



# 水中ロボット搭載型SBL方式音響測位装置の開発

2022 年 9月 7日 電子情報通信学会ソサイエティ大会

BCI-2:音響・電磁波・光エレクトロニクス技術の水に関わる無線技術への展開

〇吉澤 真吾(北見工業大学),土生 修平(SIX VOICE)

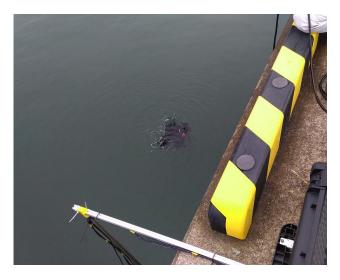
### 水中音響測位とは?



- 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

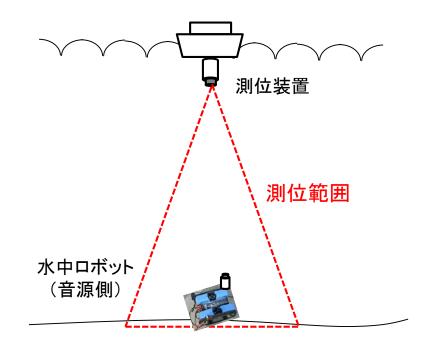
- ✓水中ロボット・ダイバーの位置把握
- ✓水中ロボット自動運転
- ✓海中·海底測量
- ✓水中構造物の姿勢把握多点同時計測
- ✔水中無線通信 対象位置に音波・電磁波・光 、 ビームを集中させる

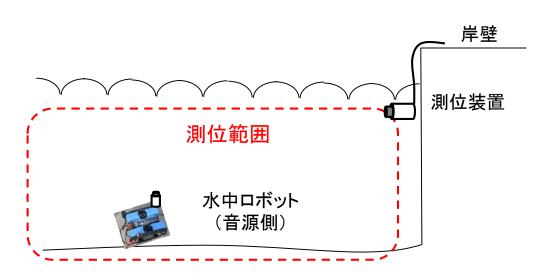
### 水中音響測位システムの技術課題



- 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



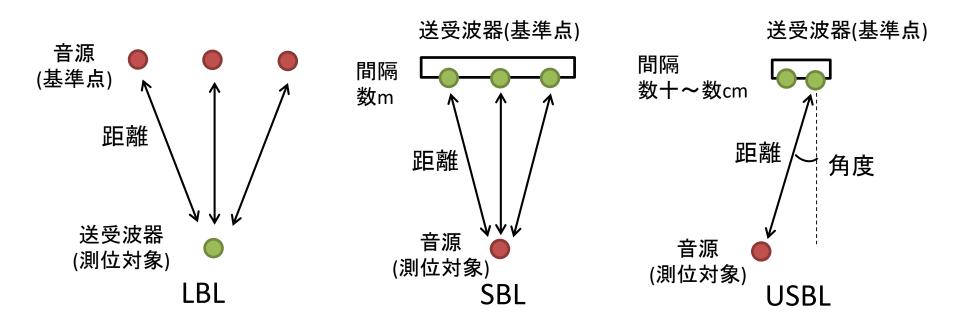


市販の音響測位装置でも水平方向測位は可能であるが測位誤差が大きくなる

### 音響測位方式



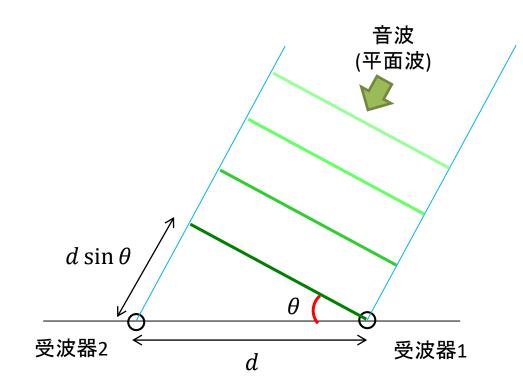
- 基準点からの相対的な距離や角度を音波で測る
  - LBL (Long Base Line)
  - SBL (Short Base Line)
  - USBL (Ultra Short Base Line)\*



## 到来方向推定



- 2つ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]

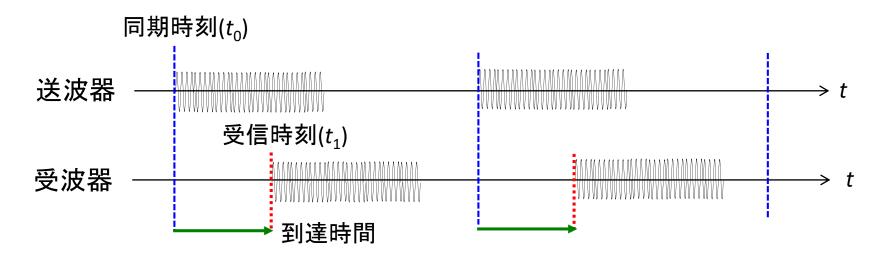
d: アレイ間隔[m]

Δt: 到達時間差 [s]

### 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



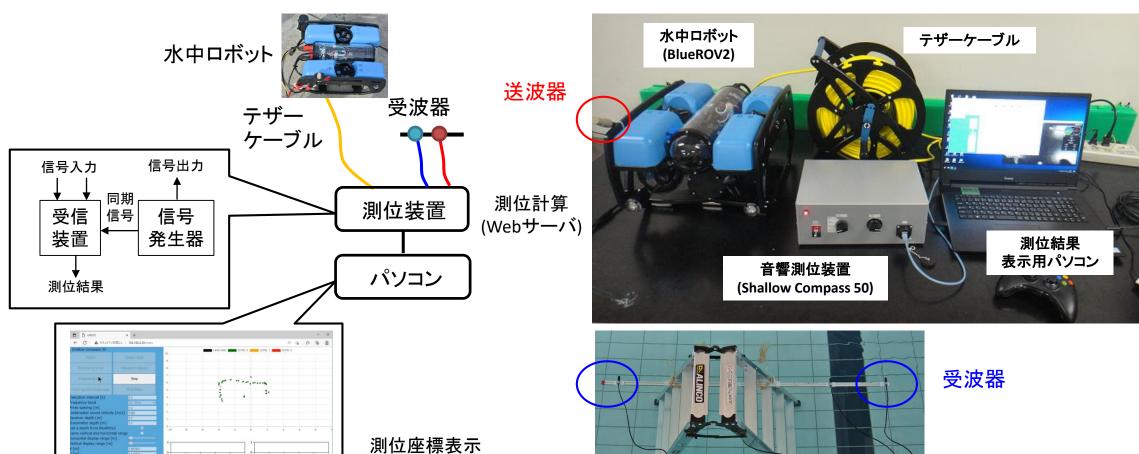
同期信号方式による距離計測

# 音響測位装置の構成

KITAMI Institute of Technology

- 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

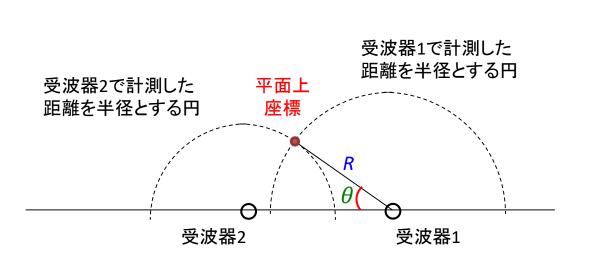
(Webクライアント)

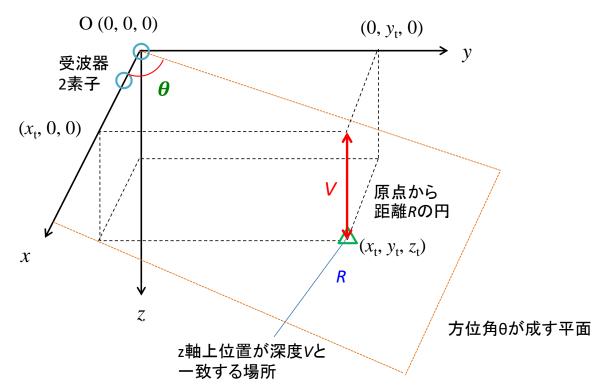


### 2次元・3次元座標計算



- 2次元座標
  - 受波器を基準とする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
  - 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

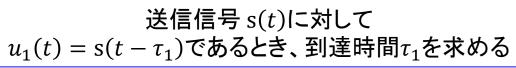


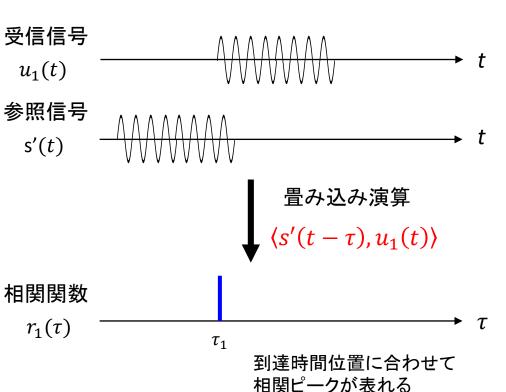


### 距離計測アルゴリズム(従来法)

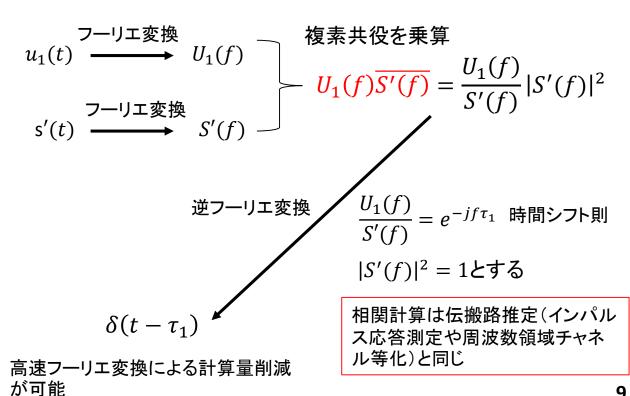


- 受信信号と参照信号との相互相関関数を計算する
- 相関関数波形の振幅最大点から到達時間を検出





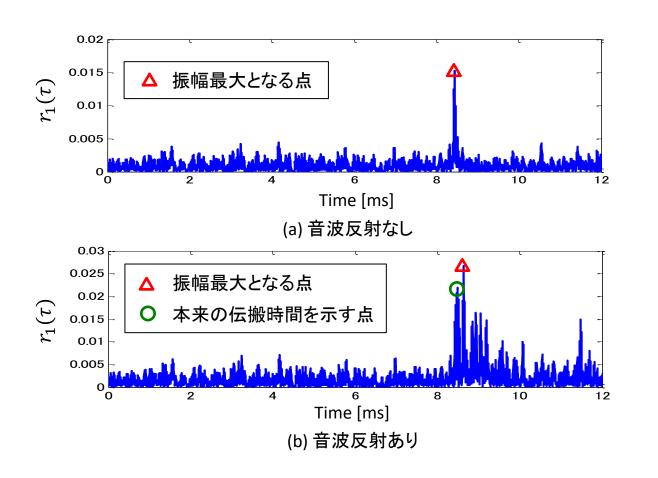
#### 周波数領域での計算

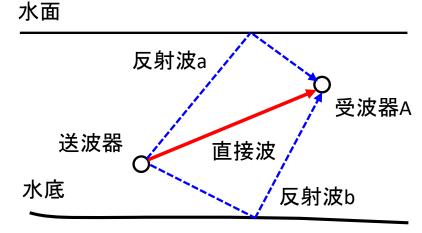


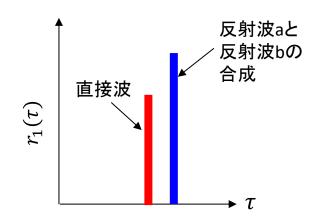
### 音波反射の影響



- 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



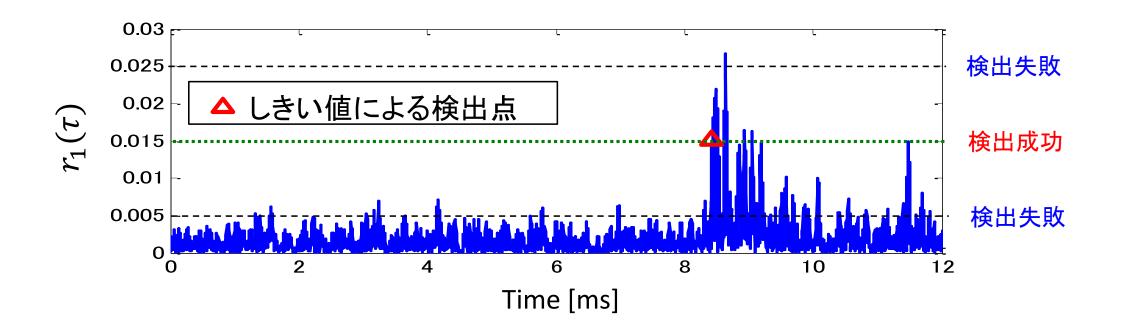




### しきい値による距離計測



- 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







- 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

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

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

方位角

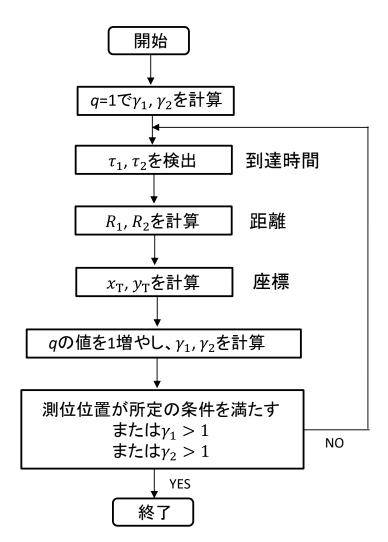
到来角

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y_{\rm T} - y_{\rm R}}{x_{\rm T} - x_{\rm R}} \approx \theta = \sin^{-1} \left[ \frac{c\Delta t}{d} \right]$$

 $(x_T, y_T)$ : 音源座標

 $(x_R, y_R)$ : 基準受波器座標

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

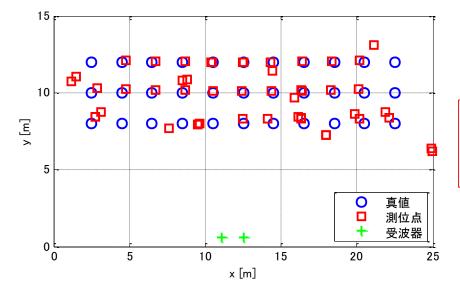


- ・ 北見市市民温水プールで測位試験を実施
- 幅25m, 奥行15m, 水深1.35 m
- 音波反射率水面1,壁 0.7(推定値)

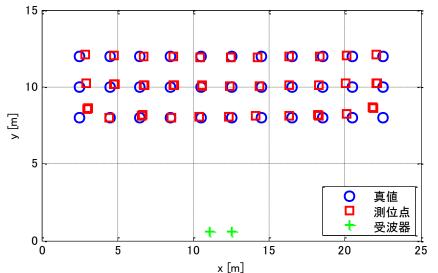
サンプリング周波数	200 kHz
送信信号周波数	12 kHz – 32 kHz
送信信号長	82 ms
受波器間隔	1.4 m
音源・受波器高さ位置	0.8 m 共通
SN比	10 dB







従来法 誤差平均 1.62 m



提案法 誤差平均 0.29 m

### 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(センチメータ級測位)

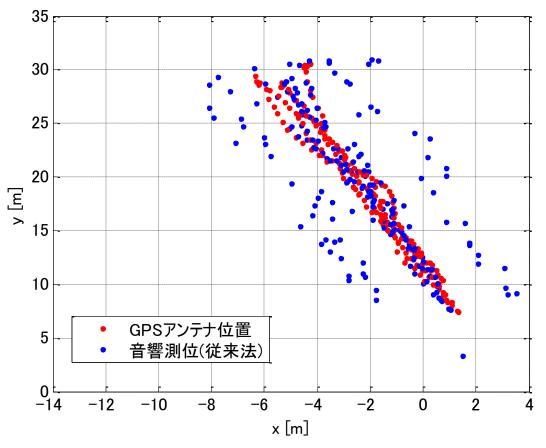




## 測位結果



- 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



35 30 25 y [m] 10 GPSアンテナ位置 5 音響測位(提案法) -12x [m]

従来法 誤差平均 1.38 m

提案法 誤差平均 0.31 m

### 測位信頼度の出力



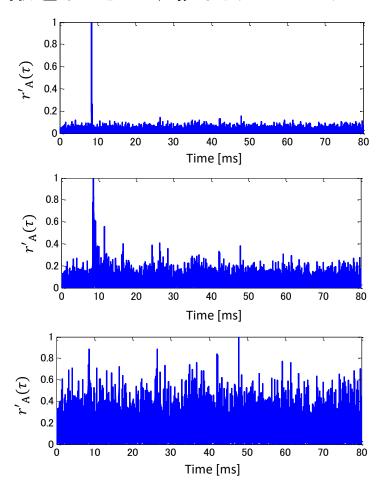
- 実海域の音響測位では波浪や潮流の影響により瞬時SN比が大きく変動する
- 個々の測位結果に信頼度情報を付与し、統計処理に用いる

#### PAPR値

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

エラーレベル

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



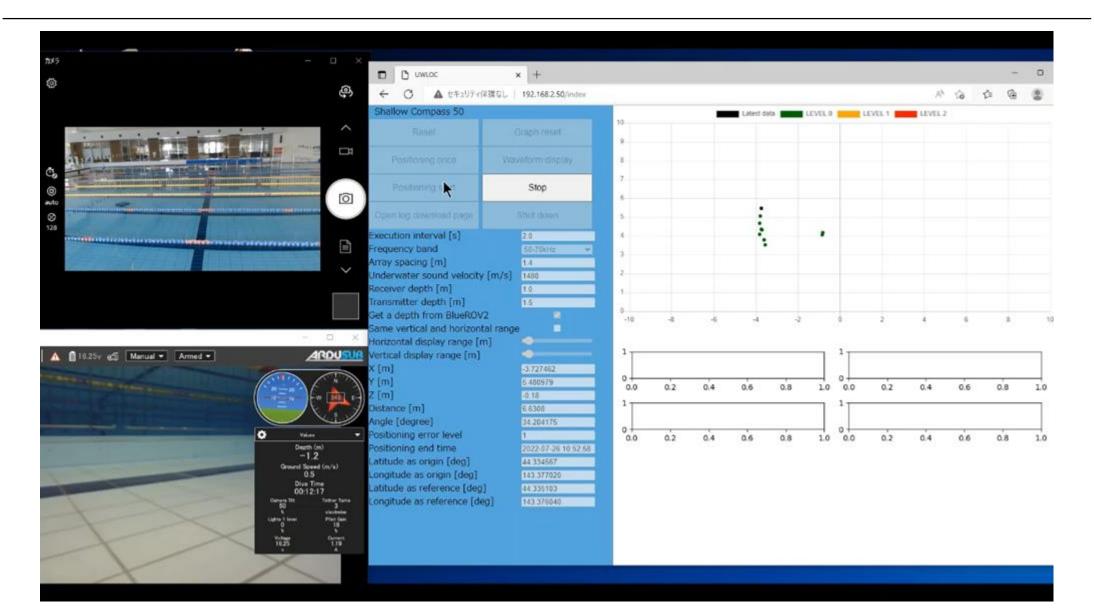
(a) 音波反射なし, 周囲騒音小 PAPR値 1437

(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

# 測位装置デモ





### まとめ



- SBL方式音響測位装置の開発
  - 小型水中ロボット組み込み型の音響測位装置
  - 深度情報を用いた3次元測位
  - 音波反射に強い距離測定アルゴリズム
  - 測位信頼度の出力
- ・ 今後の予定
  - 音響測位装置を利用した水中ロボットの自動運転