211 水中における自己位置推定システムの開発

Development of Self-localization Estimation System in Underwater

○学 吉崎 敏也(函館高専) 正 浜 克己(函館高専) 宮武 誠(函館高専)

山下 成治(北大水産学部) 正 鈴木 昭二(はこだて未来大)

村田 政隆(北海道工業技術センター) 正 松村 一弘(北海道工業技術センター)

Toshiya YOSHIZAKI, Hakodate National College of Technology, 14-1, tokura cho, Hakodate

Katsumi HAMA, Makoto Miyatake, Hakodate National College of Technology

Seiji Yamashita, Hokkaido University

Shoji Suzuki, Future University Hakodate

Masataka Murata, Kazuhiro Matsumura, Hokkaido Industrial Technology Center

Key Words: Self-localization, Underwater

1. 諸言

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, 3基のハイドロフォンを用いて方位推定及び位置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㈱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、㈱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Fig.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、制作した計測回路に搭載した40kHzから80kHzのバンドパスフィルタを通過させることで、ノイズを除去し、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にて同時にサンプリングし、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、

Fig.1 System configuration

Fig.2 Schematic diagram of self-localization system

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。

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。Fig.2に概略図を示す。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[1]。

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

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Fig.3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 δ_t 、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。

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

Fig.3 Calculation of the acoustic source direction

3.2 到達時間差計測

2基のハイドロフォン間の音波到達時間差 δt を算出には、音波をA/D変換したデータを用いた。このデータに対し、Fig.3のような場合には、設定した閾値 e よりも大きく変動し始めた点を検出し、2つの信号のずれが何サンプリング分に相当するかを数えることで、時間差を求めることができる。いま、このサンプリング数を τ 、サンプリング周波数を f_s とすると、時間差 δt 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。また、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

初めに予備実験として、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（Fig.3参照）、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。

4.1 音波到来角度推定実験

音波の到来角度推定実験では、ハイドロフォン間隔を20cmとし、各ハイド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。実験時の水温は25.2℃であり、以下の式を用いて音速を算出した^[2]。

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

ここで、 T は水中の温度である。なお、(5)式は、淡水で15℃から35℃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^[3]。しかし、90℃から離れるにつれて誤差が大きくなる傾向にあり、0°では、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いうためと考えられる。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。

4.2 平面位置推定実験

2基のハイドロフォンを用いた到来角度推定では、0°付近以外は概ね良好な結果が得られたため、ハイドロフォンを3基に拡張し、音源位置推定実験を行った。音源の位置を3か所変更し、それぞれの位置で200回ずつ推定を行った。結果

Fig.4 Estimated Position

及び測定方法をFig.4に示す。なお、3基のハイドロフォンと音源は同じ深さ（同一平面）に設定した。この時、同時サンプリングを行う関係で、サンプリング周波数は222kHzで測定を行っている。今回は、同一平面上で測定を行っており、位置推定の計算は(1)式ではなく、Fig.4に示すように、ハイドロフォン間の中央位置を始点とし、推定した θ_x 、 θ_y とからそれぞれ直線を求め、その交点に音源があるものとして位置推定を行っている。推定結果より、①や②は4か所の推定結果に収束しているが、②に関しては、推定結果が9か所ほどに分散している。また、精度に関しても、明らかに③が低くなっている。①、②では、 θ_x 、 θ_y のどちらか一方が90°の位置にあり、前述の音源位置推定結果より、もっとも誤差が少ない角度であるためと考えられる。それに比べて、③は60°付近であり、角度精度がやや落ちて、ばらつきが目立つと考えられる。

4.3 モーションセンサによる角度推定実験

モーションセンサについても実験を行った。0°から90°、180°の回転を加えて精度の確認を行い、それぞれのサンプリング間隔は10msである。0°での平均誤差は4.25°であり、90°では-4.72°、180°では2.71°であった。これより、0°付近ではモーションセンサ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、モーションセンサでは、積分によって角度を求めているため、誤差が蓄積される可能性がある。よって、音波とモーションセンサによる推定を組み合わせ、相互に補完していく必要がある。

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基のハイド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、比較的良好な精度が得られた。また、同一平面内に限定したが、位置推定も実行することができた。さらに、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次元位置推定には、誤差を小さくするために各種センサ情報の統合が必要不可欠であり、それらに合わせたシステム構成を進め、広域での実験を行っていく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”
- [3] 吉崎敏也ほか, “水中における自己位置推定システムの開発”, 精密工学会北海道支部学術講演会(投稿中), 2013