論文

逆クロスベアリングを用いた 超音波バイオテレメトリーシステムの測位精度評価

長谷川 浩平, 宮本 佳則, 内田 圭一, 柿原 利治 (東京海洋大学大学院)*¹
(2012 年 5 月 8 日原稿受付)

Abstract:

Tracking system, one of the biotelemetry systems, detects signals from pingers using a receiver located on an observation boat. This system can be used without location constraints, unlike monitoring systems and positioning systems for which a receiver must be installed in the actual sea. But such a system cannot measure the pinger position in detail. In order to measure the pinger position in greater detail using a tracking system, a new method using “inverse cross bearing” was developed. This method determines the horizontal pinger position using the intersection point of more than two bearing lines from as many observation points. The vertical position of the pinger is measured by a depth sensor on the pinger itself. This system calculates the relative azimuth of the pinger using the receiving time differences among the four transducers. The GNSS compass, to convert the absolute azimuth of the pinger’s relative azimuth, measures the ship’s heading. To estimate the theoretical error factors, experiments were conducted in actual seas. The estimation results were compared to the results of the field experiments. In certain conditions, the estimated positioning accuracy was 14 m, and the measured value was 21 m. This discrepancy may be due to factors such as agitation of the ship.

Classification: 水産音響・バイオアコースティックス

Keyword: 超音波バイオテレメトリー, 測位精度, ピンガー, クロスベアリング

1. はじめに

超音波バイオテレメトリーシステムは, 小型の超音波発信器(ピンガー)を用いて水中生物の移動や行動を観察する技術であり, これを利用した研究が数多く行われている. ピンガーから発せられ

る信号を探知する受信機は追跡型, 設置型, 音響測位型の 3 種類がある. 追跡型は調査船に受信機を設置し, 船を走らせながらピンガーから発信される信号を探知していく方式で, 船の位置を対象生物の位置とする. 設置型はあらかじめ調査海域

Position Accuracy of Ultrasonic Biotelemetry System Using “Inverse Cross Bearing”

* 1 Kohei HASEGAWA, Yoshinori MIYAMOTO, Keiichi UCHIDA, Toshiharu KAKIHARA (Tokyo University of Marine Science and Technology)

に複数の受信機を設置しておき、各受信機が信号を受信した時刻と対象生物の ID を記録しておくもので、受信機の設置場所を中心とする受信範囲内が対象生物の位置となる。音響測位型は 3 個以上の受信機を調査海域に幾何学的に配置し、各受信機が信号を受信した時間差や位相差から LBL (Long Base Line) 方式により対象生物の位置を測位するものである。設置型や音響測位型は実験期間中、調査海域に受信機を設置しておく必要があるが、船舶交通の輻輳する海域や漁業が行われている海域での受信機設置は困難である。一方、追跡型はそのような制約を受けることなく、機器の設置が他の 2 方式と比べ簡単であり、また、広範囲の調査が可能であるというメリットがある。しかし、追跡型のデメリットとして連続的に長期間のデータを取得することが難しいことや、基本的に船の位置を対象生物の位置とするため¹⁻³⁾、対象生物の詳しい位置情報を得ることができないといった点がある。このうち、船を走らせながら調査をする性質上、長期間のデータの取得の改善は困難であるが、ピンガーの位置情報に関しては改善の余地があると考えられる。そこで、本研究では追跡型で対象生物の位置を得ることができるシステムを構築し、その測位精度の評価を行うことを目的とする。これまで追跡型で位置情報を得ることのできるシステムとしては、同期方式と SSBL (Super Short Base Line) 方式を組み合わせピンガーの位置を知るシステムが開発されている^{4),5)}。この方式では、SSBL 方式によりピンガーの方位を、同期方式を用いてピンガーとの距離を求めることでピンガーの位置を決定する。同期方式を用いているため、あらかじめピンガーの初めの発信時刻と発信周期の較正が必要である。また、精度の向上のためには音速とピンガー送信周期の温度特性を調べて較正を行い、測距誤差を軽減するなど工夫が必要である⁴⁾。それに対して、沿岸航法の 1 つであるクロスベアリングの測位の原理を逆にした、逆クロスベアリングでは、ピンガーの同期を必要としないため、システムの構築の簡

便化が図れる。そこで本研究では、逆クロスベアリング測位に必要なデータを得るためのシステムの設計を行い、そのシステムから推定される測位精度を求めた。また、実際の海域でピンガーの測位実験を行い、測位精度に関して推定値との比較を行った。そして、得られた結果からこのシステムの有効性について考察した。

2. 逆クロスベアリング方式

2.1 測位原理

沿岸航法の 1 つであるクロスベアリング(交叉方位法)は、自船から 2 個以上の物標との方位を求め、海図上で物標から反方位線を引き、それら反方位線の交点を船位とする方法である⁶⁾。本研究では、これを逆に考え、2 個以上の観測点からピンガーの方位を求め、観測点から方位線を引き、それらの交点をピンガーの位置とする。逆クロスベアリングでは、クロスベアリングにおける物標の位置からピンガーの方位を求めることとなる。**Fig. 1** にピンガーの方位計測の原理を示す。受波器に対するピンガーの方位計測は、受波器を計 4 個用いることで求められる。4 個の受波器の番号を 1~4 番とし、1, 2 番と 3, 4 番をそれぞれ 1 対の受波器とする。1, 2 番の受波器を調査船の左右に配置したとすると、受波器の間隔(基線長) D_{1-2} に比べ、受波器とピンガーの距離(受信距離)が十分離れているとすれば、ピンガーからの信号は各受波器に平行に到達すると近似できる。このとき、1 番と 2 番の受波器がピンガーの信号を受信する時間に差が生じ、これはピンガーの信号の到来方位(θ)によって決定する。それぞれの受波器がピンガーからの信号を受信した時刻を t_1 , t_2 とすると、信号を受信した時間差 $t_1 - t_2$ と音速 c の積 $c(t_1 - t_2)$ は、それぞれの受波器からピンガーまでの距離差となる。よって、受波器の基線に対するピンガーの方位 θ は

$$\theta = \cos^{-1} \frac{c(t_1 - t_2)}{D_{1-2}} \quad (1)$$

Fig. 1 Principle of measurement of pinger direction. The variables $t_1 - t_2$ and $t_3 - t_4$ represent the time delays between the acoustic signal arrivals on each hydrophone. The pinger direction angles (θ , ψ) were measured using the range difference between the distances from each hydrophone to the pinger.

となる。しかし、Eq. (1) からはピンガーの方位が船に対して左右のどちらかであるかが求められるが、前後のどちらから信号が到達しているかは識別できない。そこで、2組の受波器の基線が直行するように、3、4番の受波器を設置することで、前後のどちらから信号が到達しているかを識別することが可能になる。新たに設けた受波器の基線に対するピンガーの方位 ψ は θ と同様に

$$\psi = \cos^{-1} \frac{c(t_3 - t_4)}{D_{3-4}} \quad (2)$$

で求められる。Eq. (1)、Eq. (2) によりピンガーの方位を決定することができる。ここで求められた方位はそれぞれの受波器の基線に対する相対方位であるため、基準となる方位を定める必要がある。そこで、求めるピンガーの相対方位が船首方向に対する方位となるように、調査船の船首尾線に合わせて受波器を配置すれば、船首方位とピンガーの相対方位の和が船の位置からのピンガーの真方位となる (Fig. 2)。そして、2カ所以上でピンガーの方位を計測し、それらの方位線の交点がピンガーの位置となり、さらに GPS で求めた船の位置との相対関係から、ピンガーの絶対位置を算出する。本方式で得られるのはピンガーの水平位置のみのため、深度センサー付きのピンガーを用いることでピンガーの3次元の位置を得ることができる。

2.2 使用機器および設置方法

Eq. (1)、Eq. (2) より求められる方位は連続値

Fig. 2 Measurement of true bearing of a pinger from an observation boat.

ではなく、その方位分解能は、ピンガーの信号が受信された時間を測定する際の時間分解能に依存する。そのため、本方式で使用する受信機は時間分解能が高いものが必要である。そこで受信システムおよびピンガーは、宮本ら⁷⁾によって開発されたシステム (受信機 (FRX-4002 FUSION 社製) と4チャンネルの有線式受波器 (FRTD-400 FUSION 社製)) を使用した。このシステムは、受信機の時間分解能が $10\mu\text{s}$ であり、例えば受波器の間隔を2mに配置した場合、方位分解能は約 0.4° となる。ピンガー (周波数 62.5kHz, ソースレベル 155dB re μPa at 1m, FPX-1030-60P FUSION 社製) からの信号が受波器で受波されると、受信機で信号の相関処理が行われピンガー

Fig. 3 Measurement system diagram and data flow.

のIDを特定する。それぞれの受波器によって受信されたピンガーのID及びその受信時刻が受信機から出力され、これらのデータをPCに記録した。船首方位と船位は、GNSSコンパス(SC-30 FURUNO社製)によってサンプリング周期1sで測定し、PCにデータを記録した(Fig. 3)。

調査船への機材の設置は、1, 2番の受波器を両舷に1個ずつ、基線が調査船の船首尾線に対して垂直になるように配置し、3, 4番の受波器を片舷に、基線が船首尾線に対して平行になるように配置した(Fig. 4)。また、GNSSコンパスは船首尾線に合わせて船首方向が基準となるように固定した。

2.3 測位精度の推定

本方式の有効性を検証するために、測位精度の推定を行った。測位精度は、各観測点から測定する方位線の精度と、GPSによる船位の測位精度に依存する。ピンガーの位置を測位するためには2本以上の方位線が必要であるが、方位線の数によって測位精度の推定方法は異なる⁶⁾。方位線の数が多いほど高精度な推定が可能であるが、本研究のように1隻の調査船で観測を行うことを想定すると、各観測点での方位測定は同時に行うことができずに時間差(各観測点でピンガーの方位を計測した時刻の差)が生じ、その間にピンガーの位置が移動すれば、それが測位誤差となる。観測

Fig. 4 Arrangement of equipment on a boat. Two hydrophone arrays were installed to be at right angles to each baseline, and a GNSS compass was fixed on the boat to be parallel to the ship centerline.

点が増えるほど方位測定時刻差が大きくなり、ピンガーが移動することで誤差が生じる可能性が高くなる。そのため、本研究ではピンガーが移動しないことを前提に、2本の方位線からピンガーの位置を測位した時の誤差界を求め、測位精度を推定した(Fig. 5)。図中のA, Bは方位計測を行う観測点、Oはピンガーの位置を表している。観測点A, Bから引いたピンガーへの方位線に含まれる方位誤差をそれぞれ α, β とすると、方位誤差のみで生ずる誤差界は図中の四角形CDEFとなる。また、GPSの精度を R とするとそれぞれ

Fig. 5 Error diagram. Each azimuth line from the observation points (points A and B) to the pinger (point O) contained a bearing error, represented by α and β , respectively. The quadrangle CDEF was an error boundary formed by the four lines including the bearing errors. R was the position error of the GPS. The quadrangle PQRS was an error boundary determined by adding the GPS error to the quadrangle CDEF.

れの方位線は R の幅の誤差帯を持つこととなる。方位誤差と GPS の船位の誤差を総合した誤差界は図中の四角形 PQRS となる。

測位精度はこれら誤差界の面積から推定した。ピンガーの位置における 2 本の方角線の交差角 (挟角) を φ 、観測点 A, B からピンガーの位置 O までの距離をそれぞれ r_A , r_B とする。点 O から CI に垂線を引き、その交点を H とし、四角形 CDEF を平行四辺形とみなせば、 $\angle OIH = \varphi$ となるので、

$$OH = r_B \sin \beta \quad (3)$$

$$CI = \frac{r_A \sin \alpha}{\sin \varphi} \quad (4)$$

が成り立つ。四角形 CDEF の面積 S_1 は $4(OH \times CI)$ で求められるので、

$$S_1 = \frac{4r_A r_B}{\sin \varphi} \sin \alpha \sin \beta \quad (5)$$

となる⁶⁾。この式から方位誤差による測位誤差は観測点とピンガーの位置関係で決まる。そこで、ある 2 点の観測点とピンガーの位置との精度分布図を作成した。これは、平岩⁸⁻¹⁰⁾や Ehrenberg^{11), 12)} が測位精度を示すのに用いた方法と同じである。本研究における精度分布図は、ある 2 点の観測点に対するピンガーの測位誤差を、ピンガーの位置ごとに求め、等高線の要領で等しい誤差となる点を結んだものである。Eq. (5) で求めた S_1 は誤差界の面積であるため、誤差の大きさのイメージがしにくい。そこで、 S_1 の平方根を直線誤差として精度分布図を作成した。

方位誤差による測位誤差に加えて、GPS による船位の誤差を含めたときの誤差界は Fig. 5 の四角形 PQRS となる。四角形 CDEF と同様に PQRS を平行四辺形とみなせば、 $\angle PJC = \varphi$ となる。点 C から PJ に垂線を引き、その交点を T とすると、 $CT = R$ で

$$PJ = \frac{R}{\sin \varphi} \quad (6)$$

となる。よって四角形 PQRS の面積 S_2 は $4(OH + CT)(CI + PJ)$ で求められるので

$$S_2 = \frac{4(R + r_A \sin \alpha)(R + r_B \sin \beta)}{\sin \varphi} \quad (7)$$

となる。 R は GPS の精度を表しているが今回は $R = 5\text{m}$ として計算を行った。方位誤差による位置精度と同様に S_2 の平方根を直線誤差として GPS の誤差を含めた場合の精度分布図を作成した。

誤差界の面積を求めるためには方位誤差 α , β を知る必要がある。方位誤差の原因としては方位分解能による誤差と、ピンガーと観測点が受波器の間隔に比べて十分離れていない場合に Eq. (1), Eq. (2) の近似が成り立たないことで生じる誤差

Fig. 6 Relation between pinger direction from the baseline of the hydrophone array and the bearing resolution, if the receiver's time resolution was $10\mu\text{s}$.

が考えられる。方位分解能は前述のように受信機の時間分解能に依存する。また、基線長(2個の受波器の間隔)や基線に対するピンガーの方位も方位分解能に影響する。受信機の時間分解能を $10\mu\text{s}$ とし、基線長が1 m, 2 m, 3 mそれぞれの場合に、ピンガーの方位に対する方位分解能を求めたものを Fig. 6 に示す。ピンガーの方位が 90° 付近であれば、時間差の変化に対して方位の変化が少ないため方位分解能が高くなる。しかし、方位が 90° から離れ、ピンガーの方位が 0° または 180° に近づくにつれて、時間差の変化に対する方位の変化が大きくなり、方位分解能は低くなる。また、基線長が大きいほど方位分解能が高くなる。

これに加えて、ピンガーが観測点から十分離れていないときには、ピンガーからの信号が各受波器へ平行に届くという近似が成り立たなくなり、方位誤差の要因となる。

前述の2つの原因から方位誤差の推定を行った。受波器の配置は、1番と2番の受波器を調査船の両舷に、3番と4番の受波器を片舷の前後に配置した場合を考える (Fig. 4)。受波器の間隔は後述の海上での実測実験に合わせて1.8 mとして計算を行った。また、1番と3番の受波器の間隔と1番と4番の間隔は0.9 mとした。このとき、1番の受波器を基準として、それに対するピンガーの方位を真の方位とする。ピンガーの距離が受波器と十分離れていないときに両舷の受波器で

Fig. 7 Near field error for a pinger and a hydrophone array installed on each side of a boat. θ_1 was the true bearing of the pinger from hydrophone 1; θ_2 was actually calculated using Eq. (1).

Fig. 8 Near field error for a pinger and a hydrophone array installed on one side of a boat. ψ_1 was the true bearing; ψ_2 was actually calculated using Eq. (2).

方位を求める場合 (Fig. 7), ピンガーの真の方位は θ_1 であるが、ピンガーの信号が平行に届いていないため Eq. (1) を用いて求められるのは θ_2 となる。基準となる1番の受波器とピンガーの距離 d_1 と真の方位 θ_1 が決まれば

$$d_2^2 = d_1^2 + D_{1-2}^2 - 2d_1D_{1-2}\cos\theta_1 \quad (8)$$

となる。一方、前後に配置した受波器でピンガーの方位を求める場合 (Fig. 8), ピンガーの真の方位は ψ_1 であるが Eq. (2) を用いて求められるのは

ψ_2 である。このとき d_1 と ψ_1 が決まれば

$$d_3^2 = d_1^2 + D_{1-3}^2 - 2d_1D_{1-3}\cos(180^\circ - \psi_1) \quad (9)$$

$$d_4^2 = d_1^2 + D_{1-4}^2 - 2d_1D_{1-4}\cos\psi_1 \quad (10)$$

となる。Eq. (8)–(10) から各受波器とピンガーの距離を求めることができる。よって Eq. (1), Eq. (2) から $c(t_1 - t_2) = d_1 - d_2$, $c(t_3 - t_4) = d_3 - d_4$ であるので

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{d_1 - d_2}{D_{1-2}}\right) \quad (11)$$

$$\psi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{d_3 - d_4}{D_{1-3} + D_{1-4}}\right) \quad (12)$$

となる。Eqs. (11), (12) により求められる θ_2 および ψ_2 が実際に測定される方位となる。このときの方位誤差は $\theta_2 - \theta_1$ および $\psi_2 - \psi_1$ となるが、これには受信機の時間分解能による誤差が含まれていない。そこで Eqs. (11), (12) における各受波器がピンガーの信号を受けた時間差を求めると

$$t_1 - t_2 = \frac{d_1 - d_2}{c} \quad (13)$$

$$t_3 - t_4 = \frac{d_3 - d_4}{c} \quad (14)$$

となる。このとき受信機の時間分解能は $10\mu\text{s}$ であるので、 $100\mu\text{s}$ の単位を四捨五入した値を用いて距離差 $d_1 - d_2$ および $d_3 - d_4$ を改めて求め、Eq. (11) と Eq. (12) に代入することで時間分解能による方位誤差を含める。

2.4 測位実験

実際の海域で既知の位置にピンガーを固定し、測位実験を行った。実験は2012年1月27日に千葉県館山港の水深10m程度の海域で行った。測位精度の推定と同様に、受波器を調査船に固定した(Fig. 4)。このとき、受波器の間隔は左右、前後ともに1.8mとなるように配置した。ピン

ガー（周波数62.5kHz、ソースレベル155dB re μPa at 1m, FPX-1030-60P FUISON 社製）を1s間隔で発信させ、海底付近に設置した。ピンガーの位置はGPSで測定し、設置場所にマーカーとなるブイを浮かべ実験中にピンガーの位置が把握できるようにした。このマーカーブイを目視しながら調査船を移動させ、ピンガーから0～200mの範囲でデータを取得した。まず、ピンガーから徐々に離れていき、ピンガーの方位測定が可能な最大距離を測定した。次に、安定してピンガーの信号が受信できる距離を保ち、ピンガーの位置を中心に円を描くように船を移動させた。しかしこの移動方法では、船に対するピンガーの方位がほとんど変化しないため、さらにピンガーを横切るように船を直進させてデータを取得した。測定時間は8:40～9:52の約72分となった。取得したデータから測位点を求め、真の位置との誤差を算出し、測位精度の推定結果との比較を行った。

3. 結果

3.1 測位精度の推定結果

方位誤差の精度分布の結果の一例を Fig. 9 に示す。この図は2個の観測点が50m離れているときの精度分布図をx-y座標で示したものである。後述の測位実験の受信距離に合わせ、原点を中心に70m×70mの範囲の精度分布図を表している。ピンガーの位置精度はx,y方向ともに0.5m間隔で求めた。基線上では2本の方位線が重なり測位ができないため、計算は行っていない。測位精度は、ピンガーがどちらかの観測点付近にあるときに高くなり、最も精度が高い点では1.6mとなった。ピンガーが観測点から遠ざかるか、基線に近づくと精度が低くなる傾向となった。また、2本の方位線の挟角を交差角とすると、測位精度の分布は交差角に影響している。交差角の範囲を30°ごとに区間分けし、区間ごとに精度を求めて比較すると、交差角60～90°での精度の平均値は4.3m、90～120°では3.5m、120～150°では3.7mとなり、交差角が90～120°の位置にピンガーがあ

Fig. 9 A contour plot of position errors caused by bearing errors. The distance between the two observation points was 50m.

Fig. 10 A contour plot of position errors caused by bearing and GPS errors.

るときに測位精度が最も高い結果となった。交差角がこの区間から外れるに従い精度は低くなった。このような傾向はクロスベアリングを用いて自船の測位を行う場合の特徴と一致する⁶⁾。これにGPSによる船位の誤差を加えた結果をFig. 10に示す。Fig. 9と比べ観測点に近いほど精度が高くなる傾向が弱まり、2本の方位線の交差角による精度分布の傾向が強まった。Fig. 9と同様に2本の方位線の交差角の範囲を30°ごとに区間分けし、精度の平均値を求めると、交差角60°～90°の区間で14.8m、90°～120°では13.8m、120°～150°では15.8mとなり、この場合も交差

角90°～120°の位置にピンガーがあるときの精度が最も高いという結果となった。観測点からピンガーが離れるほど精度は緩やかに低くなり、基線に近づくと急激に精度が悪くなる傾向となった。

3.2 測位実験の結果

4個の受波器全てで受信し、ピンガーの方位を求めることができたデータは473個であった。測定時間が72分であったので平均して1分間に6～7本の方位線を求めることができた。方位線を求めることができた際の観測点とピンガーとの距離は、最大で約120mであったが、安定して方位が得られたのは約70mまでとなった。得られた方位線の交点を測位点とし、ピンガーの真の位置との誤差を求めると、推定値の結果と同様、2本の方位線の関係が平行に近い場合は、その交点が真値から大きく外れる傾向がみられた。そこで、交差角によりデータのフィルタリングを行い、高い精度が得られる交差角の範囲を調べた。その結果、2DRMSによる測位精度は、交差角が $90 \pm 60^\circ$ の範囲で26m、 $90 \pm 50^\circ$ で24m、 $90 \pm 40^\circ$ で23mとなった。これ以上90°を中心に交差角の範囲を狭めた場合も測位精度は23mであった。この交差角の範囲で得られた測位点の数は、全体のデータから求めた測位点の数の2分の1程であった。推定値では最も高い精度となった交差角90°～120°の範囲での2DRMSは21mとなり、実測値でも最も高い精度となったが、データ数は全体の10分の1程となった。Fig. 11はピンガーの位置を原点としたx-y座標上に、実測値の中から交差角が(a) $90 \pm 40^\circ$ および(b) 90°～120°の範囲であった点をプロットしたものである。交差角 $90 \pm 40^\circ$ の範囲では、ほぼすべての測位点が30m×30mの範囲に、90°～120°の範囲では20×20mの範囲に収まり、外れ値を取り除くことができた。

4. 考察

逆クロスベアリングによる測位精度について推定値と実測値を比較した結果、精度分布の傾向が類似していた。このことから、本研究で用いた精

Fig. 11 Results of measurement position of a fixed pinger. The $\times$ -mark, which was on the origin, shows the true position of the pinger, and the circles show the position determined by two azimuth lines. The crossing angle of the azimuth lines was also measured and to extract a measured position with higher accuracy, the data were filtered by the angle. The angular ranges were (a) from 50 to 130 degrees, and (b) from 90 to 120 degrees.

度分布図を用いることで、実測された位置の精度を評価することが可能になると考えられた。しかし、精度の数値を比較すると、最も安定して高い精度が得られる方位線の交差角が $90 \sim 120^\circ$ のエリア (Fig. 10) では、測位精度の平均値が 13.8m であったのに対し、実測値から交差角 $90 \sim 120^\circ$ のデータで 2DRMS を求めると、 21m の精度となり推定値と比べ開きがあった。この範囲に限らず、実測値の精度が推定値と比べ悪くなる傾向となった。この原因としては、機器の測定誤差に加

えて、実際の海域での実験環境による誤差要因を考慮していなかったことが挙げられる。例えば船の動揺による基線の傾きや水中雑音の影響、水温や塩分の変化に伴う音速の変化などである。測位実験を行った日には風の影響でうねりがあり、船が動揺していた。このような環境による誤差の要因も考慮することで、さらに高精度な測位精度の推定が可能になると考えられる。また、方位の計算では、ピンガーと受波器が同一平面上にあると仮定し計算を行っている。そのため、水深が深い場所では誤差が大きくなることが予想される。これについても今後検討していく必要がある。

実測データから交差角によりフィルタリングを行うことでより高い精度が得られることが判明した。交差角 $90 \sim 120^\circ$ で最も高い精度が得られるが、今回の実験では、この範囲の測位点の数は、全データの 10 分の 1 程度となった。そのため十分なデータ量を得られない可能性があり、その場合には交差角の範囲を広げる必要がある。高い精度と十分なデータ量を得るには、効率よく高い精度が得られる交差角になるように方位線を引くことが必要である。そのためは、船の調査線の設定を工夫する必要がある。本方式では、ピンガーの位置をリアルタイムに得ることはできないが、ピンガーの方位を得ることはできる。そこで、リアルタイムに得られるピンガーへ引いた方位線と同じ方向、または真逆の方向を調査コースから外すことで高い精度が得られないデータを減らすことができる。この方法以外にも高い精度でデータの数を増やすには、精度の高い GPS を使用することが考えられる。Fig. 9, Fig. 10 の結果を比べると方位誤差、つまり受信システムの誤差だけを考えたときには精度が高いところで 3.5m の精度であったのに対して、GPS の誤差を加えると 13.8m の精度となり約 10m 精度が悪くなった。そのため、本方式による測位精度は、GPS の精度に大きく影響することが考えられ、より精度の高い DGPS などを用いることによって測位精度が向上することが予想される。全体の測位精度が

向上することによって、ある程度交差角の条件が悪くても高い精度が得られると期待される。

これまで追跡型の受信機で得られる情報は、対象生物が受信範囲内に存在するか否かだけであり、基本的に信号を受信したときの船の位置を対象生物の位置としていた。そのため、対象生物の大まかな移動経路を知ることができたが位置の特定はできなかった。本研究ではクロスベアリングの原理を応用することで、固定したピンガーの位置を約 20m の精度で特定することができた。そのため、定着性の強い根魚や底生生物に関しては、ピンガーを固定した状態で測定した場合と同等の精度で対象生物の位置を特定することができると考えられる。しかし、浮魚などのような積極的に遊泳を行う生物に適用する場合には、2 カ所以上でピンガーの方位を測定する間に対象生物が移動することが問題となる。この場合には調査船を 2 隻に増やし、それぞれから同時に方位を求めることができればこの問題は解消し、遊泳能力のある生物に対しても位置の特定が可能になると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、機器の製作、調整をしていただいた阿部勇三氏、海上実験の際にご協力いただいた東京海洋大学水圏科学フィールド教育研究センター館山湾内支所、伊東順一氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Mitamura, N. Arai, Y. Mitsunaga, T. Yokota, H. Takeuchi, T. Tsuzaki and M. Itani, "Directed movements and diel burrow fidelity patterns of red tilefish *Branchiostegus japonicus* determined using ultrasonic telemetry," *Fish. Sci.*, **71**, 491-498 (2005).
- 2) 伊藤 靖, 三浦 浩, 中村憲司, 吉田 司, "日本海佐渡島羽茂地先の人工漁礁における超音波バイオテレメトリーを用いたマアジの行動様式," *日本水産学会誌*, **75** (6), 1019-1026 (2009).
- 3) 山口敦子, 井上慶一, 古満啓介, 桐山隆哉, 吉村 拓, 小井土隆, 中田英昭, "バイオテレメトリー手法によるアイゴとノトイズミの行動解析," *日本水産学会誌*, **72** (6), 1046-1056 (2006).
- 4) 朴 柱三, 古澤昌彦, "SSBL 方式とピンガー同期方式を組み合わせたバイオテレメトリー方式の開発," *日本水産学会誌*, **72** (6), 1082-1092 (2006).
- 5) 徳岡隆夫, 西村清和, 村上英幸, "中海におけるアカエイを用いたバイオテレメトリーの基礎実験," *汽水域研究*, **6**, 293-298 (1999).
- 6) 松本吉春, 精説・地文航法, (成山堂書店, 東京, 1974), p. 95, 111-121.
- 7) 宮本佳則, 内田圭一, 高尾芳三, 笹倉豊喜, "M 系列信号を用いた新型超音波バイオテレメトリーシステムの開発," *海洋音響学会誌*, **38** (3), 119-127 (2011).
- 8) 平岩 節, "交差方位法, 三点両角法による測位船位の精度分布," *日本航海学会誌*, **41**, 55-60 (1969).
- 9) 平岩 節, "交差方位法, 三点両角法による測位船位の精度分布—II," *日本航海学会論文集*, **50**, 135-140 (1973).
- 10) T. Hiraiwa, "Radius contours of a ship's position fixed by the cross bearings," *J. Jpn. Inst. Navig.*, **68**, 139-145 (1983).
- 11) J. E. Ehrenberg and T. W. Steig, "A method for estimating the "position accuracy" of acoustic fish tags," *ICES J. Marine Sci.*, **59**, 140-149 (2002).
- 12) J. E. Ehrenberg and T. W. Steig, "Improved techniques for studying the temporal and spatial behavior of fish in a fixed location," *ICES J. Marine Sci.*, **60**, 700-706 (2003).