水中ビークルの位置および姿勢の自動制御 (その 2)

正員 隆 杉 憲 行*

An Automatic Control Method for the Position and the Attitude of an Underwater Vehicle (Part 2)

by Noriyuki Takasugi, *Member*

Summary

The automatic position and the attitude control for the underwater vehicle staying still or moving at dead slow speed becomes non-linear, because the acceleration or the deceleration motion must be applied using thrusters, while the linear control system can be applied to the underwater vehicle cruising at high speed.

In the previous paper, the linear approximation of this non-linear system and a linear design method were proposed.

This paper describes the results of the sea tests of the experimental underwater vehicle, and the evaluations made by the test results which proved the theory and the design method proposed in the previous paper to be applicable to the control of these underwater vehicles.

1. まえがき

水中ビークルを、潮流などの外乱の下で、定位置かつ定姿勢に保つことは、各種海中作業で極めて高いニーズをもっているが、微少擾乱の手法が適用でき本質的に線形系として扱える水中ビークルの航行時の制御問題と異なり、このように定位置、定姿勢の制御では、各自由度方向の速度は、大きさが同程度で、かつ、零を基点とした加減速制御であるため、非線形系となる。

第 1 報¹⁾では、この非線形問題の線形化の方法および線形設計法を提示した。

本報告では、第 1 報で提示した理論および設計法の検証を目的として、実験用水中ビークルによる実船試験を行った結果について報告する。すなわち、供試水中ビークルの第 1 報で提示した設計法の適用設計結果と実船試験結果について報告し、これらの理論および設計手法が、実船試験結果に徴して成立するか否かを考察する。併せて従来他の分野で用いられてきた線形制御系の性能の推定評価法が、水中ビークルのこの種命題にも適用可能か否かについて考察を加える。

2. 供試水中ビークルの概要

実船試験に供した水中ビークルは、全長 11 m, 6 人乗りの水中ビークルで、その主要目を Table 1 に示す。

主推進器は艇尾部に 1 基、艇尾に定常航走中の縦横舵の働きをするシュラウドリングを 1 式設け、更に、水平および垂直スラストを、艇首部および艇尾部に各 1 基設けている。

また、トリムの制御用に水銀トリム調整装置を装備している。位置および姿勢の制御には、主推進器、水平、垂直スラスト各 2 基並びに水銀トリム調整装置を使用している。

その主要目を付録 1 a) に示す。

位置および姿勢の制御に使用した中央処理装置は、日本

Table 1 Principal particulars

Length (OA)	11.0 m
Beam (Max)	3.2 m
Depth	3.2 m
Depth (Max)	3.6 m
Displacement	ab 30 t
Operating Depth (Max)	50 m
Crew	6 men
Speed (Underwater)	3 kt
Longitudinal Trim (Underwater)	±30°
BG (Underwater)	75 mm

* 川崎重工業株式会社 船舶事業本部

電気(株)製, S10(記憶容量 16 K 語, 演算速度 1.6~8.8 μ s, メモリアクセスタイム 0.4 μ s) である。

また, 使用センサーは, ジャイロコンパス, パーチカルジャイロ, レートジャイロ, ドップラソナー, 電磁式流向流速計等で, これらの主要目を付録 1 b) に示す。

3. 自動制御系の設計と設計段階の評価

3.1 制御系の設計

ピークルの位置および姿勢の制御仕様としては, 下記の条件が与えられた。

▼潮流: $0^\circ \sim 360^\circ$ 1 ノット

▼ピッチ角: $\pm 30^\circ$

▼制御自由度: ロールを除く 5 自由度

▼オーバーシュート: $|\Delta X|, |\Delta Y|,$

$$|\Delta Z| \leq 0.085 \text{ m}$$

$$|\Delta \theta|, |\Delta \phi| \leq 0.1^\circ$$

但し, X, Y, Z は地球座標系の位置座標 (直交右手系)
 θ はピッチ角, ϕ はヨウ角

尚, 制御自由度からロールを除いた理由は, 水中で行動中, ロールに対する外乱は比較的小さいと考えられること, 並びにロールをコントロールする場合, 両舷にスラスト, 又は水銀ヒールタンクを装備する方法が考えられるが, いずれの場合も, その他の設計的観点から要求されるピークルの所要幅が小さく, 小さなレバーで速応性の高いロールの制御を行うには, エフェクタが非常に大容量となり, ピークルの小型軽量化を妨げると共に, 消費電力も大きくなるからである。

制御モードとしては, 潮流等の外乱に抗して, 次の三種の機能を持つように設計された。

- i) 位置および姿勢を自動的に保持する機能
- ii) 位置および姿勢を他の自由度を元のまま保持しながら, 所望の自由度に関して自動的に変換するトランスレーション機能
- iii) 他の自由度を保持しながら, 所望の自由度に関して, 任意の速度で移動又は変換する手動付加機能

この中, 位置および姿勢を変換する場合の ii), iii) は, 主としてオペレータの使用勝手から設けたもので, ii) は目標地点迄の距離又は目標とする方位角, 姿勢角等がオペレータにはっきり分かっている場合に, その位置又は姿勢角を, テンキー及びファンクションキーにて入力することによって, 自動的に外乱を補償しながら, 目標地点への位置変換又は目標姿勢角への姿勢変換を行い, その後は, その位置又は姿勢角を保持する機能であり, iii) は目標地点又は目標姿勢角がオペレータに分からず, 徐々に漸近運動を必要とする場合に使用するモードである。

上記機能を付与し, 第 1 報に述べた設計法を適用した自動制御系の機能ブロック図, 主要なゲイン定数等を付録 II に示す。

尚, 供試水中ピークルには, 姿勢角のうちトリムの制御用エフェクタとして, 艇首尾一対の垂直スラストの他に, 水銀トリム調整装置も自動制御系に組込んだ。目的は, 定常航走中の姿勢角の保持を, 極力電力消費を節減しながら実現するためであり, 速い応答速度を要する外乱補償および姿勢角変換は主としてスラストで行い, 定常状態の姿勢角保持は前後部トリムタンク間で調整された水銀の静的モーメントで確保するためである。水銀トリム系については, 遅れを伴う ON-OFF 制御であり, 正確な線形近似が困難であるため, 水銀トリム系を除く全ての系の設計を第 1 報で述べた手法で行った後, シミュレーションで水銀トリム系の設計を行った。

3.2 線形系の性能推定法による制御系の評価

制御系を設計する場合, 通常は性能の推定以外に, まず第 1 に必要なことは系の安定判別である。これには, 通常, 特性方程式の根と係数の関係から, 安定, 不安定を判別する Routh や Hurwitz の方法が用いられるが, 本設計法の場合, 系の安定性は既に保証されており単なる安定, 不安定の判別過程は不要である。なぜなら, レートループは勿論のこと, ポジションループにおいても, 二次系にて近似できることを示した上で, その減衰係数 ζ は, 正をとっているため, この線形近似で置かれた範囲内においては, 安定であることは明らかだからである。

次に問題となるのは, この設計法によって設計された系が, どのような性能をもつかという問題である。

ここでは, 線形制御系の性能推定評価方法の適用を試みた。目的は, 本手法が通常他の分野でよく用いられ, 多くの研究者によって, 適正値と呼ばれている評価指標が発表されているので²⁾⁻⁴⁾, この水中ピークルのこの種制御問題への適用可能性を実船試験により検すること, 並びに, 適用可能とすれば, 本設計法が, 従来他の分野の制御系の適正値といわれている指標に対して, どのような位置付けになっているかを, 設計段階で評価するためである。

尚, この手法が適用可能と考えられる理由は, 第 1 報で述べた通り, 非線形系である本命題の主要構成要素が線形近似可能なこと, 線形近似が困難な非線形要素についても, 飽和要素に関しては, うまく設計された制御系は, 頻繁に飽和を繰り返さないエフェクタ容量をもっていること, および, エフェクタの低回転範囲の静摩擦による不感帯要素は, 極低回転範囲に限られるので, 水中ピークルの運動に大きな影響を与えないと考えられるからである。

以下に, ここで用いた性能推定法の概要を述べる。本手法は, 前述の通り, 陸上プラントの制御系等他の分野でよく用いられている方法であるため, その説明は概要に留め, 主として推定結果を述べる。

この種自動制御系の性能としては, 定常特性と過渡特性又は周波数特性が問題となる。しかも, これらの特性は, 目標値が変化した場合や, 想定される外乱の影響下, 並び

にセンサーを含む制御系に入るノイズの影響下において、考えておかなければならない。

定常特性としては、目標値がステップ状に変化した場合や、ステップ状の外乱又はノイズが系に働いた場合、十分に時間が経った後の目標値と制御量の差、即ち残留偏差(定常位置偏差と呼ぶこともある)が問題となる。

残留偏差は、最終値の定理によって計算推定することができる。まず目標値の変化に関する残留偏差については、目標値のステップ状変化 $v(t) = Au(t)$ (但し、 $u(t)$ は単位関数) に対し、残留偏差 ε_{vp} は、式(1)により求められる。

$$\varepsilon_{vp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_v(t) = \lim_{s \rightarrow 0} [S \cdot W\varepsilon(S) \cdot A \cdot S] \\ = A W\varepsilon(0) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_v(t)$: t -domain における目標値と制御量の差
 $W\varepsilon(S)$: s -domain における $\varepsilon_v(t)$ の伝達関数
 A : 目標値の step 幅

この残留偏差は、目標値が階段状に変化した場合、過渡状態から十分時間が経った時点で残留している目標値と制御量の偏差であって、言うまでもなく極力小さいほうが望ましく、0 が理想的である。

一方、誤差の伝達関数 $W\varepsilon(S)$ は、直結フィードバック制御の場合、

$$W\varepsilon(S) = \{V(S) - X(S)\} / V(S) = 1 - X(S) / V(S) \\ = 1 - W_p(S) \\ = 1 - G_p(S) / \{1 + G_p(S)\} \\ = 1 / \{1 + G_p(S)\} \quad (2)$$

となり、一方、各自由度共 $\lim_{s \rightarrow 0} G_p(S) = \infty$ となるので、 $\lim_{s \rightarrow 0} W\varepsilon(S) = 0$ となる。

ここに、 $V(S)$: 目標値 $X(S)$: 制御量

$W_p(S)$: ポジション系伝達関数

$G_p(S)$: ポジション系前向き伝達関数

次に外乱に対する定常特性としては、第1報付録に示すブロック図の加速度レベルの位置にステップ状の外乱 $D(s)$ が加わるとして、 $D(s)$ に対する位置偏差の伝達関数を用いれば、式(1)と同様にして、残留偏差を推定することができる。

本設計法を適用すれば、残留偏差は各自由度共すべて0になる。

ノイズに対する定常特性としては、ステップ状のノイズがポジション系に加われば、当然の事ながら位置偏差は無限大に発散するので、このようなセンサー系は成立しない。そこで、第1報付録のブロック図に示した通り、レートフィードバック系にステップ状のノイズ $N(s)$ が加わった場合について検討した。

ステップ状のノイズの大きさを A_n 、整定時の残留偏差を ε_{NP} とすれば、式(1)と同様の計算方法で下式を得る。

$$\varepsilon_{NP} = A_n / K_p \quad (3)$$

これより、レートフィードバックループに、ステップ状

のノイズが持続的に存在する場合は、整定後の位置偏差が残留し、その値は、ノイズの大きさに比例し、ポジションゲインに逆比例することが分る。

次に過渡特性並びに周波数特性については、従来線形制御系に関して用いられている手法を、そのまま用いて推定することができる。

すなわち、目標値の変動に対する過渡特性は、系を二次系として推定評価する方法を用いることができる。例えば速応性に関しては、遅延時間 (t_d)、立上り時間 (t_r)、安定性に関しては、減衰係数 (ζ) 等を、閉ループ特性から推定評価することができる。

また、目標値に対する周波数特性は、速応性に関しては共振値 (M_p) を、安定性に関しては位相余裕 (ϕ_m) およびゲイン余裕 (G_m) を求める事によって評価できる。

また、外乱およびノイズに対する周波数特性も、同様な方法で推定評価することができる。

以下に目標値に対する定常特性と過渡特性、外乱に対する定常特性と周波数特性、並びにノイズに対する定常特性と周波数特性の推定結果を述べる。

1) 目標値に対する定常特性と過渡特性

目標値の変化に対する定常特性、即ち時間が十分経過した後の残留偏差並びに速応性および系の安定度の評価指標の推定値を Table 2 に示す。尚、Table 2 の過渡応答については、 K_{pl} (低ゲイン) は X, Y, Z 自由度に関しては、それぞれ偏差が $2m, \theta, \phi$ 自由度は偏角が 10° の場合を示し、 K_{ph} (高ゲイン) はそれぞれ K_{ph} の適用範囲の最大偏位、偏角がある場合の値を示す。この高ゲインの適用範囲はそれぞれ下記の通りである。

$$|\Delta X, \Delta Y, \Delta Z| \leq 0.4 \text{ m}, |\Delta \theta, \Delta \phi| \leq 1.5^\circ$$

実際の制御は、偏位又は偏角が大きい場合、 K_{pl} で制御が始まり、 K_{ph} の適用範囲にはいつてきた時から、 K_{ph} が適用されることになり、厳密な意味では、線形性能推定法は適用できないが、偏位又は偏角が小さい範囲では、高ゲイン (K_{ph}) を一定値とし、偏位および偏角が大きい範囲では、高ゲインを適用する範囲にはいる迄、指令した偏位および偏角におけるゲイン (K_{pl}) を一定値として適用しているので、細かい議論をする場合を除いて、高ゲイン (K_{ph})、低ゲイン (K_{pl}) の両方に分けて評価すればよいものと思われる。

結果は、他の分野で一般に適正值といわれているものと、かなりよい一致を示している。詳細は、実船試験結果と合せて、第5章 考察の項で述べる。

2) 外乱に対する定常特性と周波数特性

艇に定常外乱が作用している場合の整定時の偏差、すなわち、残留偏差と周期的外乱が作用している場合の各自由度の目標値からの偏差の振幅が最大になる外乱の周期と、そのゲインの推定値を Table 3 に示す。

艇に定常外乱が作用している場合も、十分時間が経てば、

Table 2 Steady State and Transient Characteristics of Controller

Characteristics		Surge		Sway		Heave		Pitch		Yaw	
Steady State	Offset (m, deg)	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
	Position Gain	K _{ph}	K _{pl}	K _{ph}	K _{pl}	K _{ph}	K _{pl}	K _{ph}	K _{pl}	K _{ph}	K _{pl}
Transient	td (sec)	11.4	13.3	8.4	11.6	9.0	11.5	3.6	5.3	3.7	5.5
	tr (sec)	9.8	17.5	9.0	26.2	9.2	19.6	4.3	14.3	4.2	12.1
	ζ	0.17	0.55	0.42	0.83	0.31	0.74	0.54	1.12	0.48	0.80
	M _p	3.43	1.07	1.37	1.00	1.85	1.00	1.09	1.00	1.19	1.03
	φ _m (deg)	19	56	45	71	34	67	55	79	50	70
	G _m (dB)	4	12	9	17	8	16	10	18	10	17

Table 3 Steady State and Frequency Characteristics for Disturbance

Characteristics			Surge	Sway	Heave	Pitch	Yaw
Steady State	Offset (m, deg)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Frequency	at Maximum Deviation	Frequency (Hz)	0.034	0.033	0.032	0.100	0.103
		Period (sec)	29	30	31	10	10
		Amplitude Gain	m/kgf 0.010	m/kgf 0.0031	m/kgf 0.0033	deg/kgf-m 0.0031	deg/kgf-m 0.0032

残留偏差は0に収斂する系であることが分る。

周期的外乱が作用する場合、目標値からの偏差も同じ周期をもつ振動となり、その振幅の大きさは外乱の周期によって変わり、最大振幅の偏差を生ずる周期と、振幅の値はTable 3の通りであるが、これより、周期が大きくなっても、小さくなくても、偏差の振幅は小さくなる。周期が小さくなれば、艇が応答しにくくなり、周期が大きくなれば、エフェクタが十分に応答して偏差を小さくするからである。周期∞の極限は定常外乱に相当する。

3) ノイズに対する定常特性と周波数特性

ポジションフィードバック系に定常ノイズ(オフセット)が加わる場合には、系は安定せず、偏差は発散することは明らかであり、ポジションフィードバック系への定常ノイズは、何等かの方法で除去する必要がある、この存在そのものが許されない。

また、ポジションフィードバック系に周期的ノイズが加わる場合には、前項で述べた外乱に対する周波数応答と同

様に、周期が極めて小さいノイズの場合の目標値からの偏差の振幅は小さく、周期が大きい場合には、ノイズの周期と同じ周期で振動的偏差が生じ、周期∞の時、系は発散することが、容易に推察できる。

従って、ここでは、レートフィードバック系に定常ノイズおよび周期的ノイズが加わる場合についての検討結果をTable 4に示す。

レートフィードバック系のノイズは、センサーの検知速度(又は、角速度)をアナログ伝送する場合に生ずることが多いので、100 mVのノイズに対する目標値からの偏差で示した。

周期的ノイズの場合、折点周波数以下の周波数では、偏差の振幅のゲインはフラットになり、周波数が小さくなるにつれて、定常ノイズの場合の残留偏差に漸近し、周波数が大きくなると船体応答が追従しないために、偏差のゲインは急激に減少する。

この間の状況を表す1例として、x-自由度について Fig.

Table 4 Steady State and Frequency Characteristics for Noise

Characteristics		Surge	Sway	Heave	Pitch	Yaw
Frequency	Steady State					
	Offset (m, deg)	0.151 m / 100 mV	0.151 m / 100 mV	0.151 m / 100 mV	0.168 deg / 100 mV	0.176 deg / 100 mV
	Break Point Frequency (Hz)	0.053	0.056	0.054	0.135	0.135
	Break Point Period (sec)	19	18	19	7	7
Frequency	Deviation Amp. at Break Point	0.107 m / 100 mV	0.107 m / 100 mV	0.107 m / 100 mV	0.119 deg / 100 mV	0.124 deg / 100 mV
	Sensor Output Gain	7.2 kts/10V			10deg/sec/10V

Fig.1 Frequency Characteristics for Noise (surge)

1にボード線図の形で示した。アナログ伝送系に乗るノイズとしては、多くの場合、センサーの電源ノイズ又は、伝送系の近傍を通過している動力電線の誘導ノイズであり、本艇の場合、レートジャイロ、並びにドップラーソナーの電源は400 Hz、交流動力電源の周波数は60 Hzであるが、このような高周波のノイズに対しては、偏差のゲインは極めて小さく、全く問題とならないことが分る。

尚、実際には、制御演算を100 ms毎に行っているので、ノイズの周波数としては10 Hz以下であるが、周期が7秒以上の様なノイズは、本艇のシステムでは考えられないので、この面でも全く問題ないものと思われる。

尚、実船試験に先立って電子計算機による供試水中ビークルのシミュレーション試験を行い、非線形要素の制御性能に与える影響、運動自由度間の干渉の状況、課せられた仕様条件に対するエフェクタ容量の適否等を検し、いずれも全く問題がない事を確認した。又、安定でかつ適正な速度性を備えており、総合的に十分に実用に耐える性能を持っている事を確認したが、本報告では、実船試験結果に焦点を絞って述べるものとし、シミュレーションの詳細は省略する。

4. 供試水中ビークルの実船試験

試験は、和歌山県御坊沖、水深42 mの海域で、艇の潜航

深度は約32 mを中心として実施した。前後部水銀トリムタンクは、仕様範囲の姿勢角保持状態で、飽和することがない様に、いずれもほぼ半量でニュートラルトリムとなるように鉛バラストにて調整した。

計測は、艇に常備のセンサーを使用し、記録は、14チャンネルのデータレコーダおよび8チャンネルのペンレコーダを使用した。

計測項目とセンサー及び記録器の対応をTable 5に示す。

これらセンサーの中、ジャイロコンパス、バーチカルジャイロ、レートジャイロ、ドップラーソナーおよび流向流速計については、第2章および付録I b)に示した。

また、主推進器、スラストの回転速度は各電動機の軸に直結したタコジェネレータにより計測した。水銀タンク内の液量は、リニアックス式液量計で計測した。

位置および姿勢を自動的に保持している状態から、これ

Table 5 Items of Measurement

Items of Measurement		sensor		Recorder
1	Ground Velocity (Body Axes System)	Surge	$\dot{x}$	Doppler Sonar
2		Sway	$\dot{y}$	
3		Heave	$\dot{z}$	
4	Velocity Relative to Water (Body Axes System)	x-Direction	U	Current Meter
5		y-Direction	V	
6	Angular Velocity of Pitch	θ		Rate Gyro(measuring [a.d.r.], processed and outputted by computer)
7	Angular Velocity of yaw	ψ		
8	Rev. of Main Thruster	n		Tachometer
9	Rev. of Forward Vertical Thruster	n ₁		
10	Rev. of After Vertical Thruster	n ₂		
11	Rev. of Forward Horizontal Thruster	n ₃		
12	Rev. of After Horizontal Thruster	n ₄		Mercury Level Sensor
13	Weight of Mercury in Fore Trim Tank	W ₁		
1	Deviation of Position (Ground Axes System)	Δx		Doppler Sonar (measuring [x, y, z], processed and outputted by computer)
2		Δy		
3		Δz		
4	Angle of Roll	ϕ		Vertical Gyro
5	Angle of Pitch	θ		
6	Deviation of Bearing	$\Delta \psi$		

Table 6 Results of Auto Positional Translation Trials

Condition		Tidal Current		Auto Translation Command and Result #1					Maximum Deviation during Translation					Offset after Auto Translation					Deviation from Offset					Speed of Response		Maximum Revolution of Effector				
Altitude	Initial Bearing	Ut	Initial Angle of Drift	(Body Axes System)					(Body Axes System)					(Ground Axes System)					(Ground Axes System)					Delay Time	Rise Time	n	n	n	n	n
(m)	(deg)	(kt)	β (deg)	Δx	Δy	Δz	$\Delta \theta$	ψ	x	y	z	θ	ψ	x _s	y _s	z _s	θ_s	ψ_s	x _s	y _s	z _s	θ_s	ψ_s	sec	sec	rpm	rpm	rpm	rpm	rpm
10	330	0.4	90	+2 (+2)	—	—	—	—	+0.9 ₀	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.14	0.18	80	-300	-300	350	300
10	330	0.4	90	-2 (-2)	—	—	—	—	-0.9 ₀	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.25	0.21	70	-250	-250	250	330
10	330	0.4	90	—	+2 (+2)	—	—	—	0	0.9 ₀	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.14	0.25	250	-250	500	500	500
10	330	0.4	90	—	-2 (-2)	—	—	—	0	0.9 ₀	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.13	0.26	245	-250	-750	-400	-450
10	330	0.4	90	—	+2 (+2)	—	—	—	0	-0.9 ₀	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.15	0.20	55	420	570	280	250
10	330	0.4	90	—	-2 (-2)	—	—	—	0	0.9 ₀	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.17	0.23	50	-450	-580	750	200

#1 Commands are shown in upper rows and results are shown in lower parentheses
 #2 0.5 : overshoot

らの中の一自由度を自動又は半自動(手動付加)で変換し、当該自由度の変換状況並びにその他の自由度の保持状況を計測し、変換終了後、全自由度を自動保持として、保持状況を確認した。ここでは、自動位置姿勢変換並びに保持試験の結果について述べる。

i) 自動位置変換試験

0.4 ノットの潮流を真横から受けている状態で、前後進(x)、左右進(y)、上昇下降(z)それぞれ 2 m のトランスレーション試験を行った。トランスレーション指令は、トランスレーションパネルのテンキー及びファンクションキーにて、変換量及び変換自由度を指定して行った。

試験結果の概要を Table 6 に示す。

本表によれば、変換指令値どおりの変換を行っており、変換中の他の自由度は、 ψ の僅かなゆらぎを除いて、完全に保持されており、自動制御を行っていない場合に生ずる連成運動(前後進時の Z , θ の大きな連成運動、横移動時の ψ の連成運動等)は、極めてよく押えられている。更に、変換自由度のオーバーシュートは、事実上 0 (設計上 0.085 m 以下)としたので、各自由度共、殆ど生じていない。

また、変換後は自動的に保持状態に移行するが、位置及び姿勢の保持状態における残留偏差は、各自由度共完全に 0、更にその状態における整定値誤差もジャイロコンパスの分解能を考慮した水平スラストのデッドバンドに基因すると考えられる長い周期の僅かなゆらぎが存在する点を除いて、完全に静定しており、安定度も極めて良好である。実海域試験であるため、潮流はコントロールできないが、0.4 ノットの潮流を真横から受ける状態で自動保持時は勿論のこと、潮流に抗して横移動を行う場合においても、エフェクタは未だ飽和状態に至っておらず、十分に性能の線形推定法が成立する範囲にあることが判る。

実船試験結果の一例を、Fig. 2 に示す。

ii) 自動姿勢変換試験及び自動位置および姿勢保持試験

0.4 ノットの潮流を真横から受けた自動保持状態を初期状態とし、 ψ の自動変換試験を行い、併せて方位変換後の保持状態を確認した。

これは、潮流の方向を変えた位置および姿勢の保持試験

Fig. 2 Example of Auto Positional Translation Trial (Case No. 10-5; $\Delta Z = 2$ m)

と兼ねて行うのを企図したものである。

また、潮流を艇尾方向から受ける状態で、 θ の自動変換試験を行った。 θ の変換による最も大きな連成運動は、艇体に働く揚力変化のために惹起される上下運動と考えられ、これが最大となるのは、潮流を艇首尾方向に受ける場合と考えられるからである。

以上の試験結果の概要を Table 7 に示す。

本表によれば、自動変換量はいずれのケースにおいても、正確に指令値通りの変換を行い、変換中の他の自由度の保持状態も完全である。また、変換後の残留偏差も完全に 0 で、その整定状態もほとんど振動的挙動はなく、完全に近い静定状態を示している。

本表に示した保持状況は、 ψ の変換試験によって潮流を

Condition		Time	Current	Auto translation, Command and Result: Δ (m, deg)								Maximum Deviation during translation (m, deg)				Offset after Auto translation (m, deg)				Deviation from Offset (m, deg)				Speed of Response (min, sec)		Maximum Revolution of Effector (rpm)					Height of Transferred Mercury (kg)			
Altitude	Initial Bearing	Ut	Initial Angle of Drift	Δx	Δy	Δz	$\Delta \theta$	$\Delta \psi$	$\Delta \phi$	$\Delta \chi$	Δy	Δz	$\Delta \theta$	$\Delta \psi$	x_e	y_e	z_e	θ_e	ψ_e	x_o	y_o	z_o	θ_o	ψ_o	Δx	Δy	Δz	$\Delta \theta$	$\Delta \psi$	$\Delta \phi$				
(m)	(deg)	(kt)	B (deg)																															
10	330	0.4	90	—	—	—	—	+10 (+10)	—	0	0	0	0	0.5 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-0.8	0-14	±50	-300	-300	300	-300	
10	340	0.4	80	—	—	—	—	+80 (+80)	—	0	0	0	0	0.5 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-4.6	1-04	±40	-250	360	-360		
10	60	0.4	0	—	—	—	—	+90 (+90)	—	0	0	0	0	0.5 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-51	1-13	60	-250	-300	360	+20	
10	240	0.4	180	—	—	—	—	-5 (-5)	—	0	0	0	0	0.5 0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-0.4	0-11	±40	-750	-400	±200	±200	50
10	240	0.4	180	—	—	—	—	-10 (-10)	—	0	0	0	0	0.5 0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-0.5	0-13	±50	-300	-450	±300	±300	66
10	240	0.4	180	—	—	—	—	15 (-15)	—	0	0	0	0	0.5 0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-10	0-13	-70	-450	-350	±300	±300	58
10	240	0.4	180	—	—	—	—	+30 (+30)	—	0	0	0	0	0.5 0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0-19	0-32	-70	-300	-400	250	250	174

尚、この有符号平方根処理は、手動操縦系に適用すれば、

Fig. 3 Auto Angular Translation Trial
(Case No. 20-3; $\Delta\psi=90^\circ$)

更にその効果は顕著に感知できるものと思われる。

水中ピークルの手動による運動制御において、オペレータが最も悩まされるのが、この連成運動だからである。

5.2 線形設計法の適用性

供試ピークルに、本理論による機体応答特性、エフェクタ応答特性の線形化並びにエフェクタ効果の非連成化法を適用する事によって、水中ピークルの3次元運動の自動制御問題を線形化し、本線形設計法を適用した。

その結果は、第4章に述べた通り、残留偏差は各試験ケース共、完全に0、整定値誤差もほぼ完全に0であり、見事な位置および姿勢の制御を実現した (Table 6, Table 7)。

この結果、本設計法が、完全に成功を収めていると考えてよいものと思われる。

更に、単一自由度毎の設計を適用したにも拘らず、一自由度自動変換中の他自由度の最大偏位、偏角共殆ど0であり、一自由度変換中に惹起される他自由度の連成運動が、当該自由度の制御ループによって独立に完全に押えられている事を示している。

例えば、0.4ノットの潮流を真艇尾から受けながら、ピッチ角を 0° から艇体に対する揚力抵抗変化が最大となると考えられるピッチ角 -30° 迄の変換を、ピッチ角 -5° , -15° , -30° の順で段階的に行い、かつ、 -30° から一気に 0° 迄の変換を行ったが、変換中の x 及び z の偏位は全く起らず、完全に独立に制御されている事が分る (Table 7)。

本試験時、手動操縦に切換えて、やはり真艇尾から、0.4

Fig. 4 Auto Angular Translation Trial
(Case No. 20-8; $\Delta\theta=30^\circ$)

ノットの潮流を受けている状態で、同様のピッチ角を変える試験を行ったが、艇は、たちまち斜め上方に流されてしまった。

一自由度変換中の他自由度に対する連成運動を、当該自由度の制御ループによって、よく制御されている事は、0.4ノットの潮流を真横から受けている状態から、真艇首に受ける様、方位の自動変換を行った場合も、 x 及び y の偏位は全く生じておらず、この事がよく分る試験ケースである (Table 7)。

また、全ての試験ケースにおいて、潮流をいろいろな方向から受けて位置および姿勢の保持を続けている状態で、事実、主推進器、スラスト共にこの外乱に抗すべく回転を続けているのも拘らず、整定値誤差が各自由度共殆ど生じていない事も、各自由度独立の制御が行われている事を示しているといえよう。

なぜなら、一自由度の影響が他自由度に及んだ場合、その自由度の偏位又は偏角がまず発生して、これを補償すべくその自由度が制御されるのがフィードバック制御だからである。

以上述べてきた通り、水中ピークルの3次元位置および姿勢の自動制御問題には、本線形化法並びに単一自由度毎の本線形設計法が適用可能である事が、供試水中ピークルの実船試験で証明されたと考える。

5.3 線形制御系の性能推定法の適用性

前述の通り、水中ピークルの3次元位置および姿勢の自動制御という非線形問題に、本設計法を適用し、その性能評価に通常用いられている線形制御系として推定評価する方法を適用して推定した結果を第3章に示した。

実船試験の結果は、第4章に示した通り、極めて安定な制御特性を示したが、一方、エフェクタ容量の限界潮流（1ノット）下におけるシミュレーションによって、エフェクタの回転速度は、ほぼ飽和しており、これ以上の速応性の向上は望めない事が確認された。すなわち、本設計法でほぼ適正な設計が得られる事が確認された。線形系の性能推定法による供試ピークルの制御特性の評価指標を、経験的な適正值と比較した結果をTable 8に示す。

θ -自由度は、エフェクタとして垂直スラストの他に水銀トリム調整装置を併用しており、応答速度を操作感覚上、 ψ -自由度と同等程度にもってくるには、スラスト単独の過渡応答の評価指標から見れば、若干、過安定気味にする必要があった。

また、適正值としては、高ゲイン(K_{ph})が偏位又は偏角が非常に小さい場合で、主として原位置又は原姿勢角を保持する時に適用されるケースが多い事を考慮して、定値制御において適正值といわれているものと対比し、低ゲイン(K_{pl})は、ステップ状の大きな偏位又は偏角指令を制御系に与えた場合に適用されるケースが多い事を考慮して、追値制御において適正值といわれている値と対比した。尚、これらの適正值として提示されている値は、いずれも水中ピークルの運動制御を対象として研究されたものではない。しかし、Table 8によれば、安定性を表わす指標、即ち減衰係数、位相余裕、ゲイン余裕に関しては、 θ -自由度を除いて非常に一致を示している。

θ -自由度の水銀トリム系については、第3章にも述べた通り、線形設計手法を元々適用していないので、評価の対象からは除外して考えるべきである。

また、速応性指標の一つである共振値については、供試ピークルの場合、一般制御系で経験的にいわれている適正值の範囲を、かなり逸脱しているものもあるが(x 自由度 K_{ph})、安定性が保証されている限り、速応性は高い方がよく、供試水中ピークルの実船試験において全く不安定現象は生じなかったので、共振値による評価は水中ピークルの運動制御の場合、適用の可否と妥当性については、疑問が残るが、その他の評価指標（減衰係数、位相余裕、ゲイン余裕）については、他の分野で推奨されている適正值が水中ピークルのこの種制御問題においても、適用可能といえよう。

次に、定量的な線形制御系の性能推定法による推定値と供試水中ピークルの実船試験結果の比較をTable 9に示す。

尚、Table 9では、推定値、実測値共、位置系(x, y, z)に関しては、2m自動位置変換の場合を、姿勢系(θ, ψ)に関しては10°自動姿勢変換の場合を示す。

Table 9によれば、残留偏差は線形制御系の性能評価法による推定値が各自由度共0であるのに対し、実船試験結果も各自由度共0で、完全に一致している。また、遅延時間、立上り時間もかなりよい一致が見られ、殊に立上り時間（実質変換秒時）は殆ど一致している。

従って、本質的には非線形的水中ピークルの位置および姿勢の自動制御問題を第1報で提示した線形化法により線形化し、線形制御系の設計法を適用した結果の性能の推定評価には、従来他の分野の線形制御問題に使用されてきた手法が適用可能な事が、少なくとも示唆されているといえよう。

但し、遅延時間や立上り時間に関して、線形制御系の性能推定法が適用できるのは、エフェクタの回転速度が飽和を来していない場合に限られる事は、いうまでもない。

Table 9に示した各ケース共、エフェクタの回転速度は飽和に達していない（Table 6, Table 7）。

Table 8 Performance Indices for Linear Automatic Control

Performance Indices		Surge	Sway	Heave	Pitch	Yaw	Well-used Criteria
Damping coefficient	K _{ph}	0.17	0.42	0.31	0.54	0.48	0.2~0.4 (Constant-value Control)
	K _{pl}	0.55	0.83	0.74	1.12	0.80	0.6~0.8 (Follow-up Control)
Peak Gain	K _{ph}	3.43	1.37	1.85	1.09	1.19	1.1~1.5
	K _{pl}	1.07	1.01	1.00	1.00	1.03	
Phase Margin (deg)	K _{ph}	19	45	34	55	50	over 20° (Constant-value Control)
	K _{pl}	56	71	67	79	70	40°~60° (Follow-up Control)
Gain Margin (dB)	K _{ph}	4	9	8	10	10	3~10dB (Constant-value Control)
	K _{pl}	12	17	16	18	17	10~20dB (Follow-up Control)

Table 9 Comparisons of Estimation and Results of Trial

Characteristics		Surge	Sway	Heave	Pitch	Yaw
Offset (m.deg)	Estimation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Trial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Delay Time (sec)	Estimation	13	12	12	5	6
	Trial	14	13	15	5	8
Rise Time (sec)	Estimation	18	26	20	14	12
	Trial	18	26	20	13	14

以上、目標値に対する定常特性並びに過渡特性、周波数特性に関する線形制御系の評価方法の適用性について述べた。外乱及びノイズの制御特性に与える影響も供試水中ピークルに関して線形制御系としての推定法を適用した結果について第3章に述べたが、実船試験結果の整定値誤差が殆ど0であった事から、試験時大きな周期的外乱はなく、また、周期的ノイズの影響は、予測した通り全く生じていないと考えられる。

以上、述べてきた通り、従来他分野で用いられてきた線形制御系の性能評価法は、非線形の水中ピークルの3次元位置及び姿勢の制御問題にも線形化の工夫を行えば、かなりの信頼度をもって適用可能である事が分った。

6. む す び

水中ピークルの非航行時の位置および姿勢の自動制御という非線形系の線形化法と線形設計法を第1報で提示し、本報では、実船試験によりその妥当性を確認した。

すなわち、第1報では、

- ▼エフェクタ（主推進器、スラスト）推力の自乗特性に基因する非線形性と連成問題を制御系に有符号平方根処理を導入する事によって、線形化並びに非連成化する方法を提示した。
- ▼ピークルの機体応答およびエフェクタ応答を線形化（一次遅れ系の線形結合で近似）する方法を提示した。
- ▼上記の線形化の工夫を施した上で、水中ピークルのこの種制御問題で、最もニーズが多いと考えられるオーバーシュートを所望の値以下に押える線形設計法を提示した。尚、この線形設計法は、目標値によってゲインを変える特別の工夫を施した設計法である。
- ▼飽和要素、不感帯要素等非線形要素が、この種制御系の安定性に悪影響を及ぼさない事を示した。

本報では、これらの理論を適用した水中ピークルの実海域試験を行い、第1報で提示した非線形および連成問題の線形化、非連成化が成功し、単一自由度毎の本線形設計法が成立することを示した。

併せて、従来他の分野で使用されてきた線形系の性能推定法が、水中ピークルのこの種命題にも適用可能な事を示した。

本設計法により、十分な制御性能が得られ、不可欠な問題ではないが、今後、この手法における検討課題としては、エフェクタの飽和特性並びに水銀トリム調整装置の特性等、精度の良い線形化が困難な問題の線形近似法を考究し、更に完全な形での線形近似設計法の確立が望まれる。

また、最近有索式無人潜水機への適用が研究されている可変構造制御、就中、スライディングモード制御法とのロバスト性、制御系の安定性、消費電力特性等の観点からの功罪比較と有人、無人等水中ピークルの種類とそのミッションに応じた使い分け等は今後の重要な検討課題といえ、スライディングモード制御法の研究のより一層の進展が望まれる所である。

最後に、本論文の作製に当り、御指導を賜った東大教授 藤野正隆先生、東大名誉教授 元良誠三先生、図表の作製等手伝って頂いた川崎重工業(株) 福田豊君に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 隆杉憲行：“水中ピークルの位置および姿勢の自動制御（その1）”，日本造船学会論文集，第168号，H2年12月
- 2) 電気学会：“自動制御理論”，電気学会，S50年2月
- 3) 水上憲夫：“自動制御”，朝倉書店，S49年11月
- 4) 伊藤正美：“自動制御概論（上）”，昭晃堂，S61年10月
- 5) American Towing Tank Conference：“Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid”，April 1952，SNAME
- 6) M. A. Abkowitz：“Stability and Motion Control of Ocean Vehicles”，The M. I. T. Press，1969
- 7) 土田 陽，平野美木，黒田七郎，田中 拓，津垣昌一郎：“潜水船の縦安定性能”，造船協会論文集，第107号，S35年7月
- 8) 重満通弥：“没水体の縦安定に関する研究”，造船協会論文集，第111号，S37年6月

- 9) 飯高 弘, 梅谷陽二: “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”, 日本造船学会論文集, 第138号, S50年12月
- 10) 飯高 弘, 梅谷陽二: “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”, 日本造船学会論文集, 第140号, S51年12月
- 11) 飯高 弘, 梅谷陽二: “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”, 日本造船学会論文集, 第141号, S52年6月
- 12) M. R. Mendenhall et al: “Prediction of the Unsteady Hydrodynamic Characteristics of Submersible Vehicles”, 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Sep. 1985 at Washington

付録I 使用エフェクタおよびセンサーの主要目

a) 使用エフェクタの主要目

(1) 主推進器, 同用電動機

主推進器

種類: NAU-3-35

直径: 1.365 m

回転速度: 定格 150 rpm

電動機

出力: 5.9 kW

電源: VVVF インバータ

制御: 可逆連続可変速 回生制動

(2) スラストプロペラ, 同用電動機

プロペラ

垂直スラスト

水平スラスト

種類: ダクト式カプラン型 同 左

K-4-60 改

直径(m): ダクト内径: 0.460 同 左

プロペラ径: 0450 同 左

回転速度: 716 rpm 719 rpm

電動機

出力: 9.2 kW 11 kW

電源: VVVF インバータ 同 左

制御: 可逆連続可変速 同 左

回生制動

(3) 水銀トリム調整装置

トリムポンプ

形式: 定吐出量 アキシャルプランジャ
ポンプ全圧力: 15 kgf/cm²G

吐出量: 19 l/min

b) 使用センサーの主要目

(1) ジャイロコンパス

型式: 古野—アンシュッツスタンダードIV型

製造所: 古野電気(株)

精度 1° 以内

追従速度 9°/sec

分解能 0.18° 以内

(2) バーチカルジャイロ

製造所: 東京航空計器(株)

精度(自立精度) ±0.4° 以内

検出範囲 ±45°

分解能 0.2° 以内

(3) レートジャイロ

製造所: 東京航空計器(株)

検出範囲 ±10°/sec

直線性 1% フルスケール以内

分解能 0.001°/sec 以内

(4) ドップラーソナー

型式: Model MRQ-3032 A

製造所: AMETEK, Straza Division

適用範囲 高度約 600 ft 迄 海底面追尾

高度約 600 ft 以上 海水追尾

速度検出範囲 0~12.2 ft/sec (水平面)

0~7.05 ft/sec (鉛直方向)

精度 ±1.0%

分解能 0.01 ノット

(5) 流向流速計

製造所: 北辰電機製作所

方式 電磁式

計測範囲 流速 0~5 kt, 流向 0°~360°

(xy 平面)

分解能 流速 0.02 kt, 流向 1°

精度 流速 (フルスケール) ±2%

流向 ±2°

Table A1 Gain for Rate Loop

Sym.	N a m e	Unit	Const.
GDX	Proportional Gain for Surge	rpm/m.s	2.73e2
GDY	Do. for Sway	rpm/m.s	6.17e5
GQZ	Do. for Heave	rpm/m.s	8.933e3
GIX	Integral gain for Surge	rpm/m	0.216e1
GIX	Do. for Sway	rpm/m	4.72e2
GIZ	Do. for Heave	rpm/m	5.333e3
LMXD	Limiter with Integrator for Surge	m	2048.0
LMYD	Do. for Sway	m	2048.0
LMZD	Do. for Heave	m	2048.0
LSXD	Limiter of Current Velocity for Surge	rpm/s	1.44.0
LSYD	Do. for Sway	rpm/s	1.44.0
LSZD	Do. for Heave	rpm/s	1.44.0
GQD	Proportional Gain for Pitch	rpm/rad/s	1.820e2
GQD	Do. for Yaw	rpm/rad/s	6.15e2
GID	Integral Gain for Pitch	rpm/deg	0.216e3
GID	Do. for Yaw	rpm/deg	2.303e3
GDY	GDQ for Auto Trim Compensation	rpm/deg	3.0e3
QIT	Proportional Gain for Auto Trim Compensator	1/deg	1.0
LMQD	Integral Gain for Auto Trim Compensator	1/deg	0.95
LMQD	Limiter with Integrator for Pitch	rpm/s	1.44.0
LMQD	Do. for Yaw	rpm/s	6.0e3
LMRD	Do. for Auto Trim Compensator	rpm/s	1.44.0

Table A2 Gain for Position Loop

Sym.	N a m e	Unit	Const.
QX	Const. of Gain Curve for Surge		0.4745
QY	Do. for Sway		0.4745
QZ	Do. for Heave		0.4745
GRH	High Gain for Pitch	rad/s/rad	0.5697
PX	Lower Limit of Gain Curve for Surge		0.04808
PY	Do. for Sway		0.04808
PZ	Do. for Heave		0.04808
GQL	Low Gain for Pitch	rad/s/rad	0.2429
QQL	Do. for Yaw	rad/s/rad	0.2429
ZONX	Zone of Gain Curve for Surge	m	0.4
ZONY	Do. for Sway	m	0.4
ZONZ	Do. for Heave	m	0.4
ZONQ	Zone of High Gain for Pitch	deg	1.5
ZONR	Do. for Yaw	deg	1.5
OVRX	Absolute Value of Overshoot for Surge	m	0.085
OVRX	Do. for Sway	m	0.085
OVRZ	Do. for Heave	m	0.085
Gx,	$G_x = P_X + Q_X / \left(\frac{OVRX}{ \delta x } \right)^2$	[In case of $\delta x (\delta y, \delta z) \leq ZONX (ZONY, ZONZ)$]	
Gy,		$G_y = P_Y + Q_Y / \left(\frac{OVRX}{ ZONX } \right)^2$	
Gz,		$G_z = P_Z + Q_Z / \left(\frac{OVRZ}{ ZONZ } \right)^2$	
Gr,	Gr = GRH or GRL		
Ga	Ga = GOH or GOL		
[Time for Switching GRL to GRH (GOL to GOH)] = 2.0 sec			

付録II 制御ブロック図及びゲイン定数

制御ブロック図を Fig. A1, ゲイン定数を Table A1, A2
に示す。

Fig. A1 Block Diagram