無人潜水艇の高度維持制御に関する考察 (第 1 報)

正員 石 谷 久*

A Study on Altitude Control of an Autonomous Vehicle (First Report)

by Hisashi Ishitani, *Member*

Summary

A guidance and control system for an autonomous vehicle of a cruising type with a rudder and elevator is studied, which is intended to investigate the surface of ocean ground continuously. In order to collect underwater information continuously taking pictures or measuring chemical characteristics, it is required to keep low altitude from the surface on the condition that it keeps the safety distance.

In the paper, a simplified altitude control system to keep predetermined height is investigated observing the distances to the surface by several narrow ultra sonic fan beams in different directions. The control system is consist of two hierarchical control blocks, i. e. a guidance block to give attitude reference angle calculated from the observed distances to keep desirable altitude, and a local attitude control block to realize the reference angle keeping the stability of the vehicle. As the attitude control system, a linear feedback elevator angle control system with velocity saturation is adopted, taking account of the system dynamics.

In the guidance block, pitch correction angle is calculated from the observed distances. Three different algorithms, linear, polynomial filtering, and mixed type, are proposed. And the system performance of each is evaluated from various surface conditions by simulation study using simplified two dimensional model in vertical (pitch) plane. Non-symmetric smoothing of the correction angle is also introduced to keep the safety distance for rough surfaces. From the study, it is assured that the proposed control system can control the vehicle to keep the predetermined altitude for most cases within 20% margin, and basic feasibility of the system is verified.

1 緒 言

海底表面の連続的写真撮影等を目的とする海底探査用の無人潜水艇は安全高度を保ちつつ、可能な限り海底面に接近して航行することが要求されるので、進路誘導制御においては安全高度保持は特に重要である。特に海底面が屈曲している場合には、接触を避けつつ、一定高度を保つ経路の実現が必要とされる。

本研究はこのようなミッションを持つ航行型の潜水艇を対象として、指向性のある複数の超音波測距を用いた、簡単で実現容易な高度保持制御方式を検討して、その特性を適当な艇体を仮定したシミュレーションにより評価することを目的とするものである。

ここではその第 1 段階として、問題を単純化して安全高度維持の制御方式の本質的な特性を明確にするため、艇は適当な制御系により適切な姿勢安定性および制御性が確保され、また、ロール方向、ヨー方向の姿勢および

経路は十分安定化されているものと仮定している。また、単純化した動特性を持つ 2 次元の 2 次遅れ系モデルを対象として、高度が問題となるピッチ面内のみの航行制御方式の検討を行っている。

2 システムの基本概念

2.1 基本モデル

潜水艇の高度を推定するため、艇の下方あるいは斜め下方へ微弱な複数の超音波 (ファン) ビームを放射し、その反射波から異なる方向の海底面までの測距を行って安全高度を維持する制御方式を検討する。方式の基本的な特性を評価するため、ロール方向、ヨー方向の運動は適当な姿勢制御と経路誘導によって安定化されているものとし、艇を含む垂直面 (ピッチ面) 内の運動のみを考慮した 2 次元モデルにより、高度維持のための経路誘導方式の基本的な検討を行う。ここではピッチ角は制御翼 (昇降舵) により制御され、艇のピッチ角および角加速度は適当な基準装置により検出可能なものとする。ま

* 東京大学工学部

Fig. 1 The system model

たピッチ面内 1° 、ロール面内 40° 程度で安全距離の3倍程度までの測距が可能な超音波ファンビームにより測距を行うものとする。測距ビームはアレイ状に配置したトランスデューサにより複数のビームを放射するが、海底地形の傾斜の変化まで知るためには少なくとも3本用いることが望ましい。この他に前方障害物を検知するため、 10° 程度の幅の前方水平方向の測距ビームを加え、図1の4本のビームによる測距を考える。図1は艇体下方を基準に角 μ_i だけ前方へ放射されたビームが海底面 P_i で反射され、その点までの距離 D_i が観測される様子を示している。その角度 μ_i の最適値についてはさらに検討を行う予定であるが、本研究では 30° づつ離れたビームにより検討を行った。

本研究はこのようにして得られる D_i から現在高度等の艇の運動状態と海底面形状を推定し、安全高度を保ちつつ経路を誘導制御する手法を一般的に検討することを目的とする。そしてその制御手法を2次元面内運動のみを考慮したモデルに適用し、シミュレーションによりその基本的な性能と実用性の評価を行っている。

2.2 艇の運動モデルと単純化モデル

3次元の潜水艇の運動は文献(1)、(2)に示されるように、一般に機体座標系上の運動方程式で記述されるが、本文ではこの基本方程式を上述の仮定に基づいて2次元面内の運動方程式に単純化する。さらに艇は中立状態で行くものとして、2次元面内の重心位置を x 、姿勢角を θ とし、舵角を δ とおくと、艇の運動は以下のように記述される。

$$dX_{in}/dt = {}^tTv \quad (1)$$

$$d\theta/dt = \omega \quad (2)$$

$$Mdv/dt = -F_1 + F_f + F_t \quad (3)$$

ただし3次元モデルへの一般化を考慮して x としては、 $X-Z$ 平面内位置ベクトル、 θ は Y 軸まわり正方向にピッチ角をとる。また Z 方向は艇体下向を正方向にとる。

(1) Coordinate system

(2) Control surface

Fig. 2 Coordinate system and control surface

また艇体への外力の記述を簡単にするため、運動は基本的には移動体固定座標で記述して慣性系位置座標 X_{in} に変換する。

また M は質量、慣性モーメントを示す行列、 F_1 は遠心力および慣性の流体力、 F_f は流体力、 F_t は外力・制御力を表わし、それぞれ付録に示される。重力および浮力は完全に中立で0と考える。なお(3)式の v は

$$v = {}^t[V_x, V_z, \omega] \quad (4)$$

を示す。

姿勢制御は本体の安定翼とは別個に艇体後方につけた昇降舵によるものとし、推進力は一定推力を維持するものとする。したがって舵角を δ とすれば、その迎え角 α' は本体の迎え角 α を用いて

$$\alpha' = \alpha + \delta \quad (5)$$

となり、これに働く流体力が重心から l だけ離れて作用するので、(3)式第3項の外力は(6)式で表わされる。

$$F_t = \begin{bmatrix} -fv'\sin\delta + fh'\cos\delta \\ fv'\cos\delta + fh'\sin\delta \\ lf v'\cos\delta + lf h'\sin\delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、 fh' 、 fv' はそれぞれ舵に働く流体力であって、(付-3)式と同様に(7)式で示される。

$$\begin{aligned} fh' &= 1/2 \cdot \rho V^2 C'_{Fx}(\alpha') \nabla' R^{2/3} \\ fv' &= 1/2 \cdot \rho V^2 C'_{Fz}(\alpha') \nabla' R^{2/3} \end{aligned} \quad (7)$$

このような艇の基本的な2次元面内運動特性を把握するために文献(1)のパラメータを参考に適当な艇体を仮定して、その制御系をシミュレーションにより検討した。使用したパラメータおよび流体力係数値等は表1にまとめて示される。

これは今後具体的に本方式の適用を計画している、翼の大きい航行型の艇³⁾に比べて不安定な形状なので、舵の翼面積を10%とし、さらに高速の巡航速度(3m/sec)を仮定して制御性を増している。

2.3 基本的な制御特性

上記のシステムの基本特性および姿勢制御特性をシミュレーションによって把握するため、まず舵角とピッチ角の変化ならびに位相面上の軌跡を図3に示している。同図は角速度 ω の絶対値が ω_m に達するまで、舵角 δ

Table 1 Parameters of the simulation model

Items	Notation	Value
Mass	m	3834 kg
Moment of Inertia	I_y	4950 $\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$
Added Mass	A_{xx} A_{zz} A_{xz}	32.0 $\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ 377.0 $\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ 94.3 $\text{kg}\cdot\text{sec}^2$
Body volume	∇_R	3.493 m^3

(1) $|\delta_0|=20^\circ$, $|\omega_m|=10$, $20^\circ/\text{sec}$ (2) $|\delta_0|=10^\circ$, $|\omega_m|=10$, $20^\circ/\text{sec}$ (3) $|\delta_0|=30^\circ$, $|\omega_m|=10$, $20^\circ/\text{sec}$

Fig. 3 The system dynamics (time domain and phase plane trajectories)

を δ_0 に保ち、 $|\omega|=\omega_m$ で $\delta=-\delta_0$ とした場合のリミットサイクルの結果を示している。

基本式とこれ等の位相面軌跡、 ω の時間変化から類推されるように、このモデルは θ , ω が微小角の場合にはほとんど完全な2次積分系とみなされ得るが（純粹の2次積分系の場合は位相面軌跡は完全な放物線となる）、角度が大きくなるにつれて遅れが現われてくる。特に ω が $20^\circ/\text{sec}$ を越えると制御困難となり、非常に不安定になることが示される。また迎え角が大きい時には制御性が低下し、特に舵角が小さい時に影響が大きいことが示される。なお位相面上では迎え角 α は陽に表示されていないが、現実には α の影響がかなり現われるため、静止状態から同一の舵角変動を繰り返しても完全な定常状態に達していない。積分はルンゲクッタ法により時間間隔 $\Delta t=0.1$ 秒で計算している。

以上より、 $20^\circ/\text{sec}$ 程度の飽和による Bang-Bang 制御が適当なこと、また微小角変化では線形制御が有効な

(1) Control system with saturation

condition	k_1	k_2	k_3
$ \Delta\theta \leq 0.1$	1	3	0
$\Delta\theta > 0.1$	1.6	8	0.8
$\Delta\theta < -0.1$	1.6	8	-0.8

(2) Parameters of switching block

(3) Switching line of the control system

Fig. 4 Attitude control system with saturation and its switching line

こと、直線状の切換線を用いる場合は2段階にして特に角速度変化を一定値におさえることが必要なことが示される。したがって図4に示される飽和をもたせた線形制御系を用い、そのゲインは2段階に切り換えるものとする。制御パラメータは(2)に示され、(3)の斜線部が線形領域、斜線の外は飽和領域を示し、この中心が切換線となる。これにより

(1) 大きな角度誤差に対してはほぼ Bang-Bang 制御となり、制御可能な範囲で即応性を保つこと

(2) 線形制御の導入で切換線付近の無駄な舵角変動を防止すること

(3) 微小角変化では線形制御により比較的高速、かつ僅かな行きすぎ (overshoot) で目標角度に収束すること

(1) Step responses

(2) Phase plane trajectories

Fig. 5 Step responses of the linear control system and phase plane trajectories

が可能となる。

図5はこの制御系を用いた場合のステップ応答（各応答を10秒ずつ示す）と位相面軌跡（初期姿勢角 $\theta_0=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合）を示しているが、制御性を失わない範囲で即応性を保っていることが確認される。前述のように制御性の高いパラメータを用いているので、応答も速く10秒以内に 90° の姿勢変化が可能となる。

3 高度維持制御と制御特性

3.1 超音波測距による線形比例制御

艇の位置を (x, z) 、ピッチ角を θ とし、海底面のピッチ面内の断面形状が

$$z_c = f(x) \quad (8)$$

で表わされる時に、艇体下方から角 μ_i だけ前方へ放射された超音波による測距距離を D_i とすれば、 D_i は

$$D_i = D(x, z, \theta, \mu_i, f) \quad (9)$$

と表わされる。一般に海底断面が直線状で、艇がこれに平行に距離 D_1 （ $\mu_1=0$ の測距距離に相当する）だけ離れて移動すると、

$$D_i = D_1 \sec(\mu_i) \quad (10)$$

となるので、規定の安全高度を D_{10} とした時に D_i の基準値 D_{10} は

$$D_{10} = D_1 \sec(\mu_i) \quad (11)$$

と表わされる。したがって、 D_{10} を保ちながら姿勢が $d\mu$ だけ変化した場合には実際の測距距離 D_i は

$$D_i = D_{10} \sec(\mu_i + d\mu) \quad (12)$$

であって、 $d\mu$ が小さい時は、

$$\Delta D_i = D_i \tan(\mu_i) \cdot d\mu \approx D_{10} \tan(\mu_i) d\mu \quad (13)$$

と表わされる。すなわち

$$\varepsilon_i \equiv (D_i - D_{10}) / D_{10} = \tan \mu_i \cdot d\mu \quad (14)$$

となるので、 $\mu_i=45^\circ$ 付近では ε_i がほぼ姿勢角度の誤差 $d\mu$ を与える。

他方実際の高度が D_1 で海底面と平行に移動する場合に、水平距離 H でその高度誤差を回復することを考えると、 D_1 が十分 D_{10} に近ければ

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= \tan^{-1}((D_{10} - D_1) / H) \\ &\approx (D_{10} - D_1) / H = -D_{10} \cos \mu_i \cdot \varepsilon_i / H \quad (15) \end{aligned}$$

だけの修正を加えればよい。いずれにしても ε_i に比例

Fig. 6 Attitude correction $\Delta \theta$ by slant range to the surface D_i

して現在姿勢を修正すれば、海底面が平坦な場合には海底面から一定かつ平行な経路を保持出来る。制御の遅れを考慮すると出来るだけ前方のビームを利用して、フィードバックゲインを下げるのが望ましいので、ここでは D_3 を用いることを考える。 $\mu_3=\pi/3$ よりそのゲインはほぼ0.5が適当であり、この時 H はほぼ D_{10} 程度となる。

以上の仮定により D_3 が得られた場合には地形傾斜角度を推定出来るが、 D_3 が測距不能な場合には D_1 と D_2 を用いてより直接的な傾斜角度を推定することが必要となる。この場合には図6(3)に示されるように D_1, D_2 から修正角 $\Delta \theta$ が直ちに計算可能であるが、特に $D_2 \approx D_{20}$ 、すなわち $\varepsilon_2 \ll 1$ の場合には、 $\mu_2=30^\circ$ の時

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= (D_1 - D_2 \cos \mu_2) / D_2 \sin \mu_2 \\ &= ((\sqrt{3}-1)\varepsilon_1 - \sqrt{3}\varepsilon_2) / (\varepsilon_2 + 1) \\ &\approx -1.7\varepsilon_2 + 0.7\varepsilon_1 \quad (16) \end{aligned}$$

により近似出来る。したがってこの場合にも D_1, D_2 の線形結合により修正目標角を設定可能である。一般に、山頂付近に近づいた時点で D_3 が得られなくなる。

以上より、現在の姿勢角 θ を基準として観測された距離 D_i から上述の姿勢修正目標角を決定し、この値を前述の線形フィードバック制御系の基準角として与えることにより、適当な角度範囲内で即応性のある制御が実現出来る。上述のように、この方式は海底面の傾斜角度を近似的に測距距離の線形演算で求め、これを目標に線形フィードバック制御を行うので全体としても線形の比例制御系で実現出来る。

3.2 屈曲した海底面における制御

一般に海底面は必ずしも解析的な曲面ではなく、滑らかな砂地を除いて微分が不連続な端点が多い。また、前方の障害物は優先して回避する必要がある、このような複雑な地形変化に対して安全高度を保つためには状況に応じた実用的な対応が必要となる。そこでまず前項の考え方に基いた以下の制御論理（タイプ1と呼ぶ）による制御系を構成し、典型的な地形パターンに対する制御特性をシミュレーションにより評価する。

(1) D_3 （前方俯角 30° のビーム）が測距可能な場合は、 $\varepsilon_3 = (D_3 - D_{30}) / D_{30}$ に一定率をかけた値を姿勢修正角とする。そして現在姿勢にこれを加えた姿勢角を制御目標角とする。さらに、 D_2, D_1 が基準値より小さい時は、これを一定距離で復帰するための角度（ D_1, D_2 に比例した修正角）を加えた制御を行う。

(2) D_3 が失われた時（上に凸の形状の場合）は D_1, D_2 から求めた $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ のみを用いて前項と同様の制御を行う。

(3) D_1 のみの応答を得た場合は上に凸の端点に接近したものと考えて、これが基準値以下の場合は D_1 の

Table 2 Proportional feedback control by measured distances (type 1)

case	condition				control logic of type 1
	D_1	D_2	D_3	D_4	
1	○	○	○	×	$\Delta\theta = 0.5\varepsilon_3 - 0.3f(\varepsilon_2) - 0.1f(\varepsilon_1)$ $f(x) = x$; for $x < 0$, 0 ; for $x \geq 0$
2	○	○	×	×	$\Delta\theta = -1.7\varepsilon_2 + 0.7\varepsilon_1$
3	○	×	×	×	$\Delta\theta = -\pi/6$ for $\varepsilon_1 > 1.1$, $\Delta\theta = -0.05$ for $\varepsilon_1 \leq 1.1$
4	-	-	-	○	$\Delta\theta = \pi/2$
5	×	×	×	×	$\Delta\theta = -\pi/2 \times 0.9$

$$\varepsilon_i = (D_i/D_{10}) - 1$$

note ○: within predetermined threshold value
×: over threshold, data not obtained

Fig. 7 Trajectory of the vehicle for smooth surface

みで前項と同様な制御を行う。基準値以上の場合は端点を通じたものとして、安全な範囲で進行下方に旋回を始める。

(4) 前方に安全限界を下まわる応答 ($D_4 < D_{4\min}$) が得られた場合は、安全範囲で最大限の上向き旋回を行う。これは緊急時の衝突防止として最優先とする。

(5) 全方向にわたって応答のない場合は水中を自由に航行可能なので、一定角度で底面に接近するまで潜航する。

図7以後にはこの制御系を構成した場合の姿勢角 θ と海底面への (垂直下方) 距離 D_1 の時間変化ならびに海底面断面形状と潜水艇経路の例を示している。この時の各状況における制御論理および制御パラメータは表2にまとめて示される。また μ_i としては前述のように 30° ($i=1$), 60° ($i=2$), 90° ($i=3$) をとり、安全距離 D_{10} はモデルの諸元と制御性を考慮して 10m とっている。図では時間軸、 X - Z 軸のスケールを省略しているが、図7は約 250 秒、図8は約 400 秒の変化を示しており、

Fig. 8 Trajectory of the vehicle for comparatively complicated surface

また X 方向は約 600m に相当する。

図7は比較的平坦な形状における航行状況を示しているが、この結果は以下のように要約される。

(1) 平坦な状況においては、基本的にはほぼ規定安全高度 D_{10} を維持出来る。ただし局所的な凹凸に対して、艇制御の応答が十分速くないため、20% 程度の偏差を生じ、特に前方が下向き傾斜地形となる時接近しすぎる場合がある。

(2) 図には示されないが、舵角は高度が極値をとる位置 (以後極値点と呼ぶ) を通過する時と局所的な凹凸のある場合を除き、ほとんど線形領域内にあり、大体滑らかな動きで制御可能ことが確認されている。

(3) 姿勢角は地形とほぼ平行となるが、極値点付近を通過する際かなりの overshoot が認められる。

(4) 安全高度の 1/2 程度以下の小さな地形の凹凸には艇の軌道は追従出来ないが、その 2 倍位の変化に対しては十分追従していることが示される。

これに対して図8の結果は地形の変動がより大きく、制御がやや困難な様子を示している。この結果は以下のように要約される。

(1) 直線部は本質的に図7と同じ傾向を示す。局所的なゆるい凹凸に対しては多少接近する。

(2) 高度の極小点に接近する場合、すなわち谷間に入る時は緊急上昇により、ほぼ安全高度を保持しながら滑らかな姿勢変更が実現可能ことが示される。ただし垂直下方距離は地形の関係で一時的には基準値の 2 倍程度まで離れるが、これは安全限界を保つ以上やむをえない。

(3) 高度が極大値をとる位置、すなわち山頂付近を通過する場合は D_3 , D_2 の応答が順次消滅していくため制御モードが変化して直下距離はやや不連続な変化をするが、大体安全高度を維持可能である。

Fig. 9 Approximation of land pattern by polynomial equation

(4) 安全距離と同程度の間隙が存在すると、運動特性上この縁に沿って航行することは不可能であって上端をめざした回避制御が行われる。この結果図8の右端のような地形に対しては上端をかすめた経路となり、安全高度を保持出来なくなる。

3.3 地形を考慮した制御

以上の制御は単純な線形フィードバックにより実現可能であるが、基本的には D_3 のみによるので急峻な地形変化に対しては制御の遅れを生じる。

これに対して複数の測距データを用いれば、単純な計算によりある程度の地形の推定が可能となり、その制御精度が向上する。ここでは地形をビームの反射点 P_1 , P_2 , P_3 を通る2次多項式で近似し、この地形に沿った誘導方式を検討する。計算は図9に示されるように、機体座標系の上で地形 z を x に対する2次式

$$z(x) = ax^2 + bx + c \quad (17)$$

$$a = (x_3 \Delta z_2 - x_2 \Delta z_3) / \{x_2 x_3 (x_2 - x_3)\}$$

$$b = (x_2^2 \Delta z_3 - x_3^2 \Delta z_2) / \{x_2 x_3 (x_2 - x_3)\}$$

$$c = D_1 = z_1 \quad (18)$$

$$\Delta z_i = D_i - D_1 \quad (19)$$

で近似し、制御系の遅れを補償するため、この遅れと速度から定めた適当な距離 x_D 先の点の接線勾配を目標姿勢角とする。すなわち現在姿勢からの修正角 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = -\tan^{-1}(z'(x_D)) \quad (20)$$

$$z'(x_D) = 2ax_D + b \quad (21)$$

で与えられる。また D_3 が得られない場合は D_1, D_2 を

Tabel 3 Control logics of type 2 and type 3

Control logic of type 2			
case	logic		
1	$\Delta\theta = -\tan^{-1}(2ax_D + b)$	$z = ax^2 + bx + c$	passes P_1, P_2, P_3
2	$\Delta\theta = -\tan^{-1}(b)$	$z = bx + c$	passes P_1, P_2
Control logic of type 3			
case	logic		
1	$\Delta\theta = -\tan^{-1}(b_1)$	for $b_1 < b_2$ $b_1 = (z_{i+1} - z_i) / (x_{i+1} - x_i)$	
	$\Delta\theta = -(0.7x\tan^{-1}(b_1) + 0.3x\tan^{-1}(b_2))$	others	
2	$\Delta\theta = -\tan^{-1}(b)$	$z = bx + c$	passes P_1, P_2

for other cases, type 1 logic is applied (Table 2)

(1) Miss distance and pitch angle

(2) Landshape and trajectory of the vehicle

Fig. 10 Trajectory by polynomial filter (smooth surface)

(1) Miss distance and pitch angle

(2) Landshape and trajectory of the vehicle

Fig. 11 Trajectory by polynomial filter (complicated surface)

結ぶ直線勾配を用いる。いずれの場合も D_1 が基準値と異なる時は、これを一定距離内で解消するための修正角を付加する。この制御論理は表3にタイプ2としてまとめて示される。なお、ここでは航行速度が 3m/sec、制御系の時定数はほぼ1秒程度なので、 X_D として5mをとっている。図10, 11にこのような制御の結果を示しているが、図7, 8に比べて D_1 (高度)の変動が小さくなり、安全性が増していることが示される。その反面で姿勢変化、したがって舵角変動はより大きくなり、きめの細かい制御により海底面に、より忠実に追従していることがわかるが、制御系の計算機構、制御エネルギーの負担は増加する。

これに対して、マクロ的には平坦と考えられる地形でも岩石等により局所的に凹凸の激しい地形や凹みのある地形を通過することもある。その例として図12に局所的に凹凸のある地形における航行状況を示す。この制御方式では D_i に基づいて20m程度の範囲の地形を考慮

Fig. 12 Trajectory by polynomial filter
(rough surface)

Fig. 13 Control logic based on piecewise linear approximation (type 3)

した誘導を行うため、20m 内外の凹凸に対して制御系が共振現象を起こし、不安定な経路となる部分が存在する。実際に図 12 でも制御不能部分が現われる。

また、共振現象をおこさなくても、瞬時の3点の観測値から地形を推定するため、この間に含まれる微小な凹凸の情報が得られず、これを系の運動特性により平均化した経路をとることになる。したがって海底面の端点ではかなり接近する場合が生じる。元来微小な凹凸をそのまま追従することは不可能であるが、この制御系の目的は安全高度維持を優先するので、このような凹凸に関する情報をより積極的に利用することが望ましい。特に海底地形は砂地を除き必ずしも滑らかではないので、 P_1 , P_2 , P_3 を2次曲線の代わりに折線で近似した上でより安全な制御論理を構成し、これをタイプ3と呼ぶ。これは基本的には前2者と同じであるが、図 13 に示されるような経路誘導を目的として、表3に示される制御論理を用いる。表には示されないが、前方の障害を検知した場合も P_3 から P_4 への勾配が 90° 以内の場合には $\Delta\theta$ はその勾配の値をとることにより、より効率的な回避を行っている(計算はケース1と類似している)。この結果、タイプ3では直下の地形傾斜を常に監視してこの傾斜以上には接近しないので安全性が高められるとともに、前方障害時の回避は無駄が少なくなる。この結果は図 14

Fig. 14 Trajectory by type 3 control
(smooth surface)

Fig. 15 Trajectory by type 3 control
(complicated surface)

Fig. 16 Trajectory by type 3 control
(rough surface)

以下に示され、不連続な勾配の続く凹凸の激しい区間でかなり改善されるが、なお凹凸地形の山頂付近で接近する様子を示している。

3.4 安全性をあげるための処理

以上の制御はすべて瞬時々の測距距離 D_i に基づいて制御姿勢を決定するが、凹凸のはげしい地形に対しては鋭いピームを用いるため、危険な端点が見失われることにより安全高度維持が困難である。これを防ぐには一度認めた近距離の障害物を何等かの形で記憶する必要があるが、上のシステムでは観測状態の記憶機能は制御系の線形な遅れのみであって、これが平均化されるためその端点では D_{10} より接近する。このような状況に対しては地形および自己の状態を推定する機構を附加するのが理想的であるが、ここでは簡単化のため安全側に非対称なスムージング（平滑化）を行って安全性をあげる制御を検討する。具体的には P_i から求めた制御目標角 $\Delta\theta$

を以下のように非対称に平滑して制御系にその出力 θ を与える。

$$\theta_n = (1 - \alpha)\theta_{n-1} + \alpha\Delta\theta \quad (22)$$

$$\Delta\theta > 0 \quad \alpha = \alpha_1 \text{ (回避時)}$$

$$\Delta\theta < 0 \quad \alpha = \alpha_2 \text{ (潜航時)} \quad (23)$$

ただし、 $1 \geq \alpha_i \geq 0$

特に $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ であれば平滑されないが、 $\alpha_1 \gg \alpha_2$ の場合には一度危険な端点を発見すると、直ちにその状況が平滑器に記憶されることになる。ここでは $\alpha_1 = 0.9$ 、 $\alpha_2 = 0.1$ とした場合の誘導結果の一部を図 17, 18 に示す。当然予想されるように断面形状の端点の包絡線に対して安全高度維持制御を行ったような経路が実現され、全体として D_1 が増加して安全性が増すことが示される。

図 18 は図 15 の地形に対する結果を示し、この場合も多少 D_1 が増加するが、元々の地形変動が比較的滑らかなので、非線形非対称な平滑による経路の変化は少なく、無駄が少ないことが示される。

以上の考察により非対称な平滑を用いることにより海底面の探索は基本的には十分可能なことが確認された。また、平滑により舵角制御量は変動が減少し、より緩やかな姿勢変化となるので、安全性と制御エネルギーの上からもより好ましい制御理論と言える。

4 結 論

以上、複数の超音波測距ビームに基づいた航行型の無人潜水艇の高度維持制御方式を検討し、実現性の高い簡単な制御則による制御系の実用性を検討した。その結果本文に示す制御手法により基本的には一定の安全高度の保持が可能だが、適当な艇体を仮定したシミュレーションによって示された。このような制御においては

(1) 制御系の安定化と経路誘導を階層的に行うことが望ましく、前者は局所的なフィードバック制御により、後者は単純な演算により実現出来る。

(2) 姿勢制御は切換線を用いた線形フィードバック制御で十分安定化可能である。

(3) 経路推定は本文に示した 3 方式の内タイプ 1 が最も簡単だが、局所的凹凸に対して安全性が低下する。

(4) タイプ 2 は滑らかな海底面に対して最も効果的であるが計算量がやや多く、凹凸に対して平滑化が必要である。

(5) タイプ 3 は最も安全であるが、なお局所的な凹凸に対しては平滑が必要である。平滑を行えば通常の地形に対して十分安全高度を保持出来る。

が示された。本研究はこのような制御方式の基本的な実現可能性を 2 次元モデルで分析したものであり、今後実用化に向けて、

(1) Miss distance and pitch angle

(2) Landscape and trajectory of the vehicle

Fig. 17 Trajectory by non-symmetric smoothing (rough surface)

(1) Miss distance and pitch angle

(2) Landscape and trajectory of the vehicle

Fig. 18 Trajectory by non-symmetric smoothing (complicated surface)

- (1) 3次元モデルによる特性検討, 評価
 - (2) 制御パラメータのより細かい最適化 (例えばビーム角度, 誘導計算の繰返し周期等)
 - (3) 海底面等の環境の変化に適応した制御モードの切換え方式
 - (4) データ欠損時のフィルタと安全性確認
 - (5) より具体的な艇体モデルによるシミュレーション
- 等についての検討を進めて行く予定である。

終わりに本研究においては, 超音波測距に関して東京電気通信大学竹内助教授より, また潜水艇の運動特性と数式モデルについては東大工学部河内助教授, 東大生研の浦助教授に有益な御検討, 御助言をいただいた。また艇制御全般については東大工学部小山健夫教授に種々の御指導をいただいていることを記してここに篤く感謝する。

参 考 文 献

- 1) A. Azuma, K. Nasu: The Flight Dynamics of an Ocean Space Surveying Vehicle, 宇宙航空研究所レポート, No. 547 (Vol. 42, No. 2), 1977.
- 2) 石寺他: 遠隔操作式無人潜水艇の運動シミュレーション, 造船学会論文集, 第158号, 1985.
- 3) 浦環, 大坪新一郎: グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その1), 生産研究 (東大生産技術研究所報告), Vol. 37, No. 12, 1985.

付録 シミュレーションモデル

本文のシミュレーションでは重心と浮心が同一で完全に中立な簡略化した2次元モデルを用いるので, (7)式における M, F はそれぞれ

$$M = \begin{bmatrix} m + A_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & m + A_{zz} & A_{xz} \\ 0 & A_{xz} & I_y \end{bmatrix} \quad (\text{付-1})$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} (m + A_x + A_{xz})\omega V_z \\ -(m + A_x)\omega V_x \\ (A_x - A_z)V_x V_z \end{bmatrix} \quad (\text{付-2})$$

$$F_f = \frac{1}{2} \rho V^2 \begin{bmatrix} C F_x(\alpha) \nabla R^{2/3} \\ C F_z(\alpha) \nabla R^{2/3} \\ C N_y \nabla R \end{bmatrix} \quad (\text{付-3})$$

$$+ \frac{1}{2} \rho \nabla R^{5/3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{Nw} \omega |\omega| \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(V_z/V_x) \quad (\text{付-4})$$

で与えられる。ここに α は進行面内の迎え角を表わす。また (5) 式の T は以下に示される。

$${}^tT = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{付-5})$$

本文のシミュレーションにおいては, 文献 (1) のデータを参考にして, 流体力係数として以下の近似式を用いている。

$$C F_x(\alpha) \doteq -0.15 \cos(2\alpha) \quad (\text{付-6})$$

$$C F_z(\alpha) \doteq -1.8 \sin(1.2\alpha) \quad (\text{付-7})$$