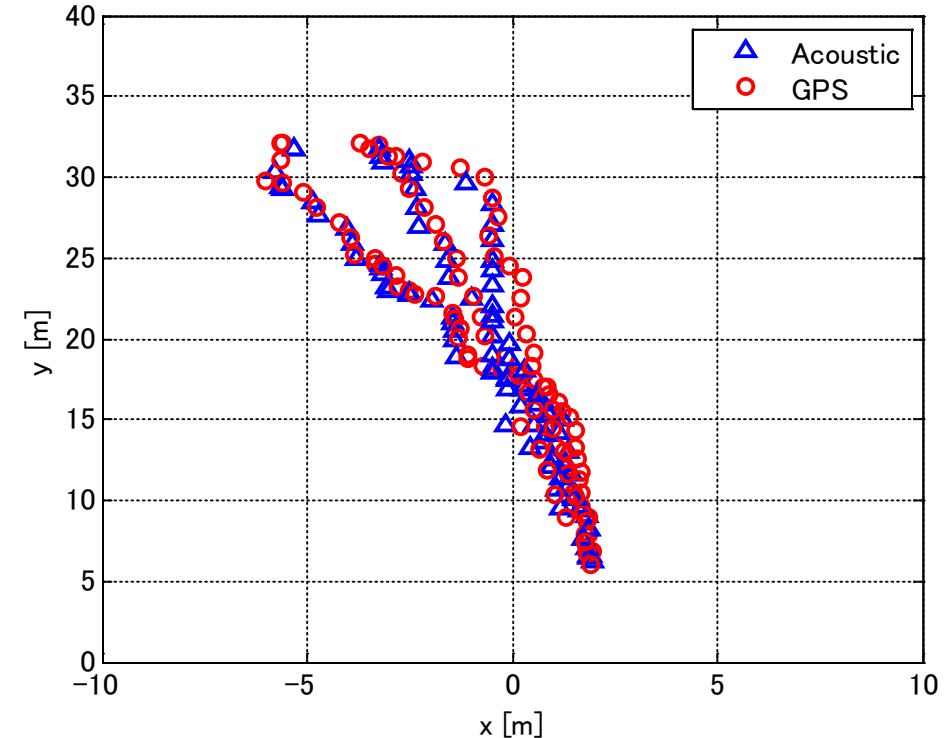


GPS位置との比較

- 提案法(IR-GCC-PHAT)は安定した音響測位を示す
 - 測位誤差はボートが静止した状態で0.2 ~ 0.4 m



従来法(MF)



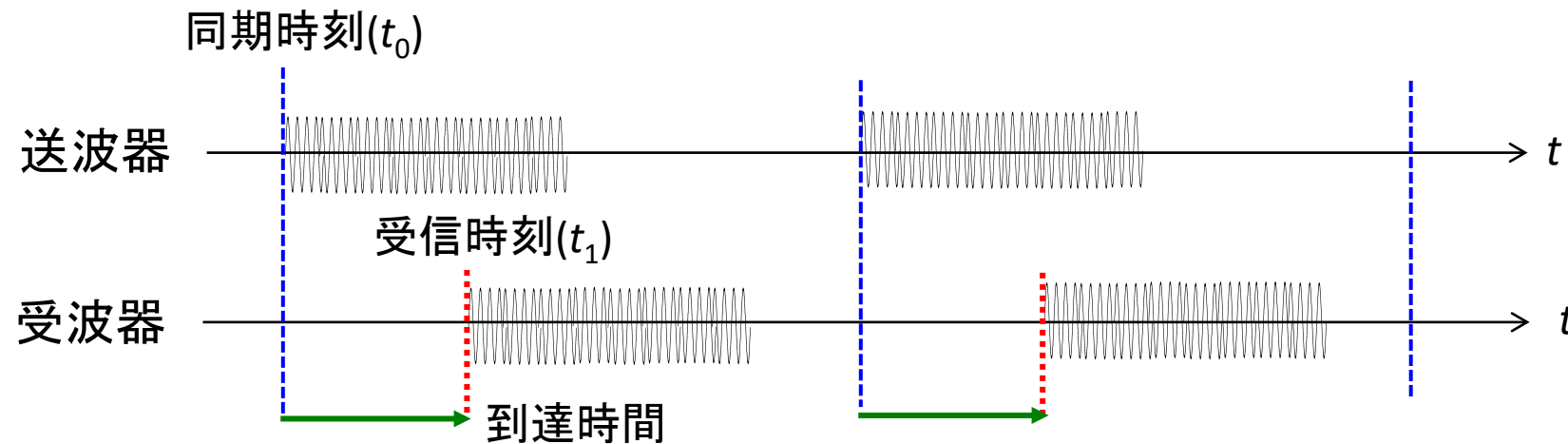
提案法(IR-GCC-PHAT)

目次

- 音響測位の概要
- USBL方式測位
- **SBL方式測位**
- LBL方式測位
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

距離計測

- トランスポンダ方式
 - 2点間の音波往復時間から距離を計測
- 同期信号方式
 - 送信側と受信側で時刻を合わせ、音波受信時刻から距離を計測
 - 送受信機間で同期信号を伝送する
 - GPS受信機から得られる秒タイミング(1PPS)を利用する

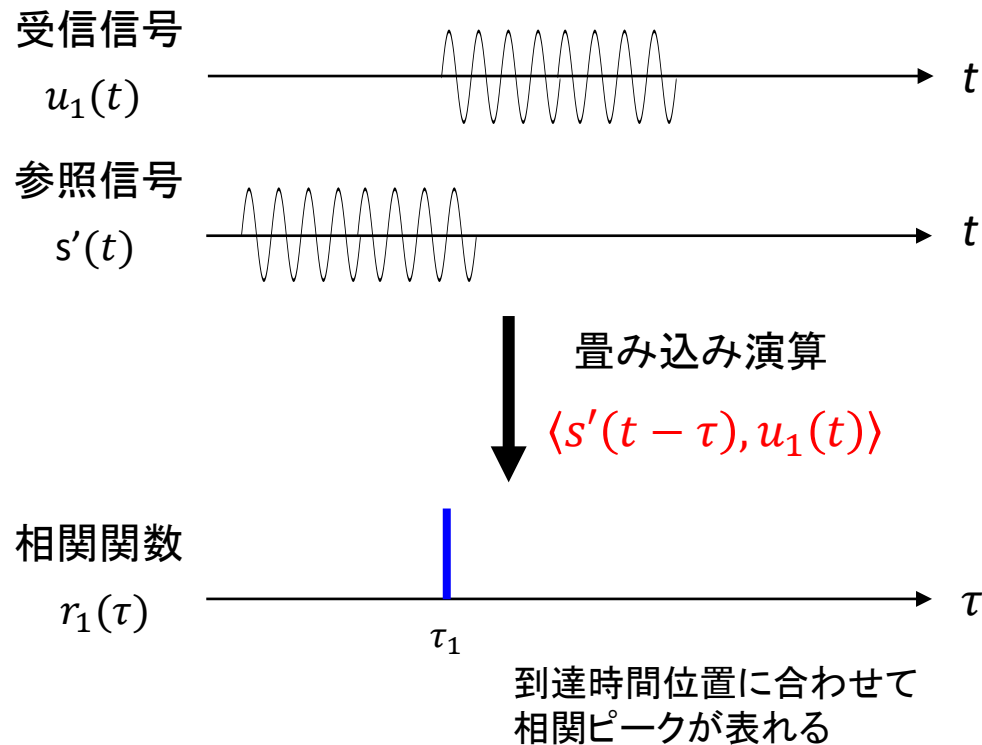


同期信号方式による距離計測

距離計測アルゴリズム(従来法)

- 受信信号と参照信号との相互相関関数を計算する
- 相関関数波形の振幅最大点から到達時間を検出

送信信号 $s(t)$ に対して
 $u_1(t) = s(t - \tau_1)$ であるとき、到達時間 τ_1 を求める



周波数領域での計算

フーリエ変換

$u_1(t) \rightarrow U_1(f)$

フーリエ変換

$s'(t) \rightarrow S'(f)$

複素共役を乗算

$$U_1(f) \overline{S'(f)} = \frac{U_1(f)}{S'(f)} |S'(f)|^2$$

逆フーリエ変換

$\frac{U_1(f)}{S'(f)} = e^{-jf\tau_1}$ 時間シフト則

$|S'(f)|^2 = 1$ とする

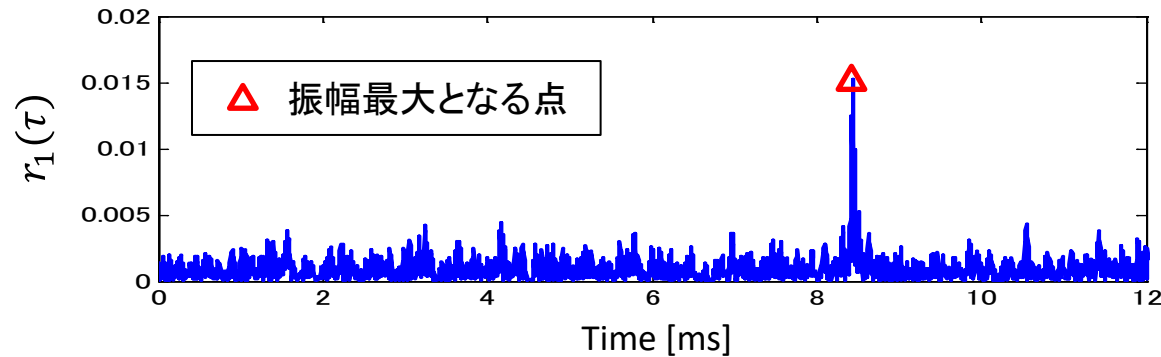
$\delta(t - \tau_1)$

高速フーリエ変換による計算量削減が可能

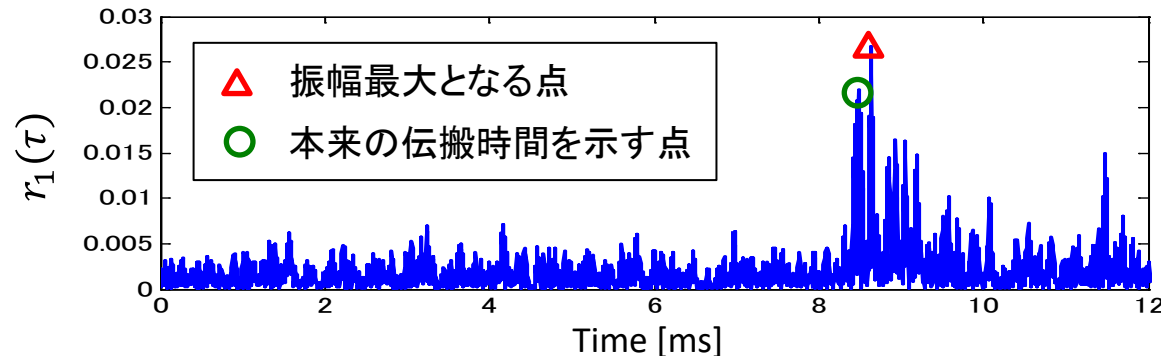
相関計算は伝搬路推定(インパルス応答測定や周波数領域チャネル等化)と同じ

音波反射の影響

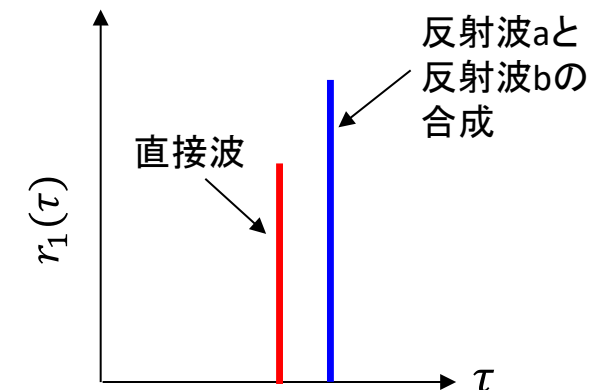
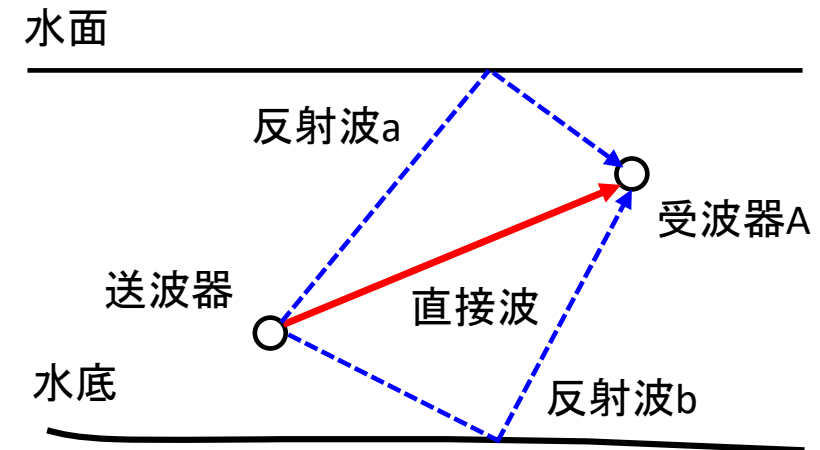
- 音波反射が強い環境下では距離計測に大きな誤差が生ずる場合がある
- 振幅最大となる点が必ずしも直接波の到達時間を示すとは限らない



(a) 音波反射なし

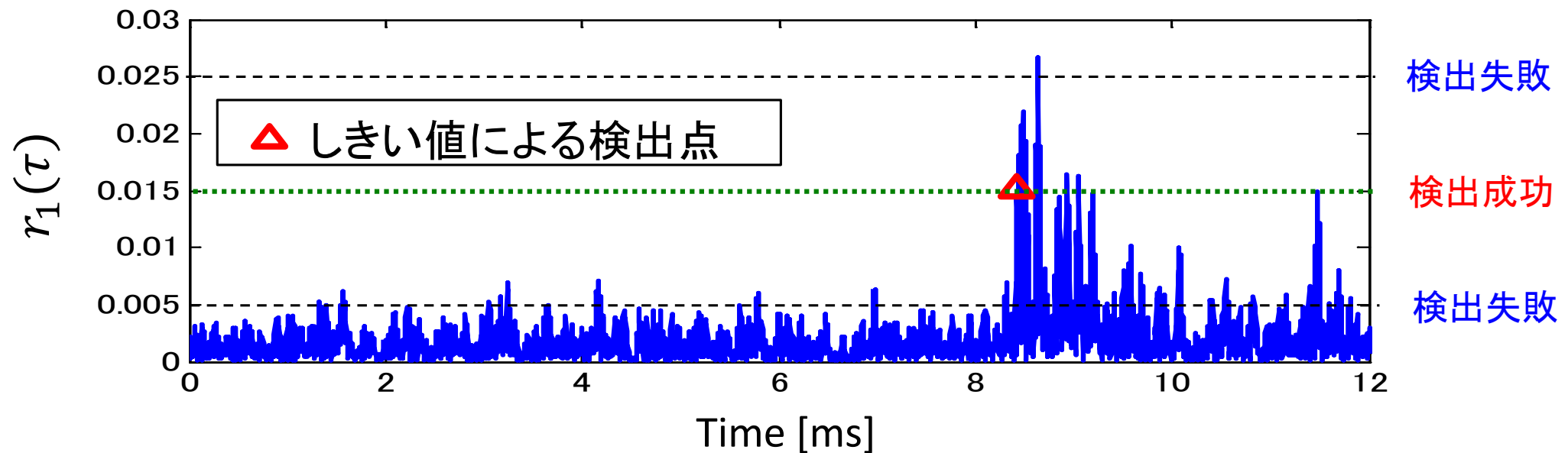


(b) 音波反射あり



しきい値による距離計測

- 反射波に由来する相関ピークが直接波より大きい場合でも正しい時間位置を検出
- しきい値の設定方法に課題がある



繰り返し可変しきい値による距離計測 [2]

- 相関関数波形の振幅平均をしきい値に加える(雑音対策)
- 2次元座標から算出した方位角と平面波を仮定としたときの到来角を比較して類似していれば繰り返し処理を終了する

可変しきい値設定

$$\gamma_1 = 0.3q + \sum_{n=0}^{N-1} r_1(nT) / N$$

$$\gamma_2 = 0.3q + \sum_{n=0}^{N-1} r_2(nT) / N$$

方位角

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y_T - y_R}{x_T - x_R}$$

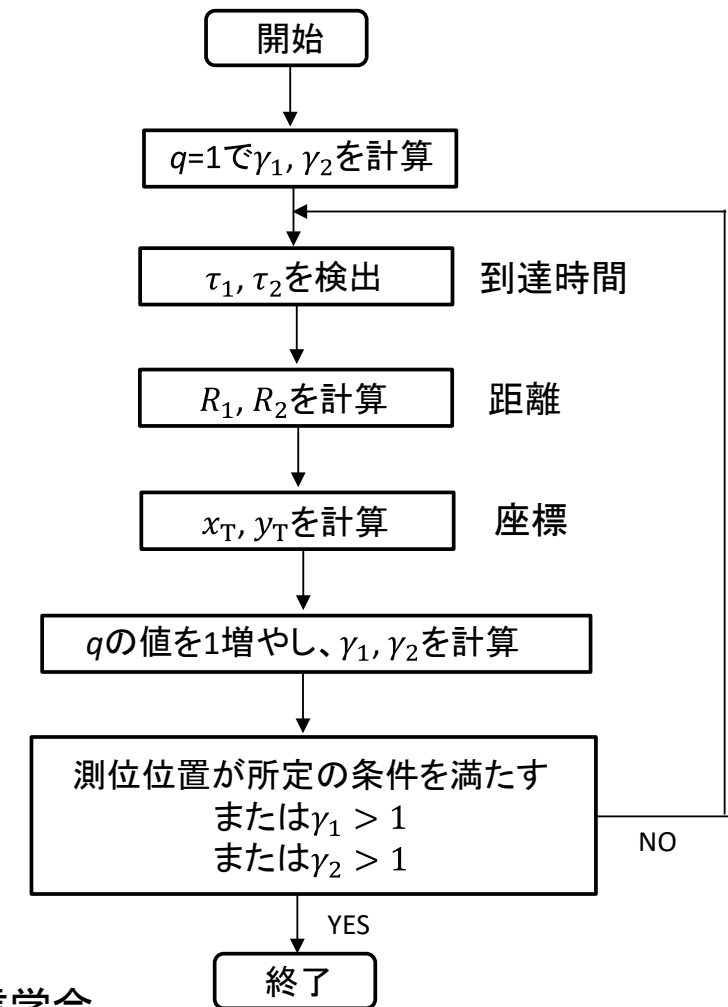
(x_T, y_T) : 音源座標

(x_R, y_R) : 基準受波器座標

到来角

$$\approx \theta = \sin^{-1} \left[\frac{c\Delta t}{d} \right]$$

受波器に平面波が到達することを前提とする
ので精度は劣るが検証には利用できる



測位精度比較

- 北見市市民温水プールで測位試験を実施
- 幅25m, 奥行15m, 水深1.35 m
- 音波反射率 水面1, 壁 0.7 (推定値)

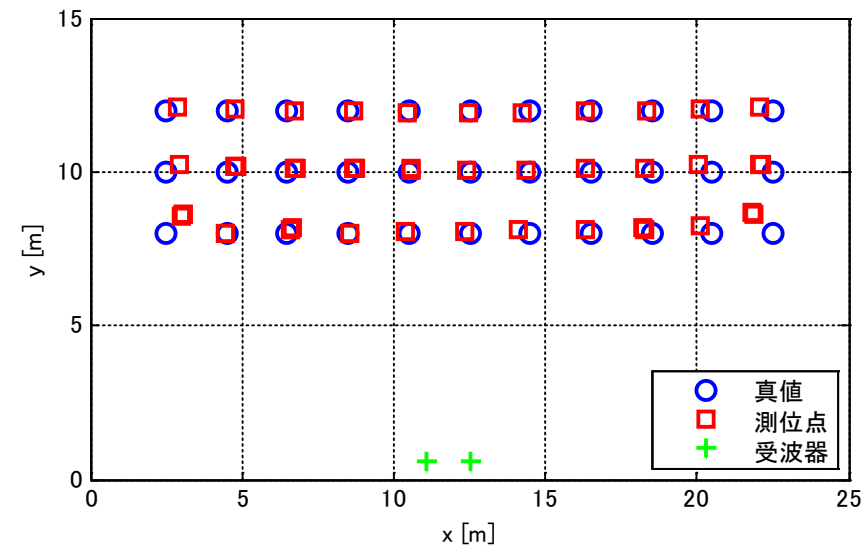
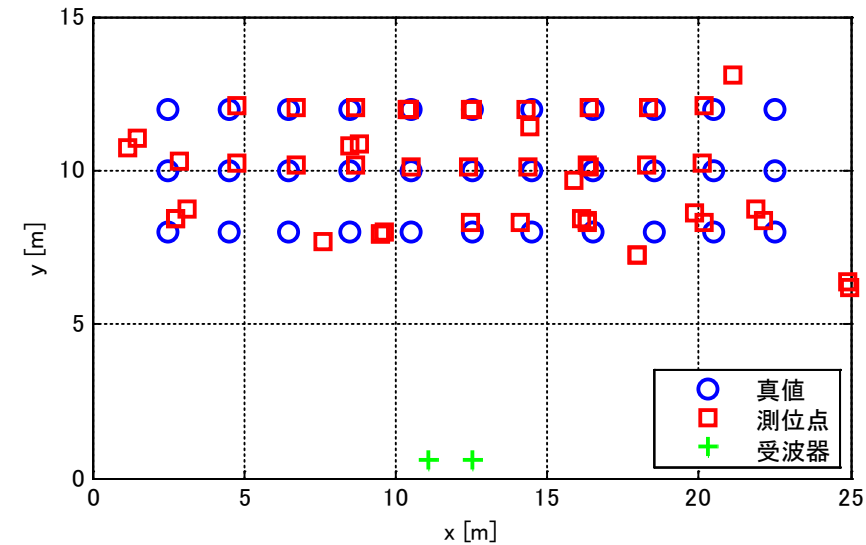
サンプリング周波数	200 kHz
送信信号周波数	12 kHz – 32 kHz
送信信号長	82 ms
受波器間隔	1.4 m
音源・受波器高さ位置	0.8 m 共通
SN比	10 dB



音源(送波器)



受波器



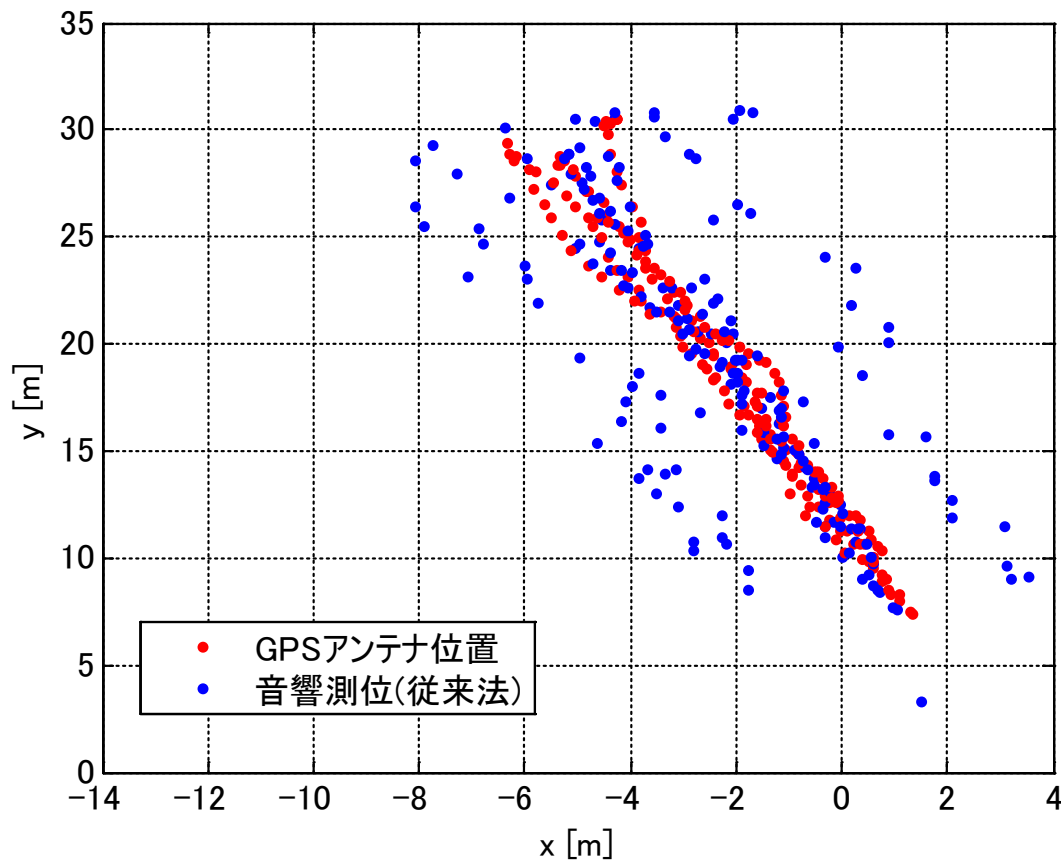
実海域での測定

- 2022年8月 北海道紋別市港湾海域で実施
 - ゴムボートに送波器とGPSアンテナを取り付けて測定
 - みちびきCLAS対応GNSS受信機を使用(センチメートル級測位)

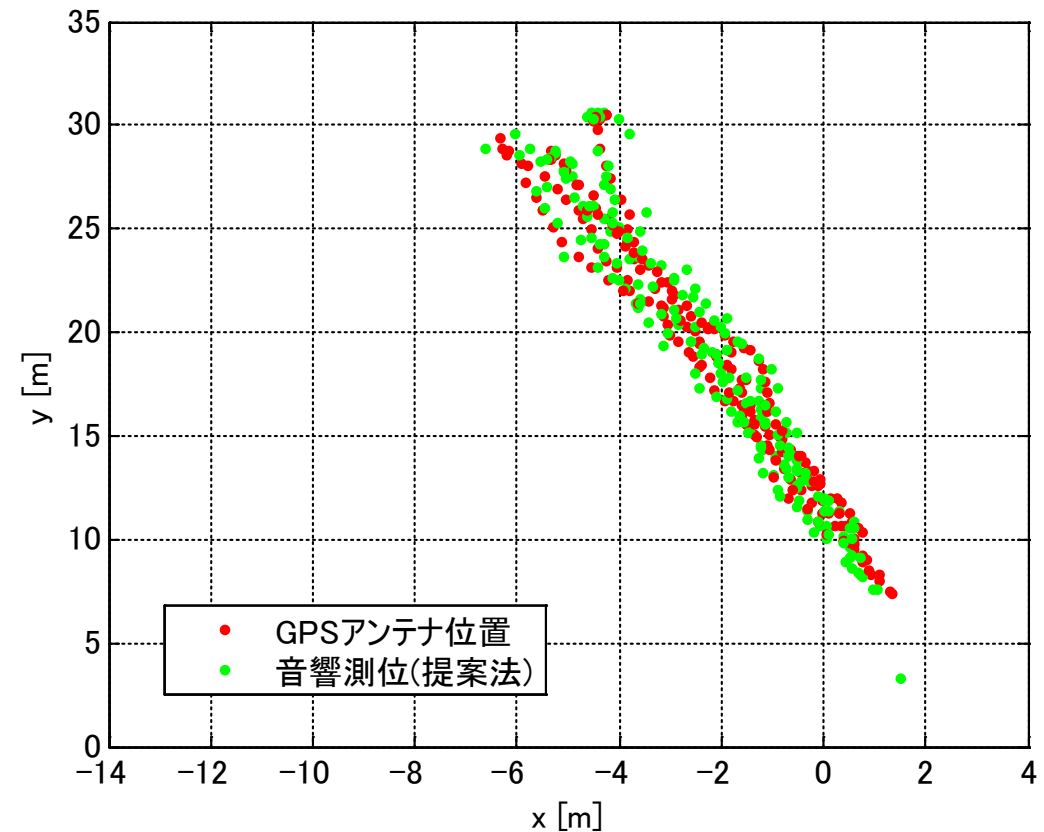


測位結果

- ゴムボートを往復移動させて計測
- GNSS受信機で取得した緯度・経度を測位座標系に変換



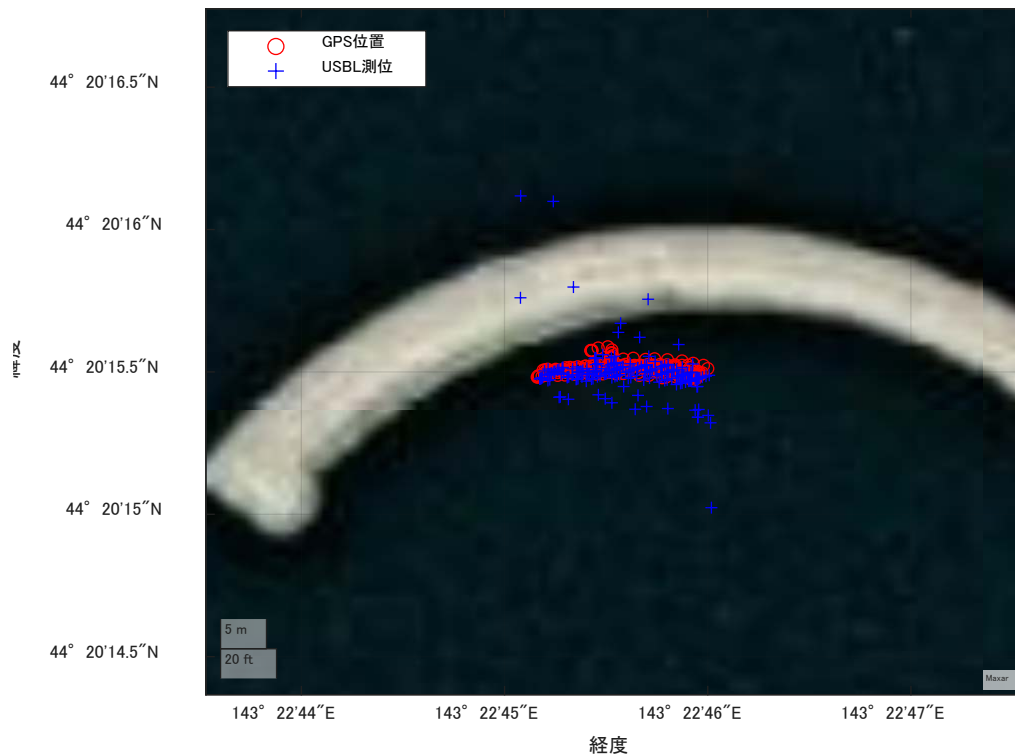
従来法 誤差平均 1.38 m



提案法 誤差平均 0.31 m

USBL方式とSBL方式の比較(1)

- USBL方式(IR-GCC-PHAT法)とSBL方式 (可変しきい値法)との測位精度比較
- GPS受信機で取得した緯度・経度と測位位置を比較



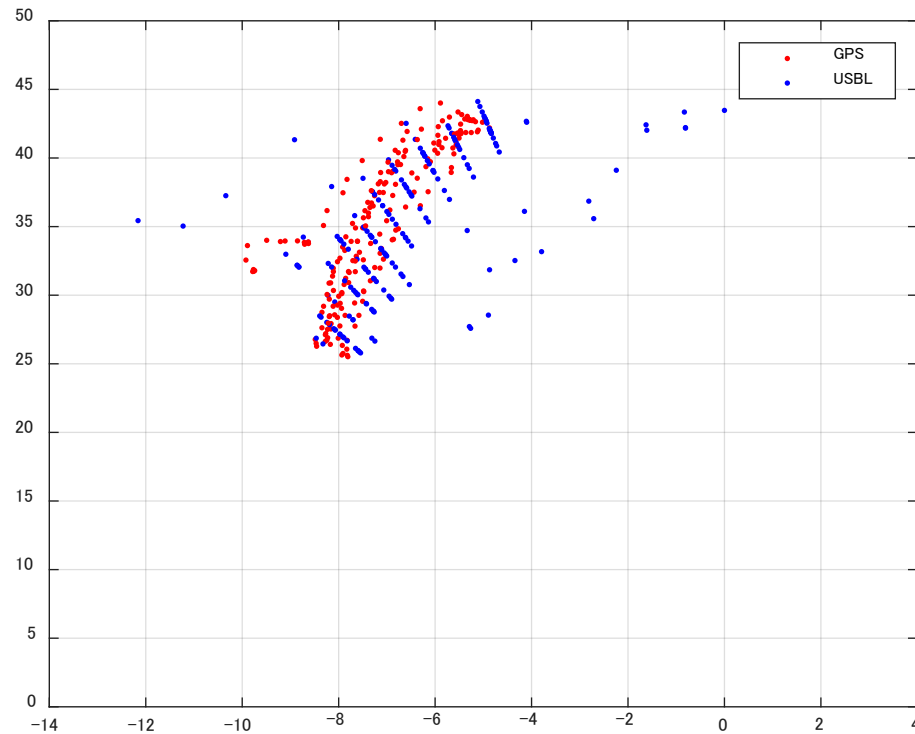
USBL方式



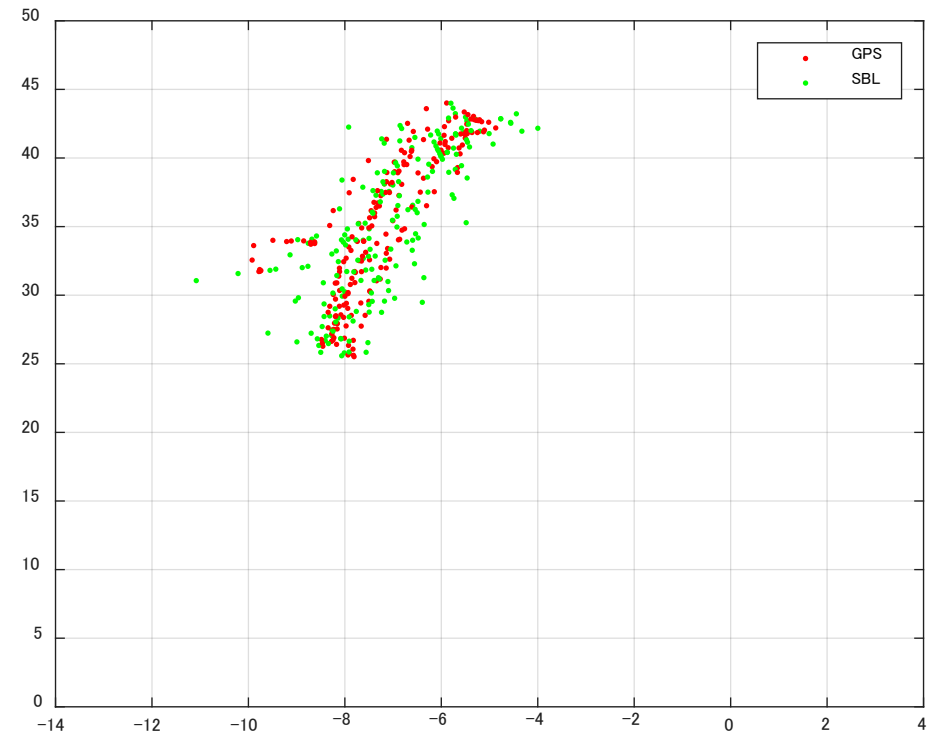
SBL方式

USBL方式とSBL方式の比較(2)

- USBL方式は音源が遠方にあるとき角度分解能に応じた粗さが見える
- 受波器間隔が大きいほど測位精度(角度分解能)が上がる



USBL方式 誤差平均 1.33 m



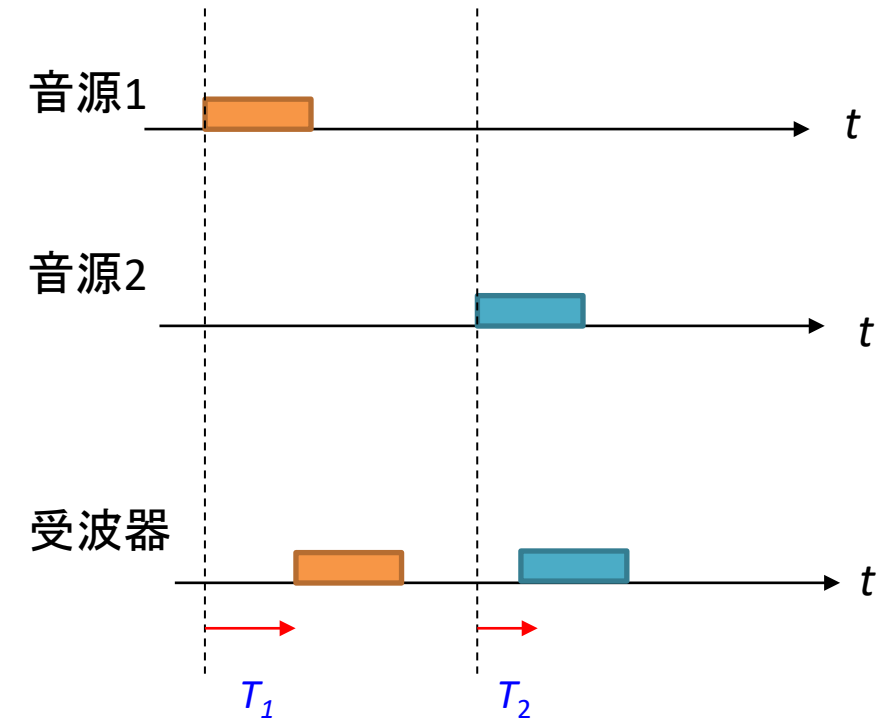
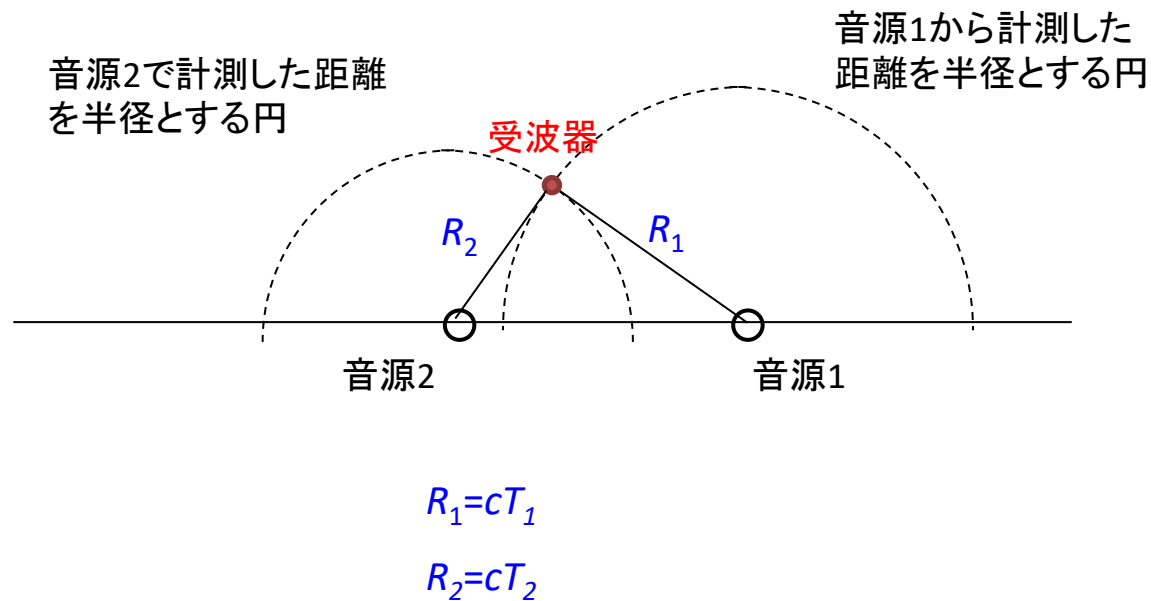
SBL方式 誤差平均 0.31 m

目次

- 音響測位の概要
- USBL方式測位
- SBL方式測位
- **LBL方式測位**
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

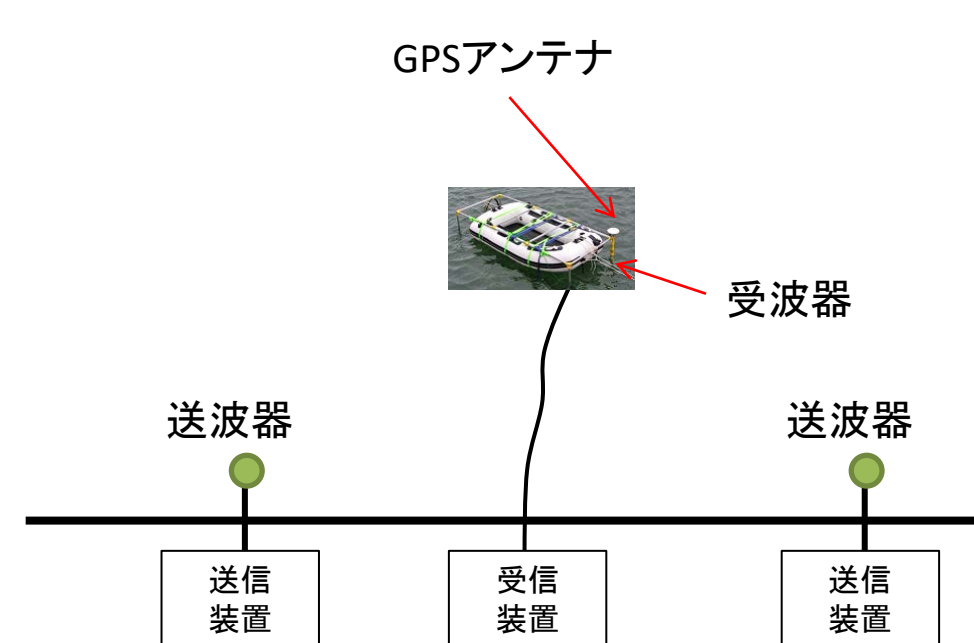
LBL方式測位

- 音源毎に異なる測位信号を割り当てる
- 複数の音源位置を既知とし、音源・受波器間の距離を計測する
- 距離計測はSBL方式で用いた可変しきい値法を用いる



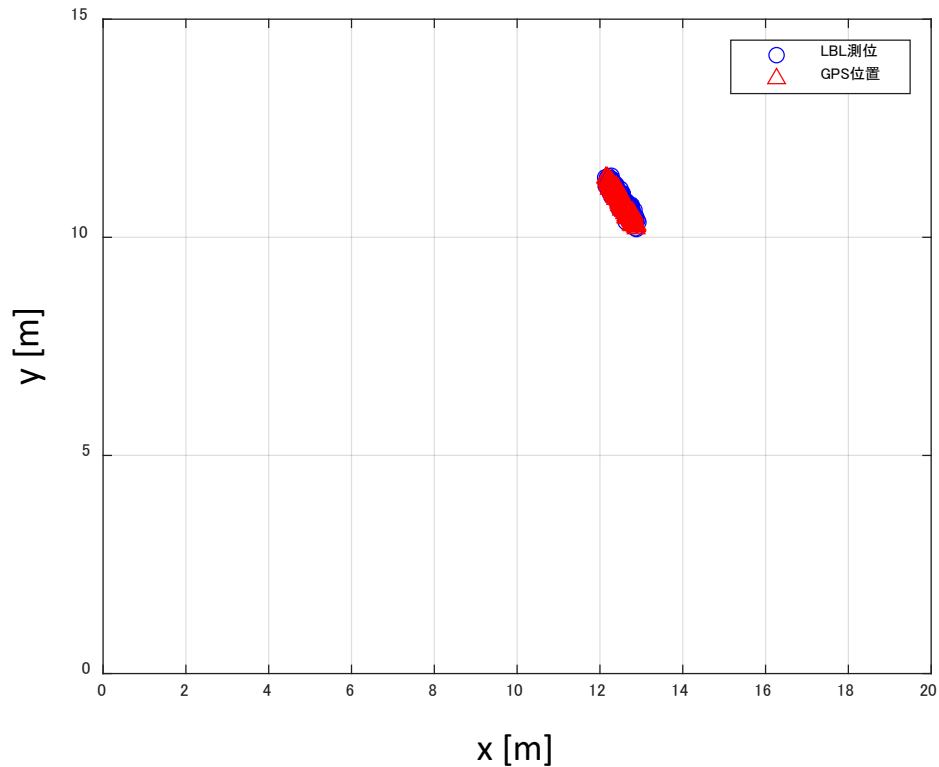
実海域での測定

- 2022年8月北海道紋別市港湾海域で実施
- 送波器2個を離れた位置(間隔20m)に設置
- 受波器, GPSアンテナをゴムボートに取り付ける



測定結果(1)

- ゴムボートを静止させた場合
- 計測時間 44分 (データ数400)



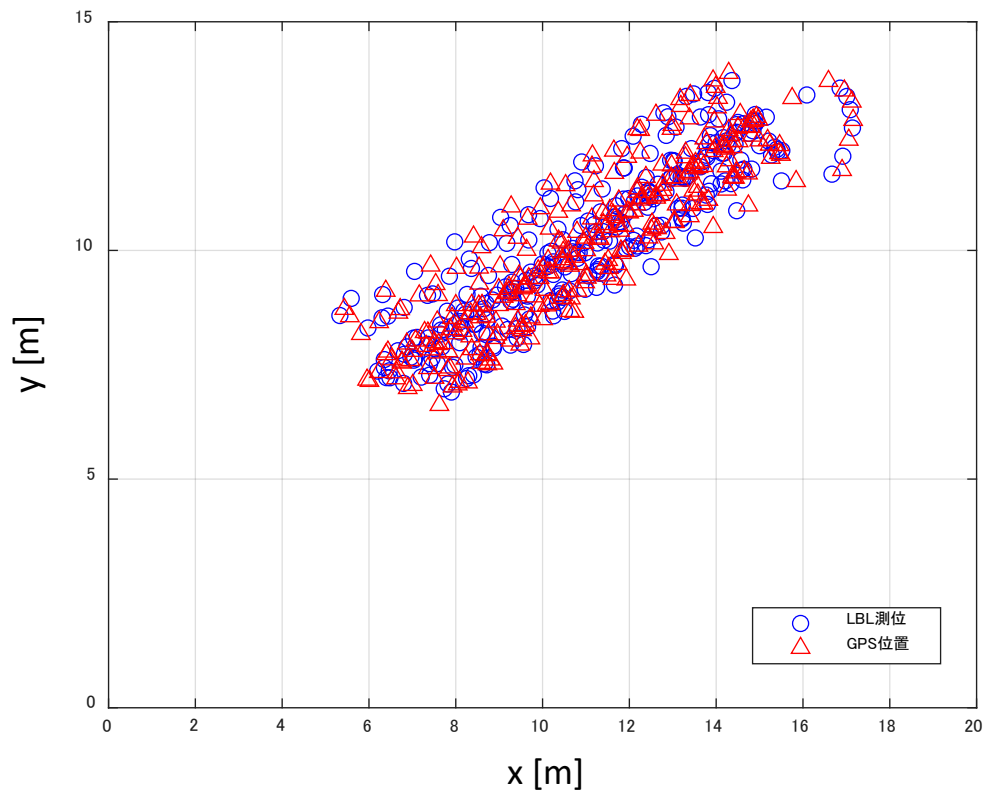
LBL方式測位 誤差平均 0.096 m



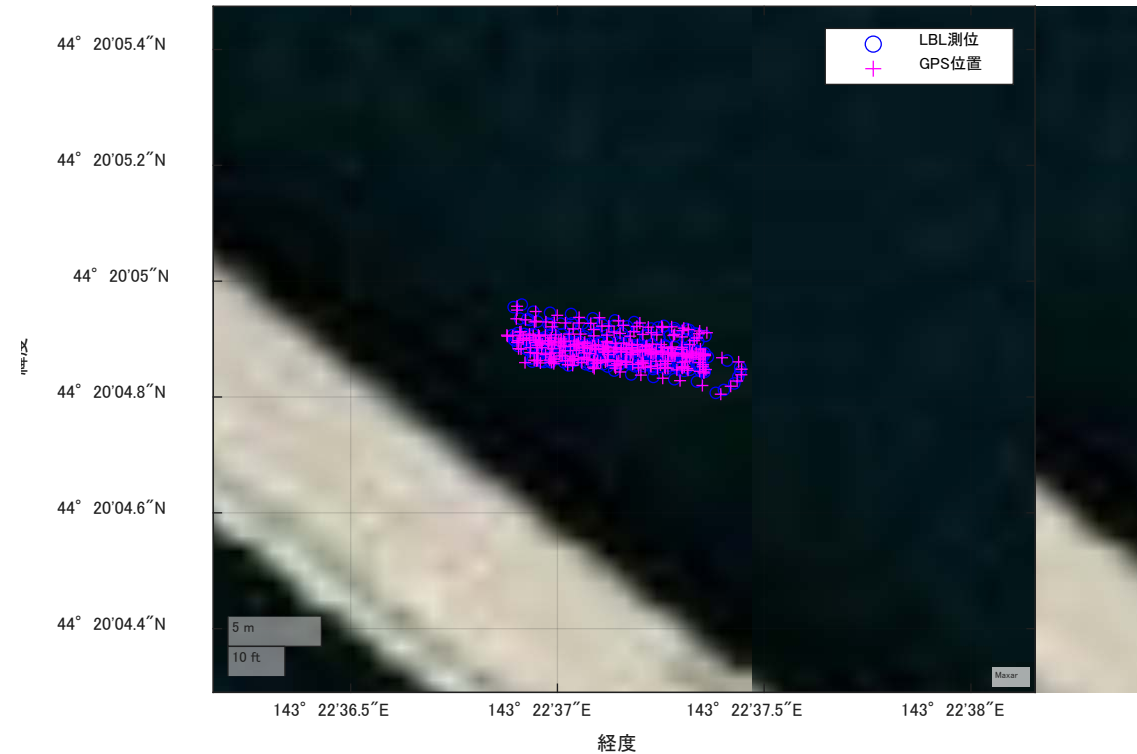
緯度・経度プロット

測定結果(2)

- ゴムボート移動させた場合
- 計測時間 29分 (データ数300)



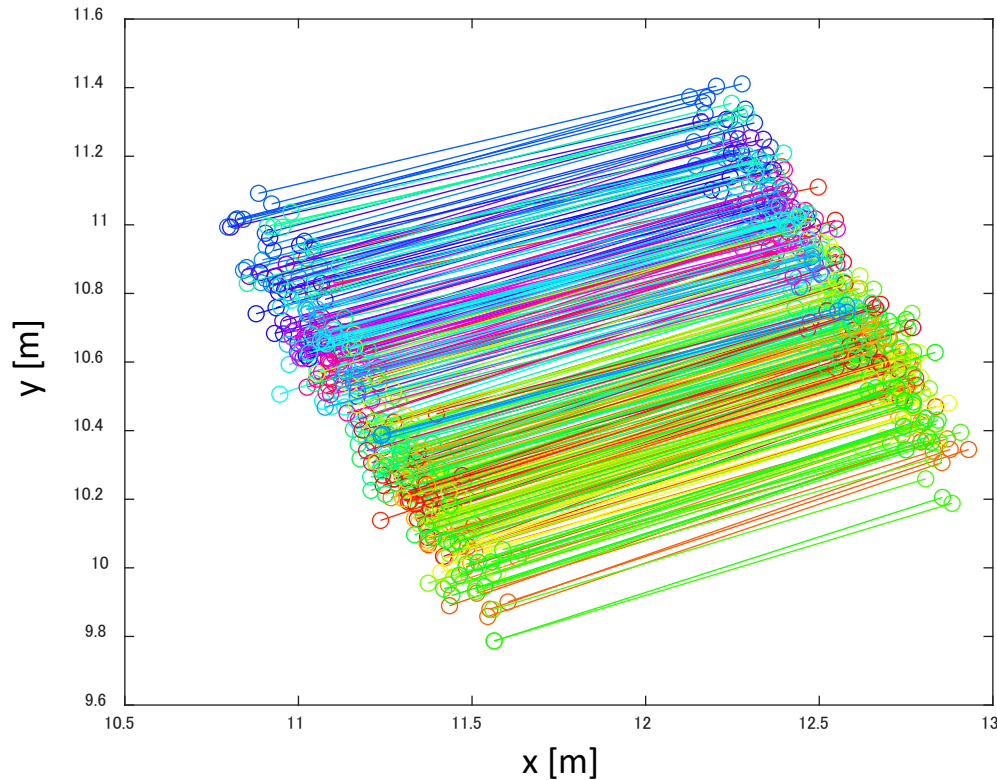
LBL方式測位 誤差平均 0.24 m



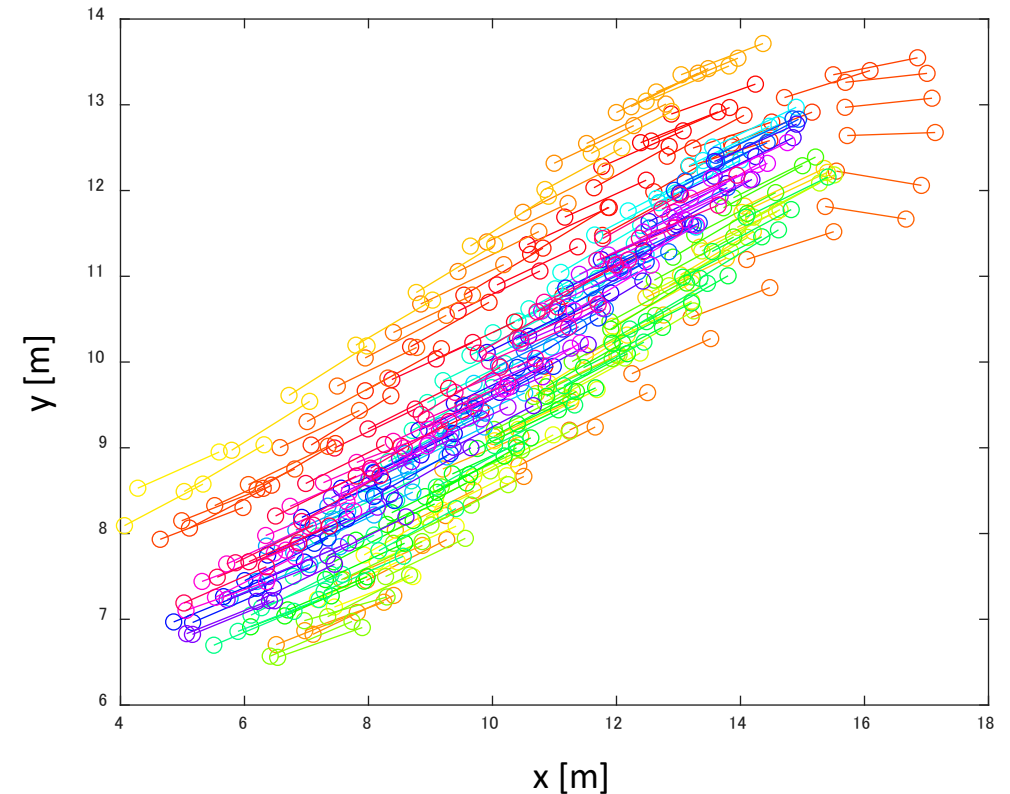
緯度・経度プロット

試験結果(3)

- 受波器2個(間隔1.4m)の位置をプロット
- ゴムボートの向きも正確に把握することが可能



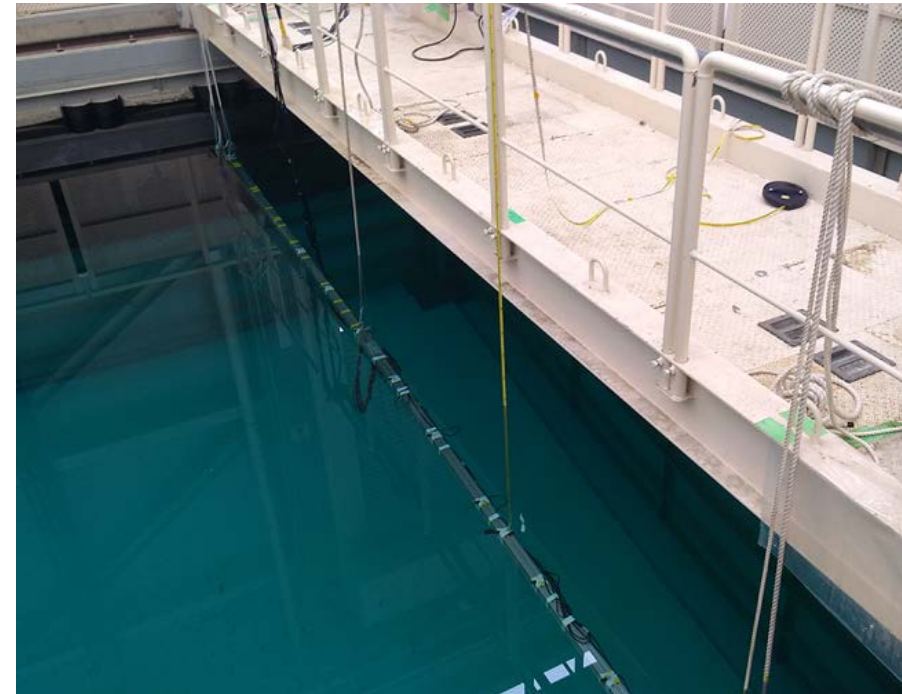
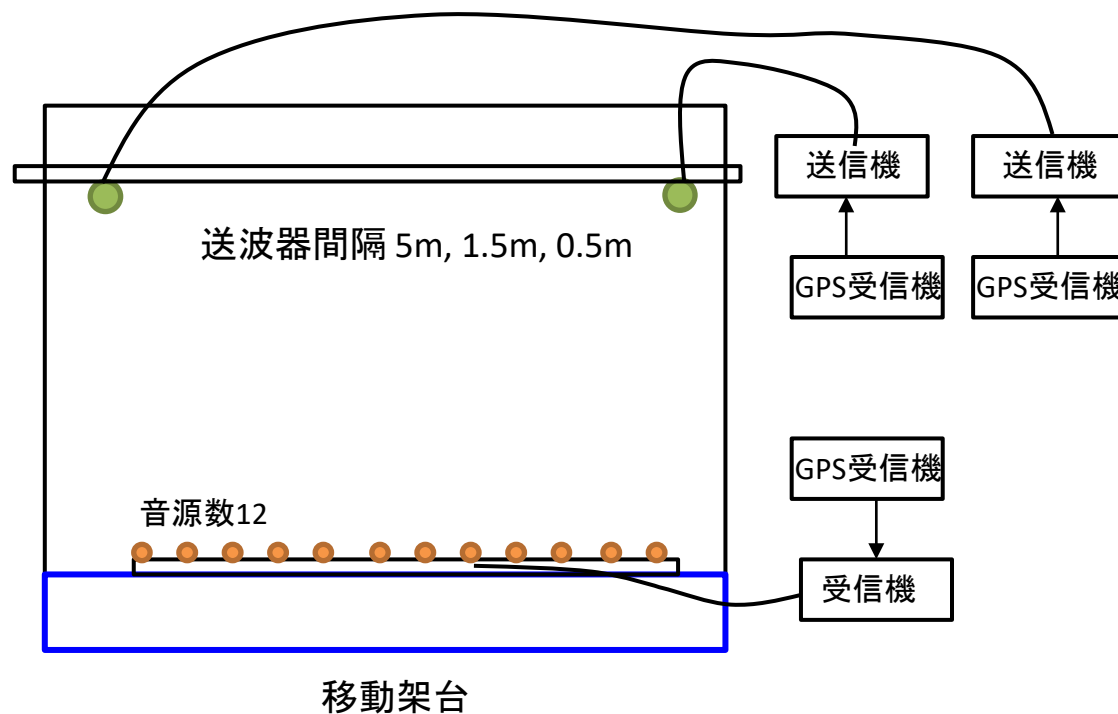
静止観測時



移動観測時

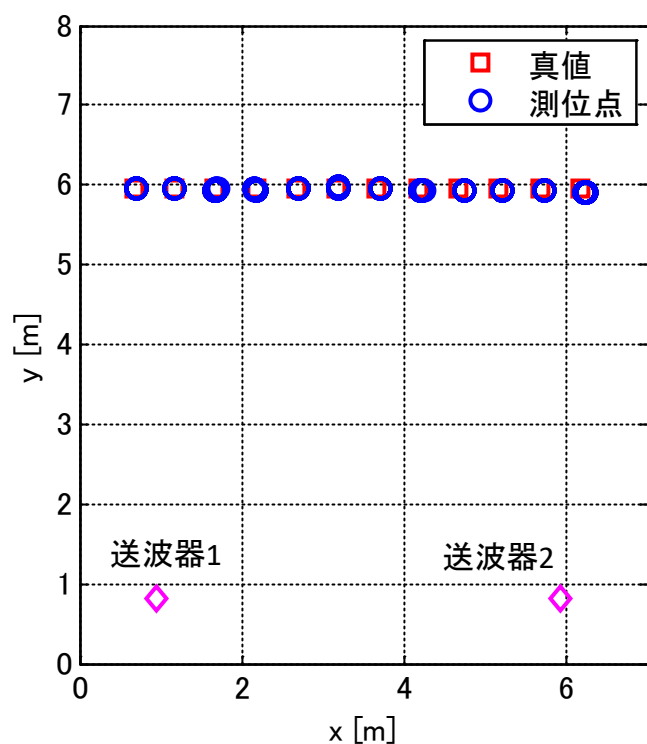
水槽での測定

- 2022年9月に栃木県那須塩原市 五洋建設技術研究所水槽で測位試験を実施
- 幅7m, 奥行8m, 水深4.4 m
- 送波器間隔を変えて受波器12個に対する測位誤差を評価
 - 送波器間隔が狭い場合はiSBL (inverted SBL)やiUSBL (inverted USBL)方式測位と呼ぶ



測定結果

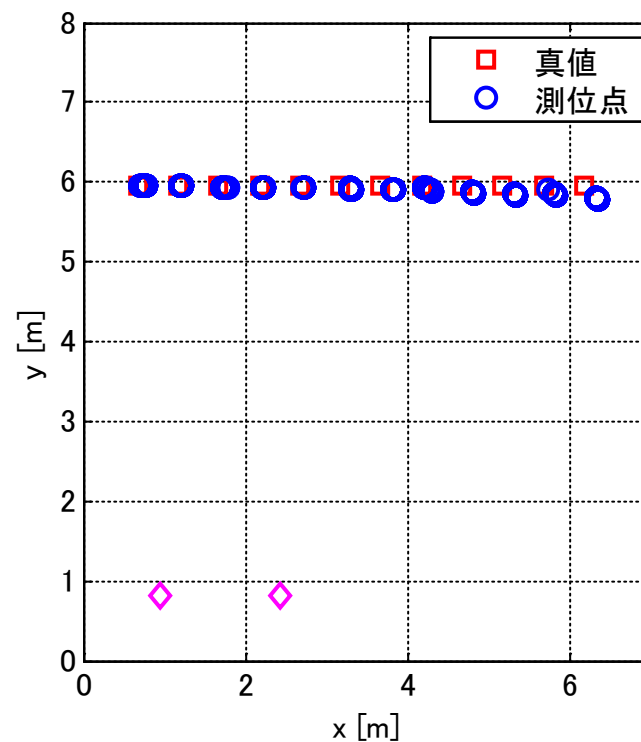
- 送波器、受波器位置を水面下2mに固定
- 送波器間隔に応じた測位精度が得られることを確認



LBL方式

送波器間隔 5m

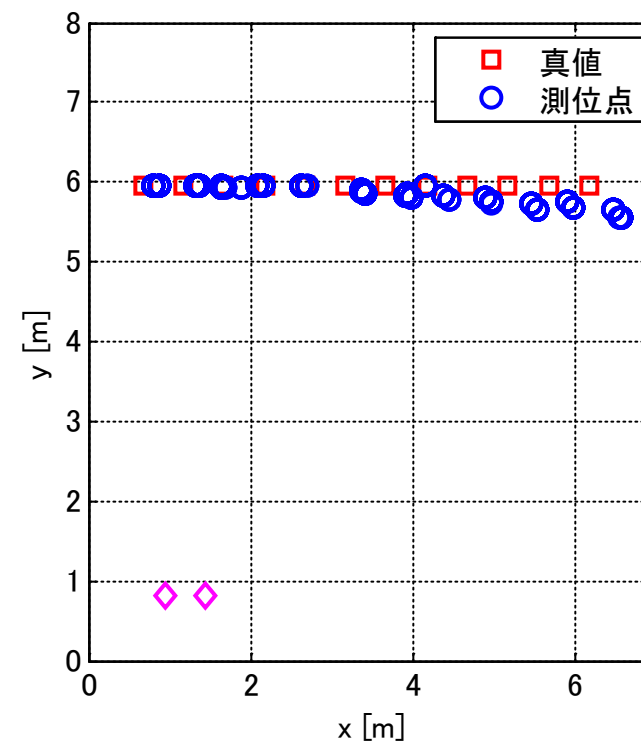
測位誤差平均 0.04 m



iSBL方式

送波器間隔 1.5m

測位誤差平均 0.12 m



iUSBL方式

送波器間隔 0.5m

測位誤差平均 0.22 m

目次

- 音響測位の概要
- USBL方式測位
- SBL方式測位
- LSL方式測位
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

水中ロボット搭載型音響測位装置の開発

- 小型水中ロボットに適した音響測位システム
 - 方位角, 距離, 深度で3次元位置を特定
 - 水中ロボットの機能(深度センサ)を利用する

	測定対象	送波器数	受波器数	備考
従来方式	仰角, 方位角 距離	1	3~4	トランスポンダ方式により 音の往復時間から距離を計測
提案方式	方位角 距離 深度	1	2	深度センサで高さ位置情報を取得 同期信号方式により音の片道時間から距離 を計測

深度センサの精度

- Bar30深度センサのカタログ上相対精度は 204 cm
- 遊泳用プールで実際に測定

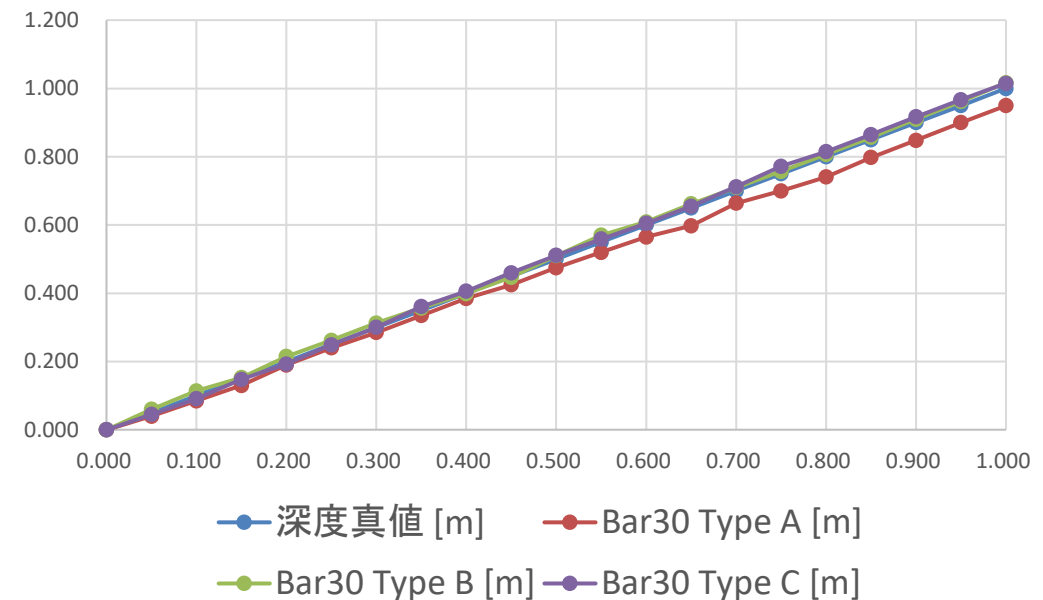
Bar30深度センサ USBリピータケーブル



Arduinoマイコン



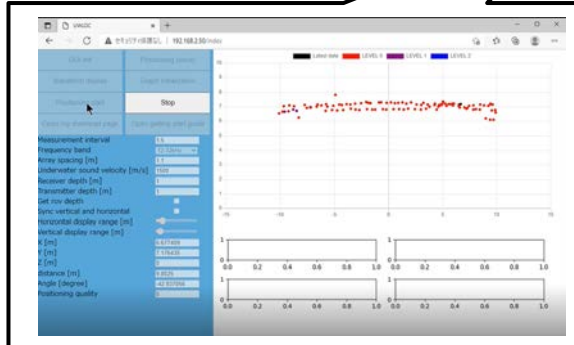
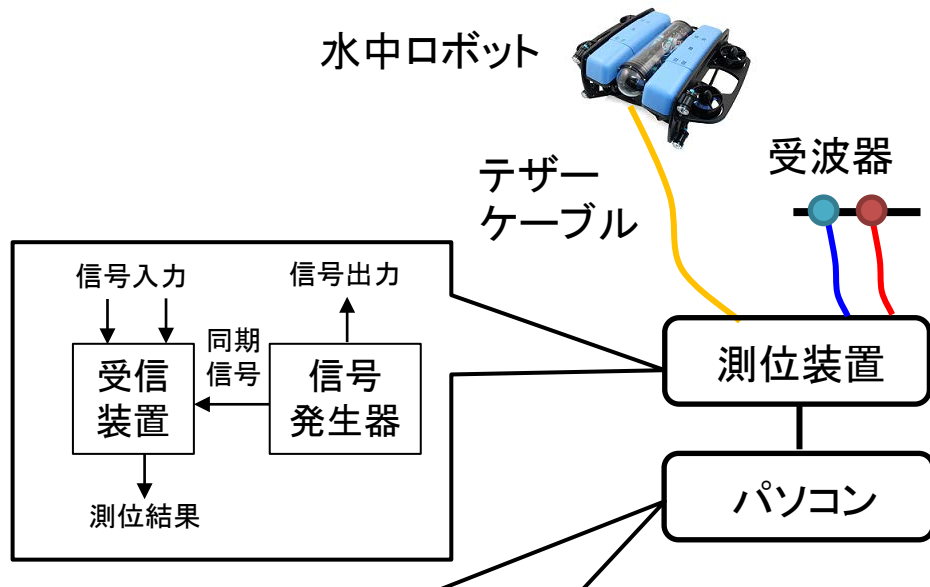
水面からの深度比較 (キャリブレーション後)



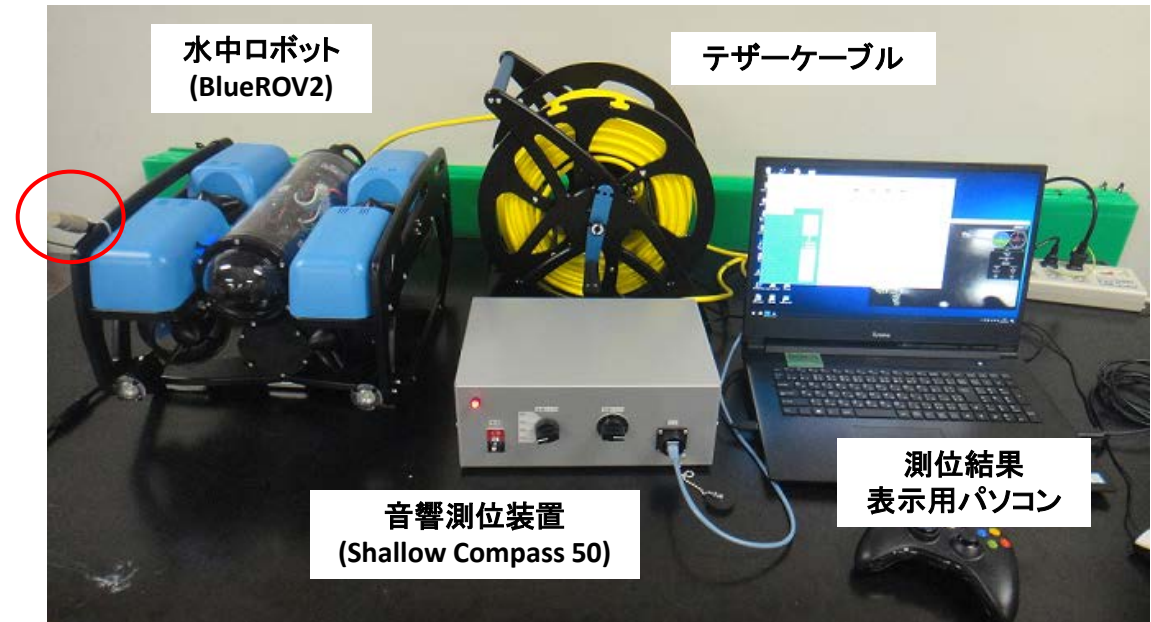
オフセット誤差(水面下15cm程度)を補正する必要があるが
キャリブレーション後の誤差平均は1~3 cm

音響測位装置の構成

- 送波器を水中ロボットに取り付ける
- テザーケーブルを介して測位信号を送信する



測位座標表示



受信装置

測位信頼度の出力

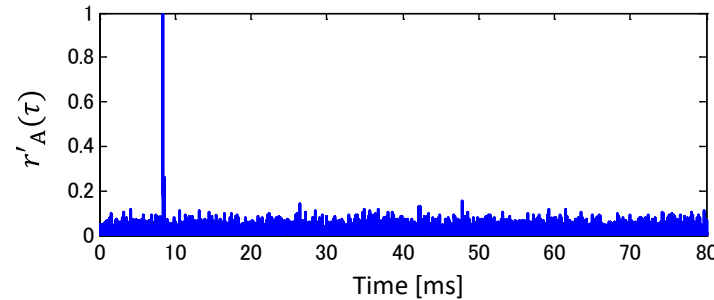
- 実海域の音響測位では波浪や水流の影響により瞬時SN比が大きく変動する
- 個々の測位結果に信頼度情報を付与し、統計処理に用いる

PAPR値

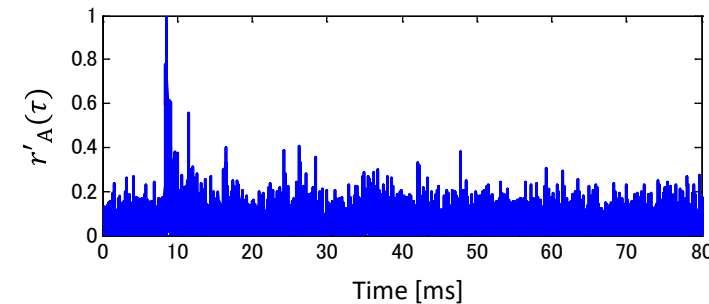
$$\rho = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} \{|r_1(nT)|^2\}}{\sum_{n=0}^{N-1} |r_1(nT)|^2 / N}$$

エラーレベル

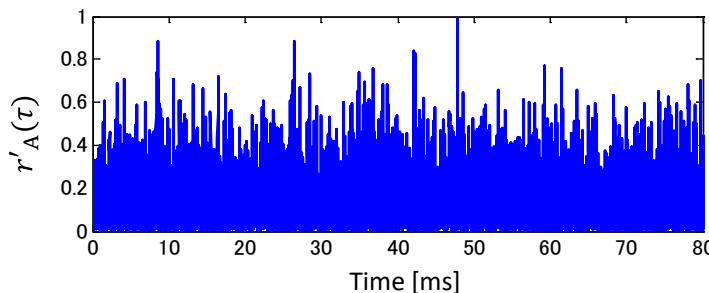
$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho > 200 \\ 1 & \text{if } 100 \leq \rho \leq 200 \\ 2 & \text{if } \rho < 100 \end{cases}$$



(a) 音波反射なし, 周囲騒音小
PAPR値 1437



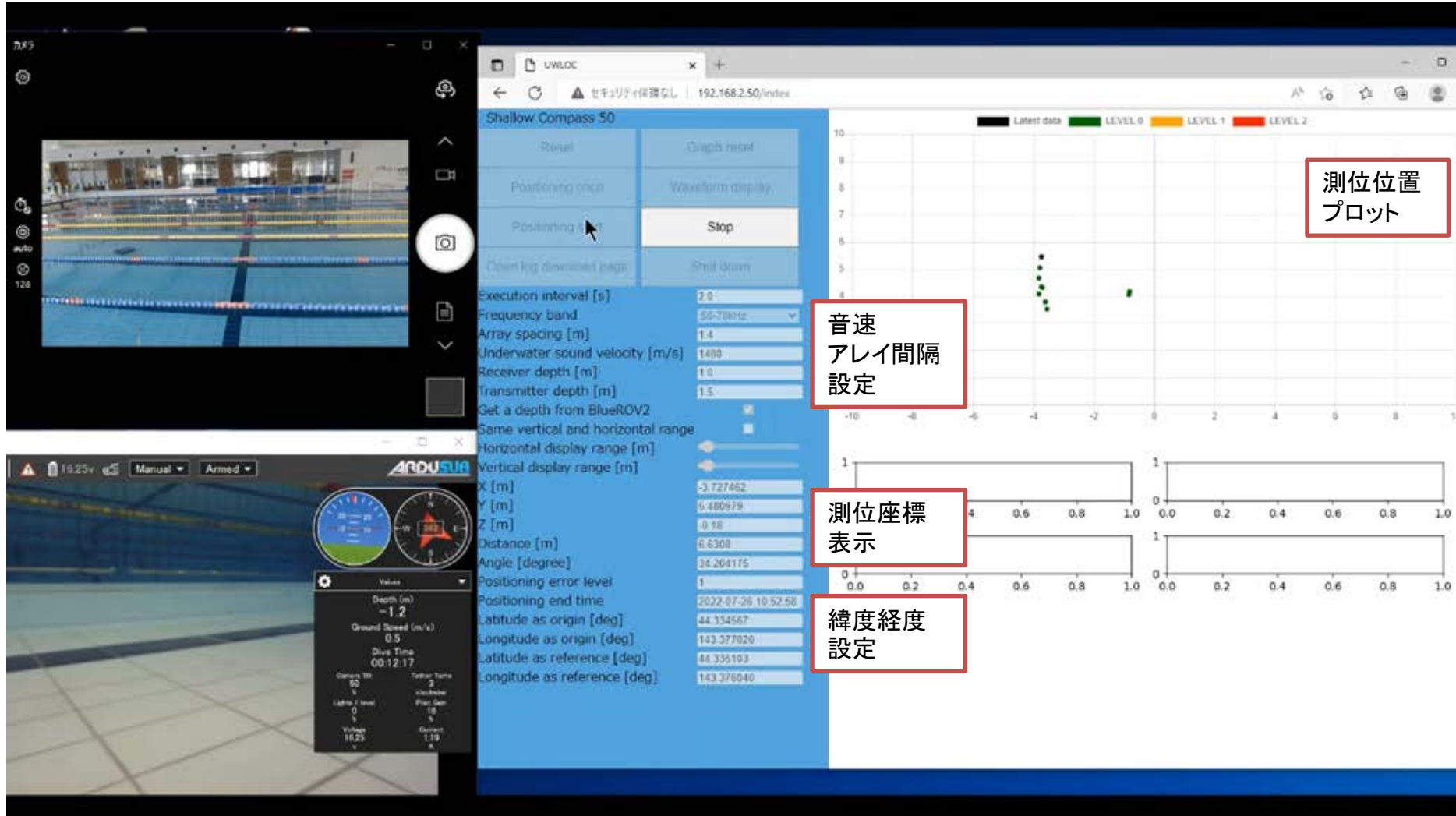
(b) 音波反射あり, 周囲騒音小
PAPR値 214



(c) 音波反射あり, 周囲騒音大
PAPR値 36

測位装置画面

Webカメラ
映像



水中ロボット
映像

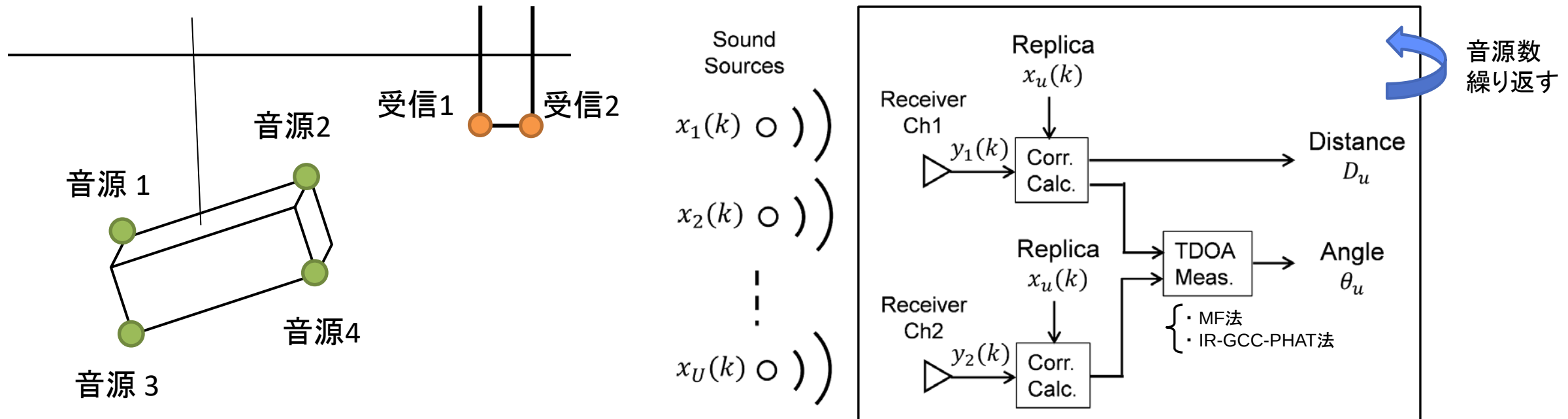
展示中の動画「水中ロボット用音響測位装置 Shallow Compass」をご参照下さい。

目次

- 音響測位の概要
- USBL方式測位
- SBL方式測位
- LBL方式測位
- 水中ロボット搭載型音響測位装置の開発
- 多点同時計測

多点同時計測

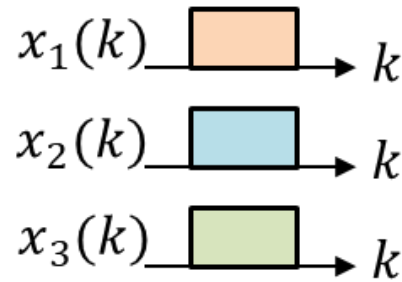
- 音響測位における多点同時計測[3]
 - 複数の音源を用いて同時に測位を行う
 - 海洋土木工事で海中に構造物を投入したときの位置や姿勢をリアルタイムで把握することが可能



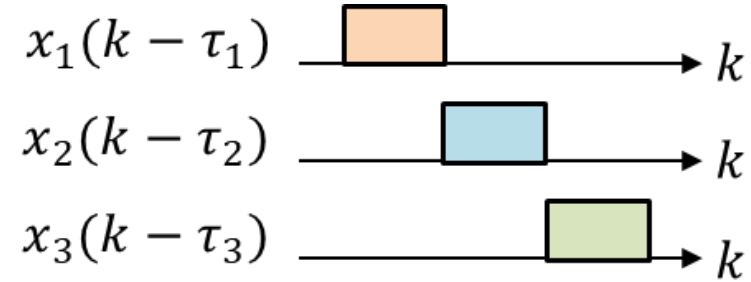
[3] 和田篤士, 吉澤真吾, 湯浅智志, 杉本英樹, “時分割・符号分割多重を用いた多点同時計測型水中音響測位の試験評価,” 海洋音響学会2022年度研究発表会講演論文集, pp.1-2, May 2021.

時分割・符号分割多重

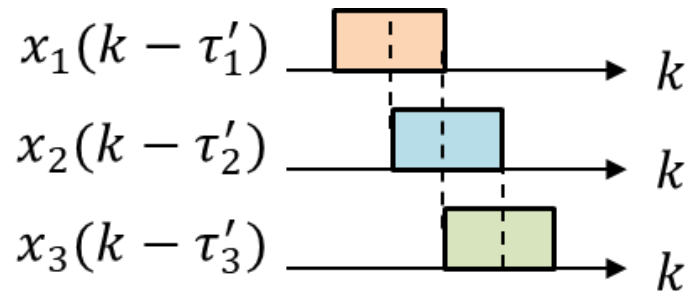
- 音源毎に異なる符号系列と送信開始位置を割り当てる
- 音源の送信開始位置をずらすことにより, 音源間干渉を低減する



(a) 符号分割多重
($R=1$)



(b) 時分割多重
($R=0$)

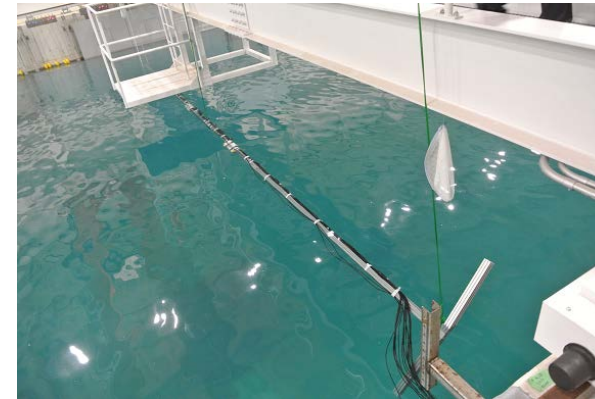
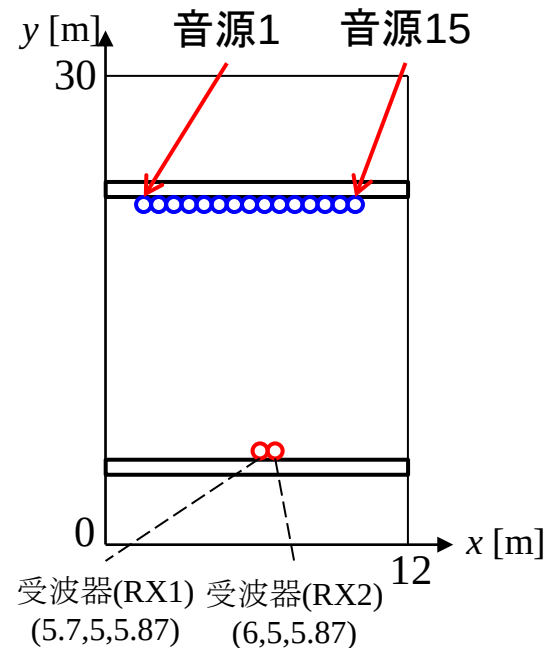


(c) 時分割・符号分割多重
($0 < R < 1$)

R : 音源間の測位信号区間を
重複する割合

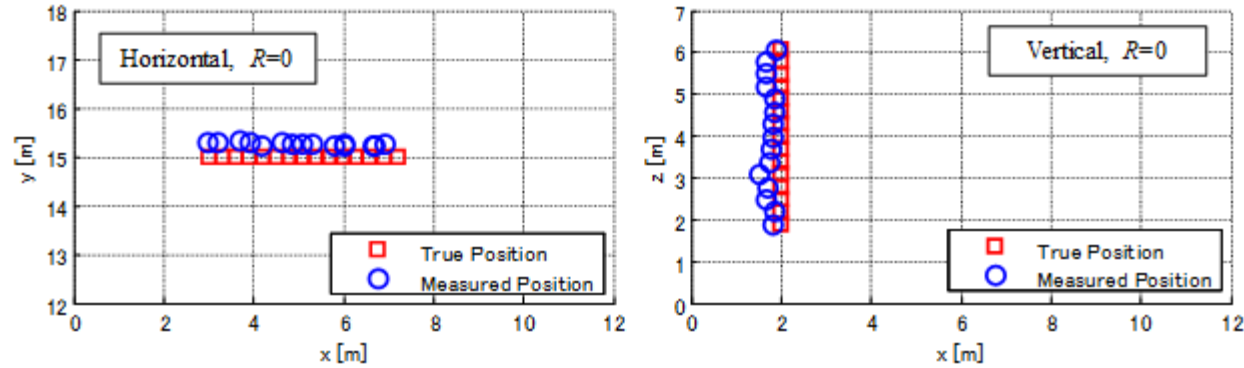
実験条件(1)

- 福島ロボットテストフィールド大水槽(幅12 m, 奥行30 m, 水深6.87 m)で複数音源の測位精度を評価
 - 送波器(音源)を0.3 m間隔で15個並べて、アレイ形状は水平, 鉛直方向に配置
 - 水平アレイの音源位置: $(3, 15, 0.87) \sim (7.2, 15, 0.87)$
 - 鉛直アレイの音源は位置: $(2, 15, 1.9) \sim (2, 15, 6.1)$

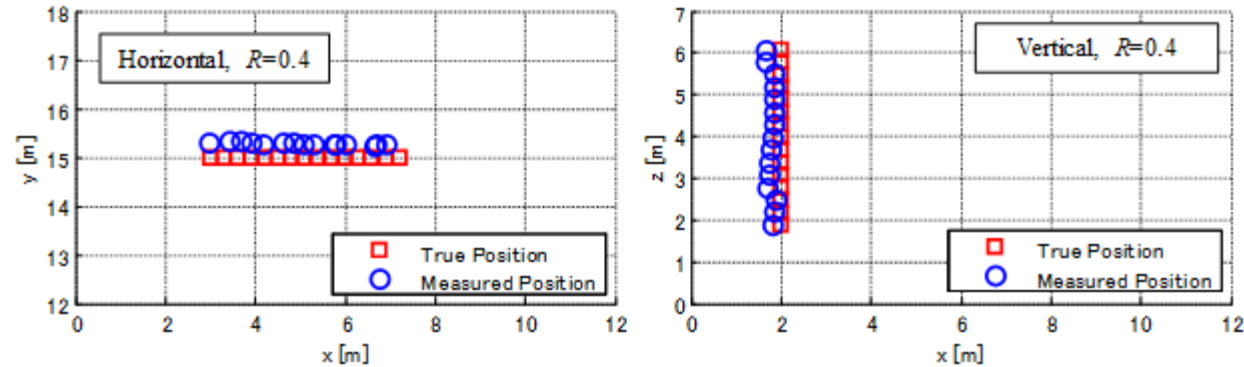


実験結果(1) IR-GCC-PHAT法

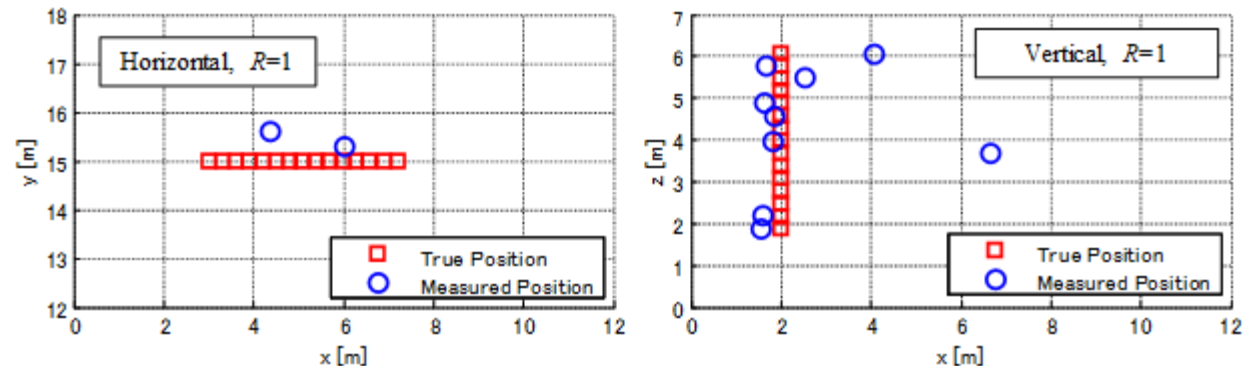
時分割多重



時分割・符号多重



符号多重



実験結果(2)

- IR-GCC-PHAT法では重複率を0.4まで上げても測位精度は維持できた
- MF法は重複率0の場合でも測位誤差が数m以上であり、測位が困難

(a) Average localization errors [m] for IR-GCC-PHAT

Overlap ratio	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Horizontal	0.32	0.32	0.31	5.04	6.70	9.37
Vertical	0.33	0.43	0.30	0.39	2.01	12.5

(b) Average localization errors [m] for MF

Overlap ratio	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Horizontal	4.21	2.56	7.32	9.44	8.56	10.4
Vertical	2.05	3.33	2.92	4.12	10.0	15.9

まとめ

- サブメータ級水中音響測位技術
 - 音波反射の影響を抑える測位方法・測定アルゴリズムの確立
 - USBL/SBL/LBL方式での測位精度目安はそれぞれ 1 m, 0.5m, 0.1m
- 水中ロボット用測位装置の開発
 - 水中ロボット機能と連携した音響測位装置を開発
- センチメータ級測位の展望
 - 静水(水槽)で測位は可能であるが、実海域では様々な不確定要因(装置揺動、水流・波浪、水温変化など)が存在する
 - 測位対象位置(真値)を正確に測ることも必要