

水中における自己位置推定システムの開発

函館高専 ○吉崎 敏也 中村 尚彦 浜 克己

要旨

水中ロボットに搭載するための超音波を用いた水中自己位置推定システムの開発を目的とし、その前段として2基のハイドロフォンを用いた到来角度推定と、誤差修正のためのモーションセンサを組み合わせることで作成したシステムについて、その概要と動作検証実験の結果を報告する。

1. 緒言

効率的な漁業生産や海洋資源の持続的な利用を図るためには、周辺の環境情報をモニタリングする必要がある。その手段として、近年水中ロボットの使用が期待されている。しかし、環境情報をモニタリングする際、それが水中のどの位置で取得されたデータであるかが重要となってくる。このための自己位置推定の手法として、音波を用いたいくつかの手法があるが、水中ではさまざまな雑音の問題があり、発生する誤差に対処する必要がある。

そこで本研究では、水中ロボットに搭載するための超音波を用いた誤差の少ない自己位置推定システムの開発を目的としている。本稿では、開発中のシステムの仕様や推定方法について述べる。実際の3次元位置推定の前段として、2基のハイドロフォンを用いて方位推定を行った結果と、モーションセンサを使用した方位推定の結果のそれぞれについて示す。

2. 自己位置推定システムの概要

本研究における自己位置推定システムでは、主に超音波を用いる。水中の超音波の検出には、システムインテック(株)製のハイドロフォン(SH100K)を、その音源には、1秒ごとに63kHzの信号を発信するVEMCO製の連続ピング(V9-1H)をそれぞれ用いた。また、発生する測定誤差を相互に補完するために、(株)ZMP社のモーションセンサ(IMU-Z)を搭載した。システム構成を図1に示す。水中を伝播する音波をハイドロフォンで検出し、ノイズ除去のための40kHzから80kHzのバンドパスフィルタを通過させ、増幅回路にて検出可能なレベルまで電圧を増幅する。これを、dsPIC(33FJ64GP710)を用いて周波数394kHz、10bitにてサンプリングし、A/D変換したデータをシリアル通信によってPCへと送信している。このデータを用いて、音源とハイドロフォンとの位置関係を判断する。この時、モーションセンサによって、xyz軸に対するそれぞれの加速度や角速度を同時に測定し、センサの角度や位置の推定を行い、音波での計算結果と比較して、最終的な位置を求める。現在、音波とモーションセンサの各データを同時に取得はできているが、両者を複合しての推定には至っておらず、それぞれ単独での推定となっている。

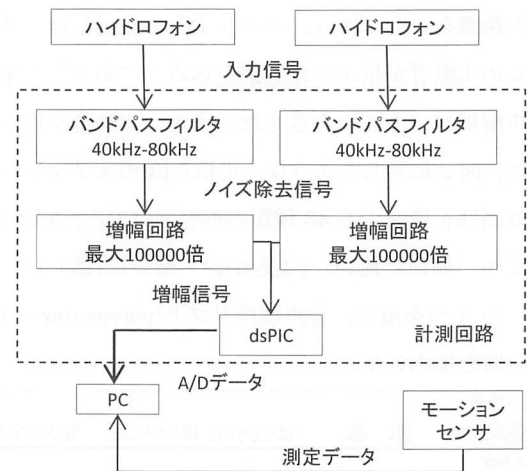


図1 システム構成図

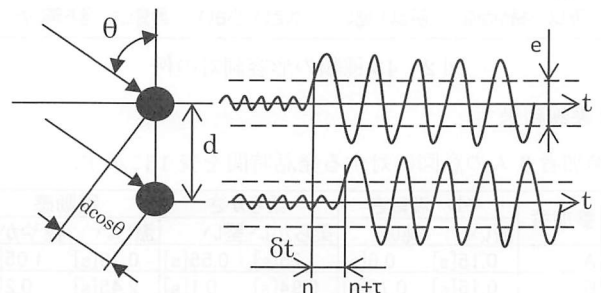


図2 音源角度推定原理

3. 自己位置推定手法

3.1 測定原理

3基のハイドロフォンを用いることで3次元位置を推定することができる。ハイドロフォンM1を原点としたとき、M2をx軸上に、M3をy軸上に設置する。M1とM2、M1とM3、それぞれの角度 θ_x 、 θ_y が推定できた場合、音源の位置が既知であれば、距離Rは以下の式で求められる。

$$R = \frac{z}{\sqrt{1 - \cos^2(\theta_x) + \cos^2(\theta_y)}} \quad (1)$$

2基のハイドロフォンに入射する音波の到来角度を推定する原理を図2に示す。ここで、ハイドロフォンに入射する音波の到来角度を θ 、到達する時間差を δt 、水中の音速を c 、ハイドロフォン間隔を d とすると、距離の差 $d \cos \theta$ は

$$d \cos \theta = \delta_t \cdot c \quad (2)$$

となり，ここから音波の到来角度は次式で与えられる。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\delta_t c}{d} \right) \quad (3)$$

3.2 到達時間差計測

2 基のマイクロフォン間の音波到達時間差 δ_t を算出する方法として，音波を A/D 変換したデータを用いている。このデータに対して，設定した閾値よりも大きく変動し始める点を検出し，2 つの信号のずれが何サンプリング分に相当するのかを数えることで，時間差を求めることができる。図 2 のような信号の場合，2 つの信号のずれは τ サンプリング数分である。この時，サンプリング周波数を f_s とすると，時間差 δ_t は以下の式で表される。

$$\delta_t = \frac{\tau}{f_s} \quad (4)$$

3.3 モーションセンサによる角度推定

角度は，モーションセンサに内蔵されている加速度センサ及びジャイロセンサを利用して推定する。静止時は，加速度センサから重力の方向を検出して，姿勢を推定する。運動時には，ジャイロセンサの値を積分することによって姿勢を推定する。これらを組み合わせることによって現在の姿勢を判断し，回転角度を推定する。

4. 性能評価実験

予備実験として，ピンガから音波を発生させていない状態で A/D 変換を行った。それらの値の平均値の ± 300 を閾値 e とし (図 2 参照)，この範囲内のデータが続いている場合は，音波が到達していないものとして処理を行った。

音波の到来角度推定実験では，マイクロフォン間隔を 20cm とし，各マイクロフォンを結んだ線上とのなす角度がそれぞれ 0 から 180° の範囲で，30° および 45° 刻みにピンガを設置し，各々の位置で 200 回ずつ角度推定を行った。結果を図 3 に示す。実験時の水温は 23.3°C であり，以下の式を用いて音速を算出した。

$$c = 1404.3 + 4.7T - 0.04T^2 \quad (5)$$

ここで， T は水中の温度である。なお，(5)式は，淡水で，15°C から 35°C の範囲に適応する式である。

各角度において，それぞれ 200 回の測定を行ったが，概ね良好な結果が得られた。しかしながら，45° や 120° の測定結果の中に，何点か全く違う角度を算出したものがある。各測定時にログとして A/D 変換データを出力しており，その値を確認したところ，正しい結果を出しているデータに比べ，この時の波形は明らかに振幅自体が歪んでいた。原因としては，実験水槽内で反射した音波によって歪められた信号が入力されている可能性が考えられる。

また，0° の測定結果を見ると，10° 付近にも多くの計測結果が表れており，誤差が大きく出ていることが見て取れ

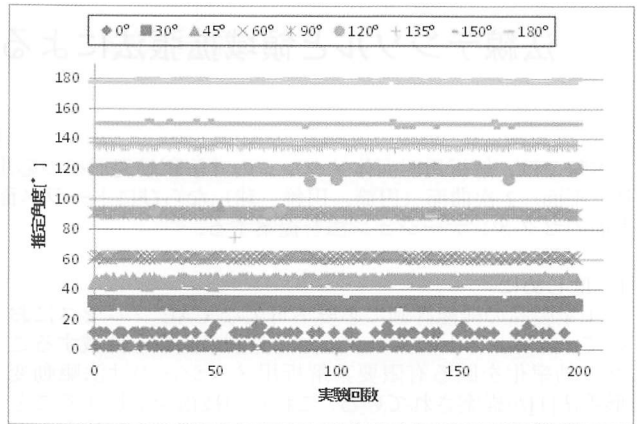


図 3 測定結果

る。この原因としては，1 サンプリングのずれに対する推定角度の差が，90° 付近では 1.08° であるのに対し，0° 付近では，8.96° 程度と大きくなってしまったためと考えられる。なお，これを単純にサンプリング数のずれで比較すると，いずれも最大で 2 程度となっている。

次に，モーションセンサについて実験を行った。センサを静止させた状態で計測を開始し，角度を変更した場合の精度について測定した。それぞれのサンプリング周期は 10ms である。測定方法は，静止した状態を 0° とし，そこから計測をはじめて，90°，180° の回転を加えた。0° 付近での平均誤差は約 4.25° であり，90° 付近では約 4.72°，180° 付近では 2.71° 程度の誤差となった。この結果から，0° 付近では，モーションセンサの値の方が角度推定精度が高いことがうかがえる。しかしながら，ジャイロセンサと加速度センサは，値を積分して使用しているため，時間が経過するにつれ誤差が蓄積される。よって，音波による推定とモーションセンサによる推定を組み合わせ，相互に補完し合っていく必要があると考えられる。

5. 結言

本稿では，水中における 3 次元位置推定システムの開発を目的として，まず 2 基のマイクロフォンを用いた音波到来角度推定手法と，モーションセンサを用いた角度推定誤差の抑制について述べた。

その結果，0° から 180° の範囲については，比較的精度のよい結果を得ることができ，超音波によって推定した角度の補正として，モーションセンサが有効であることも確認した。しかし，3 次元の位置推定には，マイクロフォンの数を増やす必要があり，その増加とともに，それに合わせたシステム構築を進めることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 海洋音響学会，”海洋音響の基礎と応用”，2004
- [2] National Physical Laboratory，”Under Acoustics Technical Guides - Speed of Sound in Pure Water”