(昭和52年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

水中調査用自動潜水船の位置決定誤差と運動制御

正員 竹内 倶佳* 正員 飯高 弘**

Performance analysis of acoustic positioning systems for
an unmanned submersible for exploration.

by Tomoyoshi Takeuchi, *Member* Hiroshi Iitaka, *Member*

Summary

Acoustic positioning systems are used to provide navigation and positioning for small submersible. Position detection rate and two factors affecting operations performed by submersible are important; one is positioning period and the other is positioning error. Position detection rate has been discussed in the previous articles 1), 2).

In this paper we present a method to assess positioning period from characteristic roots of motion equations of submersible, and we discuss factors affecting positioning error such as signal level, ambient noise, ray bending, sound velocity fluctuations, and submersible motion. Operating simulations are made to examine correlation between the two factors and motion control.

1 緒 言

海洋の観測・計測・調査などを目的としている水中調査用自動潜水船の運航の自動制御用位置決定には、多くの場合超音波を応用する。海中を伝搬する超音波信号は水温、塩分などの影響を受けて音速が変動するとともに、雑音、残響などに乱されて信号のゆらぎが起こる。これらは潜水船の運動制御のための位置決定のときの誤差の原因となっているものである。とくに後者は位置決定が不可能になる場合をしばしば引き起こしている。これは超音波を応用した位置決定システムにおいては避けられないところである。

筆者らは前報^{1),2)}において、位置決定が不可能になる場合がしばしば発生する場合、これらが潜水船の運動制御に及ぼす影響について、計算機シミュレーションによって検討するとともに、信号検出理論を応用して超音波位置計測システムの信号処理において重要な信号対雑音比、位置検出率およびスレッショルド値の関係を明らかにしてきた。

潜水船の運動制御のための位置決定を考える場合、信頼性に影響のある信号検出とともに、位置決定誤差および計測周期が潜水船の運動制御性能を支配する大きな要因になる。本論文ではこのような要因と運動制御の関係について検討したものである。超音波による位置決定の

誤差の要因には次のようなものが考えられる。

- 1) 音速変動によるもの。
- 2) 超音波信号の伝搬経路が直線から大きくはずれることによるもの。
- 3) 超音波信号に雑音などが重畳することからのゆらぎによるもの。
- 4) 音の伝搬時間が遅いことによるもの。
- 5) 計測変数(直距離または方位)から制御変数(位置座標)への変換にともなうもの。

これらについては個々に検討されてきている^{3)~5)}。一方観測系の評価という問題に関しては情報理論的に検討した報告がある^{6)~8)}。この理論を位置決定の評価の指標を得るために応用する。

まず、位置決定誤差の原因を検討し、誤差が具体的にどの程度のものになるのかを明らかにする。その誤差が制御変数へ伝播して行く関係を求める。ここで位置決定系の評価の指標を得る。ついで、潜水船の運動特性を表わす固有値から、計測周期を決定する方法について検討する。最後に具体的モデルのシミュレーションによって、位置計測周期と位置決定誤差の潜水船の運動制御に及ぼす影響について検討する。

2 位置決定誤差

位置計測システムには Fig. 1 に示すように、海底に設置した基準の送波器から送られてくる超音波信号を潜水船上の受波器で受信して方位と直距離を測定する短基線

* 電気通信大学

** 電子技術総合研究所

Fig.1 Geometry of acoustic measuring systems

方式 (SBS) と、海底に設置した三つの送波器から送られてくる超音波信号を潜水船上の一つの受波器で受信して直距離を測定する長基線方式 (LBS) がある。このときの超音波信号はパルスであるが、連続波を送り周波数偏移を測定するドプラ方式もあるが⁹⁾、ここではパルス方式による位置計測システムを想定する。位置決定は直距離の測定が基礎になっている。この誤差には次のようなものが考えられる。

1) 音速の変動による誤差

海中の音の伝搬速度 V は Wilson の実験式¹⁰⁾によると次の式で与えられる。

$$V = 1449.14 + V_p + V_s + V_t + V_{stp} \quad (2.1)$$

V_p , V_s , V_t および V_{stp} はその修正値で、 V_p は圧力、 V_s は塩分、 V_t は温度、 V_{stp} はこの三つに同時に依存する項である。このうち水温に依存する項 V_t の影響が著しい。潜水船の運航海域についての音速は修正値を使用するとしても、海水の温度、塩分の分布は垂直方向、水平方向のいずれにも一様ではなく、かつ時間的にも変動している。(2.1) 式は Mackenzie¹¹⁾ によると 0.2%

以下の誤差で次式で近似される。

$$V = 1449.2 + 4.623 T - 0.0546 T^2 + 1.391(s - 35) \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2)$$

これから、水温、塩分の変化に対する音速変化の係数は

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = 4.6 - 0.11 T \text{ m/(sec)} (^\circ\text{C}),$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta S} = 1.4 \text{ m/(sec)} (\text{ppt})$$

となる。潜水船の運航海域の塩分は一定で水温が 10°C としたとき、水温の変動が最大 1°C ある場合の音速変化は 0.23% となる。これから音速変動による誤差の指標として音速の 0.25% を考えることができよう。

2) 超音波信号の伝搬経路が直線から大きくはずれることに基づく誤差

この誤差も、本質的には音速の変化に基づくものであるが、1) の誤差は音速のゆらぎに基づくものである。Fig. 2 に音速の垂直分布の実測例とその場合の音の伝搬経路を示したものである。この図からわかるように音の伝搬を直線とみることが一般的にはできない。これを直線として近似するには、 s を経路に沿った音の伝搬距離として、Fig. 3 の座標において

$$\frac{ds}{dt} = v(z), \quad \frac{dz}{dx} = \tan \theta, \quad \cos \theta = cv(z)$$

とおくと、次式から伝搬時間は計算できる¹²⁾。

$$t_r = \int_{x_s}^{x_r} \frac{1}{cv^2(z)} dx = \frac{d}{V_m} \quad (2.3)$$

ここで V_m は平均音速、 d は直距離、 $z = z(x)$ は次の微分方程式の解である。

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = - \frac{dv}{dz} \frac{1}{cv(z)^3} \quad (2.4)$$

Fig.2 Sound velocity profile and ray paths

Fig. 3 Ray-path geometry

(2.3) 式から平均音速 V_m を決定することができるが数値計算が必要である。Fig. 2 の例の場合の平均音速は 1km の範囲で 1514m/sec, このとき伝搬時間で 0.1~0.5msec となる。

3) 超音波信号のゆらぎに基づく誤差

海水中を伝搬している超音波信号は海中雑音やスラスト雑音が重畳しているため信号がゆらいでいる。このとき尤度比を計算する最適受信機によって伝搬時間を計測する場合の標準偏差誤差 σ_t は R を信号対雑音比として、

$$\sigma_t \approx \frac{2\delta^2}{R} \quad (2.5)$$

で与えられる⁹⁾。ここで δ はパルス幅である。信号対雑音比 R は直距離 d に依存し、送信信号対雑音比 ST を使って

$$R = (ST) \{S_L S_R\}^2 \frac{1}{d^2} e^{-2\alpha d} \quad (2.6)$$

表わすことができる。 S_L は送波器の特性、 S_R は受波器の特性、 α は減衰係数を示す。(2.5), (2.6) 式から

$$\sigma_t \approx \sqrt{2} \delta d e^{\alpha d} / \{S_L S_R\} \sqrt{ST} \quad (2.7)$$

この誤差は直距離に比例し、送信信号対雑音比の平方根に反比例する。Fig. 4 にこの例を示す。

4) 音の伝搬時間が遅いことによる誤差

これは音の伝搬が遅いことによるもので、直距離を d とすると $(2d)/V_m$ だけ往復伝搬時間が必要となる。この間に潜水船は平均 1.5m/sec で航走しているとすれば $(3d)/V_m$ 移動していることになる。これは検出できないものであり誤差となる。たとえば直距離 $d=1\text{km}$ の

Fig. 4 Range error in positioning system

場合は、 $(3d)/V_m=2\text{m}$ の誤差を与える。これは等価的には音速変動として取扱うことのできる誤差である。

5) 計測変数から制御変数への変換にともなう誤差

この場合の誤差は計測変数 $Y=(d_1, d_2, d_3)$ (直距離または方位角) から制御変数 $X=(x_1, x_2, x_3)$ (位置座標) への変換のとき発生するかまたは近似式を使うときの誤差である。 X と Y の関係式を次のようにおくと、

$$Y=F(X) \quad (2.8)$$

変換にともなう残差を ϵ とすると、位置決定誤差 ΔX と計測誤差 ΔY との間の関係は

$$\Delta Y \approx \frac{\partial F(x)}{\partial X} \Delta X + \epsilon \quad (2.9)$$

となり、関数 F の形に依存する。 $\Delta Y \rightarrow 0$ のときは $\epsilon \rightarrow 0$ で $\Delta X \rightarrow 0$ は満足されるものとする。 ΔY は 1), 2) および 4) の音速変動の分散を σ_v^2 とすれば (2.7) 式から

$$\Delta Y \approx d\sigma_v/V_m + \sqrt{2} (\delta V_m) d e^{\alpha d} / \{S_L S_R\} \sqrt{ST} \quad (2.10)$$

で与えられる。

3 計測周期の決定

潜水船の位置決定は連続的には音の伝搬時間が遅いこと、位置決定のための演算時間が必要なことなどのために不可能である。また、スラストを正転または逆転して運動制御する場合には一方から他方へ移行するとき一定時間の停止が必要である。したがって位置計測周期 T は何等かの基準のもとで決定されなければならない。

前報²⁾ において筆者等は潜水船の運動状態を制御精度とそれを満足するような位置決定精度を基準として、潜水船の運動特性を支配する固有値の分布から決めることができることを示した。潜水船の運動特性は線形化された運動方程式で表現され^{13), 14)}、理想応答性条件を満足するという観点から各運動を支配するモードの固有値について検討されている¹⁵⁾。

潜水船の運動状態を表わす状態変数を $(x_1, \dots, x_{12})$ とすると潜水船の状態方程式は u を入力、 w を外乱として

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw \quad (3.1)$$

これから、計測周期を T として

$$\hat{x}(t) \approx \frac{x(nT) - x((n+1)T)}{T} \quad (3.2)$$

と近似することにより、

$$\begin{aligned} x'(nT) &= (I + AT)x((n-1)T) \\ &\quad + T[Bu((n-1)T) + Dw((n-1)T)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

この近似による誤差 Δx は

$$\begin{aligned} \Delta x &= x'(nT) - x(nT) = A^{-1}(I + AT - e^{AT}) \\ &\quad \times \{Ax((n-1)T) + [Bu((n-1)T) \\ &\quad + Dw((n-1)T)]\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$(I+AT-\exp(AT))$ は T の間における運動特性の近似の程度を表わし, $\{Ax((n-1)T)+[Bu((n-1)T)+Dw((n-1)T)]\}$ は外力 (外乱も含む) の影響を表わしている。ところが Surging, Heaving, Pitching, Rolling, Sway, および Yawing の各運動モードを支配する固有値はそれぞれの運動に固有に対応するような潜水船の形状を設計することができるから¹⁵⁾ 計測周期 T も固有値に対応したものを採用し, 各運動間の干渉のないフィードバック制御が実現できるものと考えられる。

潜水船の位置制御の変数は Surging 運動の速度を表わす x_1 , Heaving 運動を表わす迎角 x_2 , Pitching 運動を表わすピッチ角 x_3 , Rolling 運動を表わすロール角 x_4 , Sway 運動を表わす横すべり角 x_5 , および Yawing 運動を表わすヨー角 x_6 の6つであるが, 超音波を応用した位置計測システムの計測は x_1, x_2, x_7 もしくは x_8 である。他の運動変数 x_3, x_4 または x_5 は姿勢計で測定する必要がある。したがって超音波による位置計測の周期は Surging 運動, Heaving 運動および Sway 運動の各運動モードを支配する固有値は $\lambda_1=-0.048\sim 0.052$, $\lambda_2=\lambda_7=-0.25\sim -0.42$ と与えられている¹⁵⁾。一方 x_2, x_7 は角度の次元をもっており, 定常航走速度 U_0 で無次元化されていること, および x_1 は U_0 を基準としているものであることを考慮する必要がある。このとき (3.4) 式から $x_k((n-1)T)=0$ ($k=1, 2, 7$) とおいて外力が単位ステップ状に印加されたとすると, 誤差を 5m とすると速度誤差は $7.1/T$ (m/sec) になるから $\lambda_k=1$ の

$$|dx_k| = \left| \frac{1}{\lambda_k} (1 + \lambda_k T - e^{\lambda_k T}) \right| \leq \frac{7.1}{T} \quad (3.5)$$

とき $T=6\text{sec}$, $\lambda_k=2.7$ のとき $T=3\text{sec}$ となる。これから位置計測周期は 3sec となる。事例 (OSR-V) について, 計測周期を同様に求めると 3sec が得られる。この計測周期が運動制御上どのような影響を与えるか計算機シミュレーションによって調べてみると Fig. 6 のようになる。シミュレーションの方法は参考文献 1), 16) に基づいている。

これから計測周期が短いときには, 定常の制御状態に落ち着くまでに時間がかかる。これは位置検出率の影響であろうと考えられる。一方周期が長くなると潮流に拡大することのできるだけの推力の発生が不能になり, 流れに乗って流されてしまう。これから最適な位置計測周期があることが予測され, 提案した方法に基づいた計測周期が準最適な値を与えるものと期待される。

4 位置決定誤差と運動制御

潜水船の運動制御のための位置決定系の性能を考える場合, その信頼性を左右する要因となる海中に送られてくる超音波信号の検出と位置決定の誤差がある。信号

検出についての位置検出確率は, 送信信号対雑音比と直距離の関数として表現できる。位置決定誤差についても (2.10) 式によると送信信号対雑音比と直距離の関数になっている。以下位置決定誤差の運動制御に及ぼす影響について事例 (OSR-V)¹⁾ についてシミュレーションによって検討する。

4.1 計測変数と制御変数

潜水船の計測変数 (直距離) と制御変数 (位置) の関係は次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} x_0 (=x_{10}) \\ y_0 (=x_{11}) \\ z_0 (=x_{12}) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \int_0^T (U_0 + x_1) dt \\ \int_0^T (U_0 x_7) dt \\ \int_0^T (W_0 + U_0 x_2) dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0((n-1)T) \\ y_0((n-1)T) \\ z_0((n-1)T) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここに, $\theta (=x_3)$, $\phi (=x_5)$, $\psi (=x_6)$ はオイラー角で

$$T = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & \theta \cos \phi + \phi \sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi & \theta \sin \phi - \phi \cos \phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix}$$

ただし, $\theta, \phi \ll 1$ とした。

(4.1) 式の x_0, y_0, z_0 を超音波位置計測システムにより直距離を計測して決定することになる。しかしながら x_0, y_0, z_0 を決定するための最適配置は d_1, d_2, d_3 をベクトルと考えたとき直交することであるから⁷⁾, 潜水船の運動のいかんにかかわらず直交を保つためには z_0 は水圧計などで直接計測することが望ましいといえる。

位置決定方程式はトランスポンダを $(0, 0)$, $(S_1, 0)$, (S_2, S_3) に配置すると次式のようになる (Fig. 5)。

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + \varepsilon_1} \\ d_2 &= \sqrt{(x_0 - S_1)^2 + y_0^2 + z_0^2 + \varepsilon_2} \\ d_3 &= \sqrt{(x_0 - S_2)^2 + (y_0 - S_3)^2 + z_0^2 + \varepsilon_3} \\ h &= z_0 + \varepsilon_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Fig. 5 Geometry for three transponder positioning net.

これから (2.9) 式は次式になる。

$$\begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0/d_1, & y_0/d_1, & z_0/d_1 \\ (x_0-S_1)/d_2, & y_0/d_2, & z_0/d_2 \\ (x_0-S_2)/d_3, & (y_0-S_3)/d_3, & z_0/d_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix}$$

これから分散, 共分散行列式を計算すると

$$|\Sigma|^2 = \frac{1}{V/(\sigma_1\sigma_2\sigma_3)^2 + S/(\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4)^2}$$

ここで

$$V = \begin{vmatrix} x_0/d_1 & y_0/d_1 & z_0/d_1 \\ (x_0-S_1)/d_2 & y_0/d_2 & z_0/d_2 \\ (x_0-S_2)/d_3 & (y_0-S_3)/d_3 & z_0/d_3 \end{vmatrix}^2$$

$$S = \sigma_2^2 \begin{vmatrix} x_0/d_1 & y_0/d_1 \\ (x_0-S_1)/d_2 & y_0/d_2 \end{vmatrix}^2 + \sigma_1^2 \begin{vmatrix} (x_0-S_1)/d_2 & y_0/d_2 \\ (x_0-S_2)/d_3 & (y_0-S_3)/d_3 \end{vmatrix}^2 + \sigma_3^2 \begin{vmatrix} (x_0-S_2)/d_3 & (y_0-S_3)/d_3 \\ x_0/d_1 & y_0/d_1 \end{vmatrix}^2$$

V, S の各成分はトランスポンダから潜水船を見た方向余弦になっている。 $|\Sigma|^2$ は位置決定系の不確定の程度を表わすものと考えられ, できるだけ小なることがよい。そのためには S, V もも大なることが望ましいが最大1である。 V は直距離 d_1, d_2, d_3 の方向余弦で構成される平行六面体の体積の2乗である。 S は平行六面体の3面を水平面に斜影した面積である。したがってこの立体ができるだけひずみの少ないことが潜水船の位置を決定するうえで有利である。

4.2 実例 (OSR-V) の計算機シミュレーション

実際例について計算機シミュレーションで位置決定誤差の影響を検討する。OSR-V の場合の (4.2) に相当する式は

$$\left. \begin{aligned} \delta l_1 &= l_1 A + \frac{1}{2} l_2 B + \varepsilon_1 \\ \delta l_2 &= l_2 B + \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

である。 A, B は超音波の到来方向の方向余弦である。制御変数 R, ψ への変換は¹⁾

$$\left. \begin{aligned} C &= \sqrt{1-A^2-B^2} \\ R &= h \tan \alpha \\ \tan \psi &= (B \cos \theta \cos \phi - C \sin \phi \cos \theta) / (A + \sin \theta \cos \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

となる。(4.3) 式から分散・共分散

$$|\Sigma|^2 = (\sigma_1\sigma_2)^2 / (l_1 l_2)^2 \quad (4.5)$$

Fig.7 Rangeerror in positioning system of simulation

はこれからハイドロホンの間隔 l_1, l_2 をできるだけ大にすることが望まれるが, 潜水船の大きさで制限されるものである。さらに計測変数から制御変数への変換が必要

Fig.6 Positioning period and motion control of submersible

Fig.8 Positioning error and motion control of submersible.

Table 1 Conditions of operating simulation of submersible

Sampling time	3msec.
Current velocity	1m/sec.
Sound velocity fluctuation	3%
Calculation error	0.5%

となるからこれにもなって (4.5) 式も変る。

Fig. 8, Table 3 に計算機シミュレーションの結果を示す。誤差としては (2.10) 式を使用し、使用した数値については Table 1 にまとめて示す。

5 結果と検討

Fig. 4 または (2.10) 式からわかるように位置決定のときの誤差は直距離に比例的に関係する。したがって潜水船の運動制御のシミュレーションには、Fig. 7 のような誤差を仮定している。さらに位置検出率についても考慮して、平均位置検出率 70% になるように設定してある。制御の目的は潮流に関係なく、一定点に止まることであるので、 R ができるだけ速く 0 の位置に止まることである。結果からわかるように、運動の開始時点は誤差に関係なく、ほぼ同一軌跡を航走しているが、誤差が運動制御に結果として現われてくるのは水平距離で 80m の地点になってからである (Table 2)。このときの σ は Fig. 7 から直距離 500m で 8m である。誤差の大なる場合はそのまま流されてしまい、送信信号対雑音比で 60dB の場合は修正動作に時間を要するが結局 $R=0$ に近い状態に落ち着く。送信信号対雑音比で 70dB の場合は誤差の大ききで、ほぼ 1 桁 (送信信号対雑音比で 20 dB) よくなるが、定常状態に速い時間に落ち着く。位置検出率も送信信号対雑音比の関数であるのでこの影響もあるものと考えられる。このそれぞれに対する $|\Sigma|$ は (4.5) 式から、Table 2 のようにになっており値のより小さい系がすぐれている。この値の絶対値にはこのシミュレーション結果だけから意味づけすることは無理であるが、比較評価のためには有効であろうと考えられる。Table 3 から特に方位決定の誤差の方が大であり、運動制御への影響もそれに比べて大であることが見られる。

6 結 言

超音波を応用した位置計測システムにおいて、潜水船の運動制御にとって重要と考えられる計測周期と位置決

Table 3 Example of positioning error in operation of submersible

ST=50										
R (m)	50	33	33	24	26	34	45	55	65	75
R(measuring)	19	86	37	43	43	64	38	115	540	100
ψ (°)	-90	-113	-72	-140	-137	-122	-97	-64	-114	-114
ψ (measuring)	75	-99	127	-150	-142	-92	-137	36	164	164
ST=60										
R (m)	50	43	24	11	22	38	50	56	60	60
R(measuring)	27	42	32	10	23	23	57	131	53	53
ψ (°)	-90	10	54	94	126	103	67	24	-26	-26
ψ (measuring)	-87	-18	75	126	140	98	85	46	120	120
ST=70										
R (m)	50	43	24	11	23	41	56	66	71	71
R(measuring)	42	39	26	10	23	38	57	65	60	60
ψ (°)	-90	10	54	93	155	130	95	54	9	9
ψ (measuring)	-89	-2	62	105	165	110	105	70	20	20

定誤差について、具体的モデルのシミュレーションによって検討した結果を要約すると、次のようになる。

1) サンプリング (計測) 周期には運動制御上最適なものがあ、固有根の分布から決める方法を提案した。実際例による計算機シミュレーションからこのサンプリング周期の決定が一つの有効な方法であろうと考えられる。

2) 位置決定誤差は位置検出率と同様直距離の関数となり、送信信号対雑音比から誤差を推定することができる。これから潜水船の運動制御にはその有効領域内で直距離の標準偏差誤差で 2~3m 以下でない (Fig. 7) と潮流に流されてしまい、制御不能となる可能性がある。

これらの結果は潜水船の運動制御の目的が変わればそれに応じて変わるものと考えられるが、運動制御のための超音波位置計測システムの設計の指針を与えるものである。

参 考 文 献

- 1) 竹内、飯高：海洋調査自動潜水船の位置検出率と位置制御、日本造船学会、(1976)。
- 2) 竹内、飯高：水中調査用自動潜水船の位置検出率、日本造船学会、(1977)。
- 3) R.C. Spindel, J.L. Durham and R.P. Porter : Performance Analysis of Deep Ocean Acoustic Navigation Systems, IEEE OCEAN, (1975)。
- 4) N. R. Daies : A Theoretical Comparison of Acoustic Systems for Near-Bottom Navigation, IEEE OCEAN, (1972)。
- 5) G. Fain : Error Analysis of Several Bottom Referenced Navigation Systems for Small Submersible, Mine Technology 6 Annual Meeting, Washington, (1970)。
- 6) 木村：観測系の評価に関するひとつの数学的理論、航空宇宙技研報告 301 号、(1972)。
- 7) 赤池：統計モデルと情報量、数理解析研究所講究録 269、(1976)。

- 8) 宮沢：情報・決定理論序説，pp. 335～370，岩波書店，(1976).
 - 9) R. C. Spindel, R. P. Porter, W. M. Marquet and J. L. Durham : A High Resolution Pulse-Doppler Acoustic Navigation Systems, IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol. OE-1, No. 1, (1976).
 - 10) W. D. Wilson : Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure and Salinity, J. Acoust. Soc. Am., 32, (1960).
 - 11) K. V. Mackenzie : Formulas for the Computation of Sound Speed in Sea Water, J. Acoust. Soc. Am., 32, (1960).
 - 12) C. B. Moler and L. P. Solomon : Use of Splines and Numerical Integration in Geometrical Acoustics, J. Acoust. Soc. Am., 48, (1970).
 - 13) 飯高，梅谷：水中調査用自動潜水船の運動と制御に関する基礎的研究 I，日本造船学会論文集，138, (1975).
 - 14) 飯高，梅谷：水中調査用自動潜水船の運動と制御に関する基礎的研究 II，日本造船学会論文集，140, (1976).
 - 15) 飯高，梅谷：水中調査用自動潜水船の運動と制御に関する基礎的研究 III，日本造船学会論文集，141, (1977).
 - 16) M. Kawase : A Maneuvering Simulation of a Submerged vehicle, The 14th ITTC, (Sept., 1975).
-