

海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の 機体形状の最適化

正員 加藤直三* 正員 小島淳一**
 加藤洋一** 松本重貴**
 正員 浅川賢一**

Optimization of Configuration of Autonomous Underwater Vehicle for Inspection of Underwater Cables

by Naomi Kato, Member Junichi Kojima, Member
 Yoichi Kato Sigeatka Matumoto
 Kenichi Asakawa, Member

Summary

This paper deals with configuration of autonomous underwater vehicle (AUV) for inspection of underwater cables taking low hydrodynamic drag, sensor alignment, collision avoidance maneuver, turning maneuver and rolling motion into account. AUV consists of fuselage of body of revolution with low hydrodynamic drag, fore and aft horizontal wings, upper and lower vertical tails and a pair of horizontal thrusters at both sides of aft horizontal wings. The design process for the horizontal wings and the vertical wings is discussed performing model experiments and numerical simulations.

The shape of fore horizontal wing and that of aft horizontal wing can be determined by use of a non-linear optimization method under the constraints of magnetic sensor alignment for cable tracking, dynamic stability in vertical plane and performance of collision avoidance maneuver.

The performance of turning maneuver and rolling motion are attributed to thrust force difference between a pair of thrusters at both sides of aft horizontal wing, because the shapes of upper and lower vertical tails can be designed from the viewpoint of the dynamic stability in horizontal plane.

1. 緒 言

通信容量の極めて大きな光海底ケーブルの障害は国際通信サービスに大きな影響を与えるため、ケーブル敷設前の海底状況調査や敷設後の敷設状況調査により、障害を未然に防止し、光海底ケーブルの信頼性を高めることが重要である。

一般に海底ケーブルの調査には有索式遠隔操縦水中ロボットが用いられる。しかし有索式であることによって、ケーブルドラムなどの大きな船上装置が必要であること、ロボットの動きに正確に追従する操縦性のよい母船が必要であること、大型ロボットでは機動性に欠け利用可能な母船

も限定されるなどの弱点がある。

それらの弱点を補うべく小型軽量化に重点を置いた自律型無人潜水機(AUV)の実験機「AQUA EXPLORER 1000(AE 1000)」¹⁾が開発され実験が重ねられてきた²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。それらの経験をもとに実用機の開発が行われることになった。その際、流体工学の面からはパワー軽減に結びつく流体抵抗の軽減と海底付近での運動性能の向上が重要な課題として挙げられた。

本研究は、流体抵抗の軽減と海底付近での運動性能の向上を目的として、前方障害物衝突回避運動機能を持ち海底から一定高度を保ちながら海底ケーブルを探査するミッションを持った自律型無人潜水機(AUV)の機体形状の設計法を扱う。

AUVによる海底ケーブルの追跡走行性能は1)ケーブル追跡、2)障害物衝突回避、3)一定高度維持、4)パワー消費の4点で評価される。AE 1000の場合、1)3)の性能については、水槽実験や海洋実験を通して十分な評価が行われているが、2)4)については改善すべき点が残されている。例

* 東海大学海洋学部船舶工学科
 ** 国際電信電話株式会社研究所

原稿受理 平成9年7月10日
 秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

えば、パワー消費の面に関して電子回路、電源、機体形状の総合的な観点から低パワー消費の検討が必要である。機体形状に関して、AE 1000 の胴体の縦断面形状はプロトア 150⁶⁾ と同様に翼形状をしているが、さらに低流体抵抗や高運動性能の面から機体形状の最適化を計る必要がある。これまでの AUV はその形状設計段階で以上の 4 点を考慮されていないのが現状である。本論文は、流体抵抗が少ない胴体の形状、内部の部品配置、海底の最大傾斜、ケーブルを検知する磁気センサーの配置などを拘束条件として、上記の 4 点のうち 3) を除く 3 点を考慮した AUV の翼の配置と大きさを決定する方法について考察する。ただ 3) については、2) の運動性能があれば、基本的性能は保証されることになる。まず、AUV 機体形状の設計方針について説明し、次にその設計方針に基づいた AUV 機体形状の流体特性について、線形運動方程式、模型を用いた流体力計測、流体力微係数の推定値と実験値との比較を示す。次に、水平翼の大きさを、拘束条件のもとで非線形最適化手法を用いて求め、その縦方向の運動性能を考察する。また垂直翼についても、拘束条件のもとで最適化し、その横方向の運動性能を考察する。

2. AUV 機体形状の設計方針

2.1 胴体形状

胴体形状は流体抵抗の小さい Gertler の series 58 model 4156 の回転体^{7),8)} (最大径 D の位置: 前部から全長 L の 40%, 前縁半径: $0.5D^2/L$, 後縁半径: $0.1D^2/L$, プリズマティック係数: 0.65, $L/D=6$) を基本とし、胴体内部部品の大きさからその最大径を求め、内部部品の容量に応じて最大径の部分に平行部を設けて全長を大きくすることとする。

2.2 翼、舵、スラスターの配置

著者の一人は文献 9 で航空機の CCV 技術を用いて AUV のピッチ運動と上下速度間やロール運動とヨー運動間の非干渉化姿勢制御を実現できる機体形状の設計と誘導制御を扱った。そこでは、胴体は回転体とし、縦方向の運動は前部の全可動式水平翼と後部の水平翼と昇降舵によって制御を行い、横方向の運動は上下垂直尾翼に取り付けた舵によって制御を行った。

本研究では、上記の前後に水平翼を有する高い運動性能を持つ AUV の形状を引き継ぎつつ、縦方向の運動について非干渉化を考えないため、前部水平翼に取り付けた昇降舵のみを用いて縦方向の運動制御を行うことを考える。昇降舵を前部水平翼に取り付ける理由は、全可動式後部水平翼によって縦方向の運動を行う AE 1000 では、海底に着底してしまった時、海底から離れるために後部水平翼と後部に取り付けられた水平スラスターを作動させるだけでは水平翼から発生する下向きの揚力のため頭上げが出来ず海底から離れられない困難な状況が見られたためである。その

問題を回避するには前部水平翼に舵を取り付ける必要がある。一方、海底ケーブルを検知する磁気センサー一対はお互いにある間隔離した状態で前方に取付けられ、しかも主たるノイズの発生源であるバッテリーから離す必要があることから、この前部水平翼の両端に取り付けられるのが適當と考えられる。従って前後の水平翼と前部水平翼に取り付けた昇降舵の設計では、前後水平翼の合計の面積が最小になるように、それらの位置と大きさを決定することになる。その場合の制約条件は、1) 磁気センサーから制約される左右の前部水平翼の両端の間隔、2) 縦方向の固有安定性、3) 前方障害物回避運動時において、設定経路角（現場海域での海底の最大傾斜に対応）に達した時、前進移動距離が設定値以下であること、4) 3) の場合において、前部水平翼が失速をおこさないことである。

横方向の運動は後部水平翼に取り付けた左右のスラスターを用いて行うことを考える。これは AE 1000 と同様、停止やその場回頭を可能にするためである。また横方向の安定性のため垂直尾翼を設ける。従って垂直尾翼の設計では、その位置と大きさを決定することになる。その場合の運動性能の条件は、機体の固有安定性、ケーブルトラッキングのための旋回性能、旋回時のケーブル撮影性能や磁気センサーのケーブル検出性能に関するロール角、旋回時の垂直尾翼の失速現象の回避である。

3. AUV の流体力学的特性

AUV の機体形状の最適化を行うにあたり、その抵抗性能や動的応答特性を把握しておく必要がある。まず動的特性を表す AUV の線形運動方程式を示し、次に AUV の模型を用いた流体力計測結果をのべ、線形運動方程式の中でも現れる流体力微係数の実験値と推定値の比較を示す。Fig. 1 に AUV の各部の大きさの定義を示す。

3.1 AUV の線形運動方程式

(1) 鉛直面内の運動方程式

Fig. 2(a) に示す AUV の (O-XZ) 座標系の縦方向の線形運動方程式は、状態変数 $\mathbf{x} = [u, w, q, \theta]^t$ (u : X 方向微少擾乱速度, w : Z 方向微少擾乱速度, q : 微少擾乱ピッチ角速度, θ : 微少擾乱ピッチ角) と出力変数 δa (前部水平翼の昇降舵の舵角) を用いて次のように表せる。

$$\mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{C} \cdot \delta a(t) \quad (1)$$

ここで、行列 \mathbf{A} の要素を a_{ij} ($i, j = 1, \dots, 4$), 行列 \mathbf{B} の要素を b_{ij} ($i, j = 1, \dots, 4$), 行列 \mathbf{C} の要素を c_i ($i = 1, \dots, 4$) とする。それらは次のように表される。

$$\begin{aligned} a_{11} &= m + A_{11}, & a_{12} &= 0, & a_{13} &= m \cdot Z_c, & a_{14} &= 0 \\ a_{21} &= 0, & a_{22} &= m + A_{33}, & a_{23} &= -m \cdot X_c + A_{35}, & a_{24} &= 0 \\ a_{31} &= m \cdot Z_c, & a_{32} &= -m \cdot X_c + A_{35}, & a_{33} &= I_{yy} + A_{55}, & a_{34} &= 0 \\ a_{41} &= 0, & a_{42} &= 0, & a_{43} &= 0, & a_{44} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$b_{11} = F_{HX} u, \quad b_{12} = 0, \quad b_{13} = -(m + A_{33}) \cdot U_z 0,$$

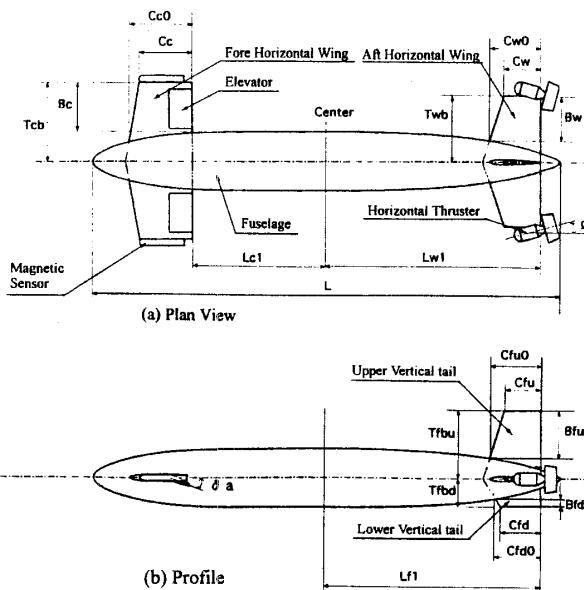


Fig. 1 Notation

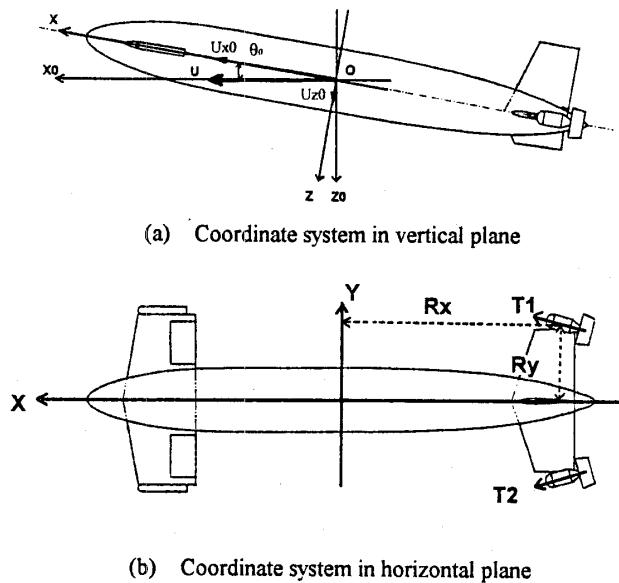


Fig. 2 Coordinate system

$$\begin{aligned} b14 &= (\rho \cdot V_B - m) \cdot g \cdot \cos \theta_0, \quad b21 = 0, \quad b22 = FHZw, \\ b23 &= (m + A11) \cdot Ux0, \quad b24 = (\rho \cdot V_B - m) \cdot g \cdot \cos \theta_0, \\ b31 &= (A33 - A11) \cdot Uz0 + MHYu, \\ b32 &= (A33 - A11) \cdot Uz0 + MHYw, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} b33 &= -m \cdot (Z_c \cdot Uz0 - X_c \cdot Ux0) + A35 \cdot Ux0 \\ &\quad + MHYq, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b34 &= (-m \cdot Z_c + \rho \cdot V_B \cdot Z_B) \cdot g \cdot \cos \theta_0 \\ &\quad - (-m \cdot X_c + \rho \cdot V_B \cdot X_B) \cdot g \cdot \sin \theta_0, \end{aligned}$$

$$b41 = 0, \quad b42 = 0, \quad b43 = 1, \quad b44 = 0$$

$$c1 = 0, \quad c2 = FHZ\delta a, \quad c3 = MHY\delta a, \quad c4 = 0 \quad (4)$$

ただし、 m : AUV の質量、 Aij : 付加質量、 I_{yy} : 慣性モーメント、 (X_c, Y_c) : 重心の座標、 (X_B, Z_B) : 浮心の座標、

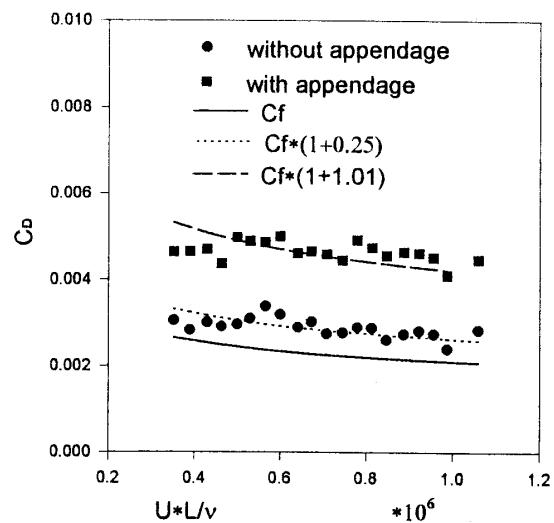


Fig. 3 Drag coefficients

$(Ux0, Uz0)$: 釣合状態での前進速度成分、 V_B : 排水容積、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 θ_0 : トリム角、 $FHZu$, $FHZw$, $FHZq$, $MHYu$, $MHYw$, $MHYq$, $FHZ\delta a$, $MHY\delta a$: 流体力学係数。

(ii) 水平面内の運動方程式

Fig. 3 に示す両側のスラスター推力 $T1$, $T2$ を平均推力 $T0$ と平均推力からの偏差推力 ΔT 用いて次式に表す。

$$T1 = T0 - \Delta T, \quad T2 = T0 + \Delta T \quad (5)$$

Fig. 3 に示す AUV の (O-XY) 座標系の水平面内の線形運動方程式は、状態変数 $x = [v, p, r, \phi, \psi]^T$ (v : Y 方向微少擾乱速度, p : 微少擾乱ロール角速度, r : 微少擾乱ヨー角速度, ϕ : 微少擾乱ロール角, ψ : 微少擾乱ヨー角) と出力変数 ((5)式の定義による偏差推力) を用いて次のように表せる。

$$D \cdot \dot{x} = E \cdot x(t) + F \cdot \Delta T(t) \quad (6)$$

ここで、行列 D の要素を dij ($i, j = 1, \dots, 5$), E 行列の要素を eij ($i, j = 1, \dots, 5$), F 行列の要素を f_i ($i = 1, \dots, 5$) とすると、それらは次のように表せる。

$$\begin{aligned} a11 &= m + A22, & a12 &= -m \cdot Z_c + A24, & a13 &= m \cdot X_c + A26, & a14 &= 0, & a15 &= 0, \\ a21 &= -m \cdot Z_c + A24, & a22 &= I_{xx} + A44, & a23 &= J_{xz} + A46, & a24 &= 0, & a25 &= 0, \\ a31 &= m \cdot X_c + A26, & a32 &= J_{xz} + A46, & a33 &= I_{zz} + A66, & a34 &= 0, & a35 &= 0, \\ a41 &= 0, & a42 &= 0, & a43 &= 0, & a44 &= 1, & a45 &= 0, \\ a51 &= 0, & a52 &= 0, & a53 &= 0, & a54 &= 0, & a55 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} e11 &= FHYv, & e12 &= (m + A33) \cdot Uz0 + FHYp, \\ e13 &= -(m + A11) \cdot Ux0 + FHYr, \\ e14 &= g \cdot (m - \rho \cdot V_B) \cdot \cos \theta_0, \\ e15 &= 0, & e21 &= (-A33 + A11) \cdot Uz0 + MHXv, \\ e22 &= (-m \cdot Z_c + A24) \cdot Uz0 + MHXp, \\ e23 &= (m \cdot Z_c + A26) \cdot Uz0 + MHXr, \\ e24 &= g \cdot (Z_B \cdot \rho \cdot V_B - m \cdot Z_c) \cdot \cos \theta_0, & e25 &= 0, \\ e31 &= (-A22 + A11) \cdot Ux0 + MHZv, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 e32 &= (m \cdot X_G + A35) \cdot Uz0 - A24 \cdot Ux0 + MHZp, \\
 e33 &= -(m \cdot X_G + A26) \cdot Ux0 + MHZr, \\
 e34 &= g \cdot (m \cdot X_G - X_B \cdot \rho \cdot V_B) \cdot \cos \theta 0, \\
 e41 &= 0, b42 = 1, e43 = \tan \theta 0, e44 = 0, \\
 e45 &= 0, e51 = 0, e52 = 0, \\
 e53 &= 1/\cos \theta 0, e54 = 0, e55 = 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 f1 &= -2 \cdot \sin \Omega, f2 = 0, f3 = 2 \cdot Rx \cdot \sin \Omega + 2 \cdot Ry \cdot \cos \Omega \\
 f4 &= 0, f5 = 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

ただし、 I_{xx} , J_{xz} , I_{zz} ：慣性モーメント； $FHYv$, $FHYp$, $FHYr$, $MHXv$, $MHXp$, $MHXr$, $MHZv$, $MHZp$, $MHZr$ ：流体力学係数。

3.2 AUV の流体力学計測

Table 1 に示す縮尺比 1/3.7 の長さ 1.0(m) の模型を用いた。実験は、観測部の長さ 2.2 m, 幅 1.4 m, 深さ 0.9 m を持つ縦型回流水槽で行った。模型は、その中心が水槽のほぼ半分程度になるように没水させた。流体力は水面上部に取り付けた三分力計を用いて測定した。縦方向と横方向の運動性能を知るため、模型が水平状態と模型の長手軸まわりに 90 度回転した垂直状態の 2 種類につき、計測を行った。模型は支持棒で吊り下げられるので、模型単体に働く流体力は、支持棒付きの模型に加わる流体力から支持棒だけに加わる流体力を差し引いて求めた。また、模型本体に磁気センサー模型とスラスター模型を装着した場合（付加物付きと呼ぶ）と装着しない場合（付加物なしと呼ぶ）の 2 状態を扱った。

試験項目は、(1) 抵抗試験（流速は 0.368 m/s～1.094 m/s の範囲）、(2) 斜航試験、(3) 舵角試験、(4) 強制動揺試験（縦方向における pure heave 運動、pure pitch 運動、横方向における pure sway 運動、pure yaw 運動）である。ただし、ここでは前記 3 つの結果をのべ、第 4 項目の結果は次節で述べる。

(i) 抵抗試験

Fig. 3 にレイノルズ数 ($Rn = U^*L/\nu$, ν : 動粘性係数, U : 流速, L : 模型長さ) に対する付加物付きの抵抗係数 C_D (抵抗値を $0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L^2$ で無次元化したもの、ただし、 ρ : 流体密度) と付加物なしの抵抗係数、(10)式に示す Schoenherr の式を用いた摩擦抵抗係数 C_f 、付加物付きとなしの場合の各々に対して形状影響係数 k を用いた粘性抵抗係数を示す。

Table 1 Principal dimensions of tested AUV model

L	1.0 m	Ω	0°			
L_{cl}	0.286 m	L_{w1}	0.458 m	L_{f1}	0.458 m	
C_{c0}	0.136 m	C_{w0}	0.108 m	C_{fu0}	0.108 m	C_{fd0}
C_c	0.113 m	C_w	0.078 m	C_{fu}	0.078 m	C_{fd}
B_c	0.105 m	B_w	0.095 m	B_{fu}	0.100 m	B_{fd}
T_{cb}	0.167 m	T_{wb}	0.139 m	T_{fbu}	0.145 m	T_{fdb}

$$0.242/\sqrt{C_f} = \log_{10}(C_f \cdot Rn), C_f = C_f \cdot S/L^2 \tag{10}$$

ただし、 S は付加物なしの模型の表面積を表す。付加物なしの場合は $k=0.25$ であるが、付加物付きの場合は $k=1.01$ で、約 4 倍となっている。

Fig. 4 に求めた形状影響係数を用いて実機の有効パワーの推定を行った。

$$P = 9.8 \cdot R \cdot U (\text{watt}) \tag{11}$$

ただし、 R は全抵抗 (kgf) を表す。付加物の影響が大きいことがわかる。

(ii) 斜航試験

Fig. 5(a), (b) に各々鉛直面内と水平面内の斜航試験における流体力係数の定義を示す。ここで、

$$\begin{aligned}
 CD &= \frac{D}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L^2}, CL = \frac{F_L}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L^2}, \\
 CM &= \frac{F_M}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L^3}
 \end{aligned} \tag{12}$$

CD : 抗力係数, D : 抗力, CL : 揚力係数, F_L : 揚力, CM : モーメント係数, F_M : モーメントを表す。

Fig. 6 に鉛直面内の流体力係数を示す。この範囲の迎角では顕著な失速現象は見られない。抗力係数と揚力係数は付加物ありの場合が付加物なしの場合より大きくなる。モーメント係数はその逆の傾向を示す。Fig. 7 に水平面内の流体力係数を示す。鉛直面内のモーメント係数と比較して一桁ほど値が小さい。抗力係数とモーメント係数は付加物ありの場合が付加物なしの場合より大きくなる。揚力係数はその逆の傾向を示す。

(iii) 舵角試験

Fig. 5(c) に舵角試験における流体力係数の定義を示す。Fig. 8 に付加物付きの模型について、舵角変化に対する

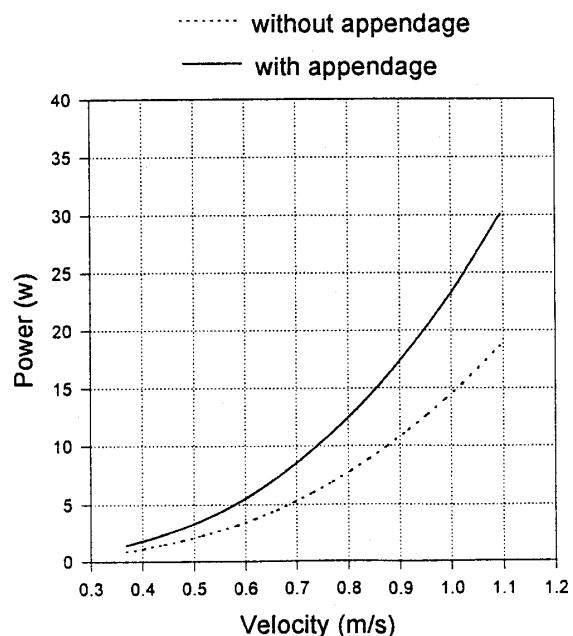
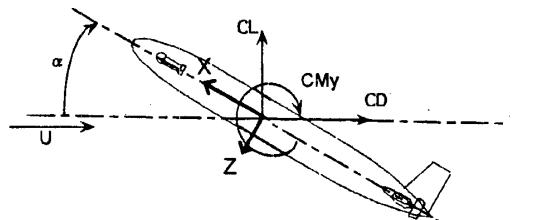
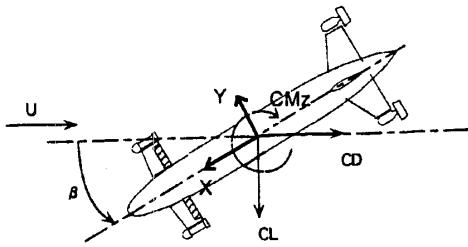


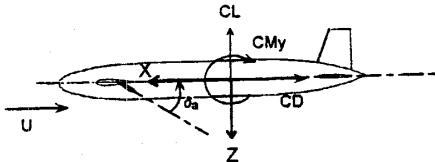
Fig. 4 Power estimation



(a) Hydrodynamic coefficients in vertical plane in oblique test



(b) Hydrodynamic coefficients in horizontal plane in oblique test



(c) Hydrodynamic coefficients in vertical plane in elevator test

Fig. 5 Notation of hydrodynamic coefficients in tank test

	CL	CD	CMY
with appendage	●	■	▲
without appendage	○	□	△

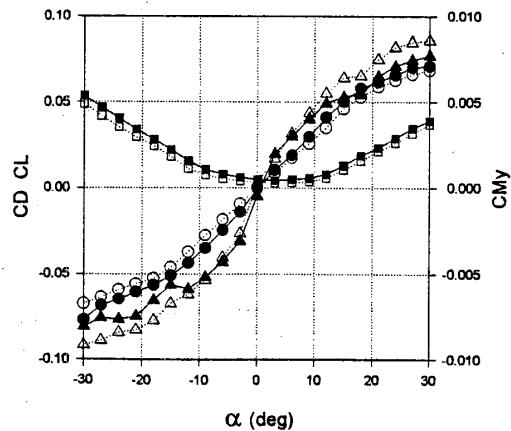


Fig. 6 Experimentally measured hydrodynamic coefficients in vertical plane

流体力係数を求める。この範囲の舵角では失速現象は発生しないことがわかる。

3.3 流体力微係数の推定値と実験値との比較

	CL	CD	CMz
with appendage	●	■	▲
without appendage	○	□	△

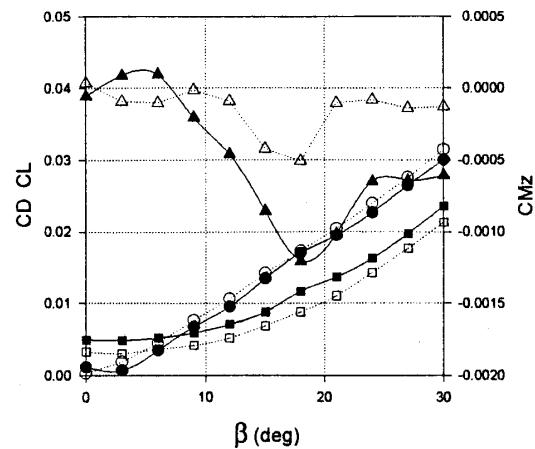


Fig. 7 Experimentally measured hydrodynamic coefficients in horizontal plane

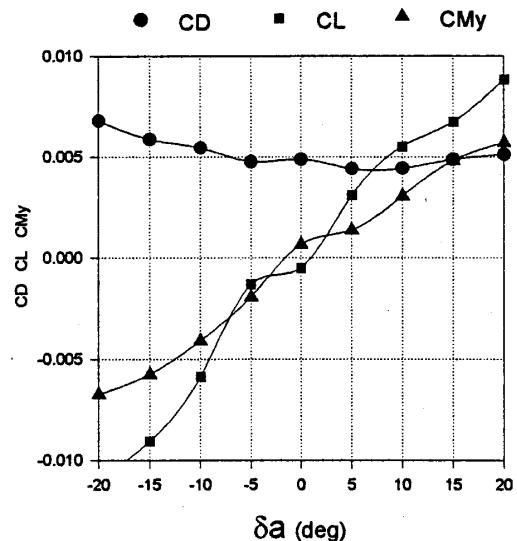


Fig. 8 Experimentally measured hydrodynamic coefficients in vertical plane in elevator test

付加質量の推定は、次のように行った。すなわち、全体の付加質量を胴体部分と翼部分の和とし、胴体部分に関しては三次元吹き出し特異点分布法を用いて求め、翼部分に関しては二次元平板のものを用いた。流体力微係数の推定についても、相互干渉を無視して胴体部分と翼部分の和として DATCOM 法¹⁰⁾を用いて求めた。Table 2 に流体力微係数の推定値と実験値との比較を示す。ただし、実験値は付加物なしの状態の値を示す。

Table 2 Comparison of hydrodynamic coefficients between estimation by DATCOM method¹⁰⁾ and measurement

in vertical plane		in horizontal plane			
	estimation	measure- ment		estimation	measure- ment
FII Zw/C1	-0.1341	-0.1712	FII Yv/C1	-0.0364	-0.057
FII Zq/C2	0.0221	0.1000	FII Yr/C2	0.0334	0.020
MII Yw/C2	0.0223	0.0302	MII Zv/C2	-0.0014	0.0012
MII Yq/C3	0.0088	-0.057	MII Zr/C3	-0.0130	-0.0150
FII Z δ a/C4	-0.0362	-0.0293	A22	0.7434	1.30
MII Y δ a/C5	0.0140	0.0189	A26	-0.2964	-0.180
Δ33	0.9654	1.80	A66	0.0417	0.040
Δ35	-0.0379	-0.20			
Δ55	0.0744	0.030			

$$C1 = \rho \cdot U \cdot L^2 / 2, C2 = \rho \cdot U \cdot L^3 / 2, C3 = \rho \cdot U \cdot L^4 / 2, \\ C4 = \rho \cdot U^2 \cdot L^2 / 2, C5 = \rho \cdot U^2 \cdot L^3 / 2$$

4. AUV の機体形状の最適化

前章で述べた AUV の線形運動方程式をもとに、一例を取り上げて AUV の機体形状の最適化を行う。具体的には、AUV の前進速度を 1 m/s として、胴体形状とその重量分布を与え、各々水平翼と垂直翼の最適化を縦方向および横方向の運動方程式を用いて行う。水平翼の最適化には、非線形最適化手法の一つである Hooke & Jeeves 直接探索法¹¹⁾を用いる。

4.1 水平翼の最適化

(i) 拘束条件

機体の全長 L 、前部水平翼と後部水平翼の位置を表す L_{c1} と L_{w1} (Fig. 1 参照) を与えて、各水平翼の大きさ、具体的には、Fig. 1 に示す C_{c0}, C_c, C_{w0}, C_w の各翼弦長を与える、翼幅 B_c と B_w の最適化を行うことを考える。最小化を計る評価関数に(13)式で定義するパラメータ P_1 をとり、以下の拘束条件を与えるものとする。

$$P_1 = (\text{前部水平翼面積} + \text{後部水平翼面積}) / \text{胴体縦断面積} \quad (13)$$

(1) 機体固有の減衰係数の最小値 (ζ) が 0.1 以上。

これは AUV が水中で制御不能に陥ったときも固有安定を保つためである。

(2) 艦体の中心軸から前部水平翼の翼端までの距離 (T_{cb}) が 0.5 m 以上。

これは、左右の前部水平翼の翼端に取り付けられる磁気センサー一対は間隔が 1 m 以上離れることが望ましいからである。

(3) 前部水平翼の昇降舵 (前部水平翼の面積の 30%) の舵角を 10° にとったときの上昇性能において、経路角が 30° に達したとき、機体の前進水平移動距離を 5 m 未満であること。

これは、前方障害物衝突回避運動性能を計るものであ

る。

(4) (3)の状態において、前部水平翼の相対迎角が 20° 未満であること。

(ii) 計算条件

胴体形状は 3.2 の実験に用いたものを同じ形状を採用する。ただし、全長を 3.7(m) とする。そのときの空中重量を 243.3 (kgf) とし、 $BG=0.015(m)$, $OG=0.105(m)$ とする。慣性モーメントは胴体内部の部品の重量分布と胴体内部の海水の重量分布から求める。具体的に、 $I_{xx}=4.7(\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$, $I_{yy}=32.8(\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$, $I_{zz}=34.4(\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$ とする。

水平翼の位置について、 $L_{c1}=1.30(m)$, $L_{w1}=1.70(m)$ とする。前部水平翼の大きさについて、 $C_{c0}=0.28(m)$, $C_{c0}=0.4(m)$ とし、後部水平翼の大きさについて、 $C_{w0}=0.28(m)$, $C_{w0}=0.4(m)$ とする。

(iii) 最適化形状と運動性能

以上の条件のもとで、最適化計算を行った。ただし、拘束条件(1)に関する減衰係数は(1)式の固有値解析から、また拘束条件(3)に関する AUV の上昇性能は(1)式を数值計算して求めた。得られた P_1 は 0.45 となった。このとき、 $B_c=0.392(m)$, $B_w=0.522(m)$, $\zeta_i=0.36$, $T_{cb}=0.533(m)$ で、拘束条件(1)(2)を満足している。Fig. 9 に最適化された AUV 形状の平面図を示す。Fig. 10 に、前進速度 1(m/sec) で、舵角を 10° にとったときの 10 秒間の軌跡を示す。Fig. 11 には、このときの前進移動距離、経路角、前部水平翼の相対迎角の時間変化を示す。これから、拘束条件(3)(4)が満足されていることがわかる。

4.2 垂直尾翼の最適化

(i) 拘束条件

下部垂直尾翼はロール運動を抑える働きがあるため、下部垂直尾翼を装着することを考える。ただし、海底面に接地することもあることを想定して、胴体中心軸からその翼端までの距離が胴体の最大径に一致するようにする。垂直

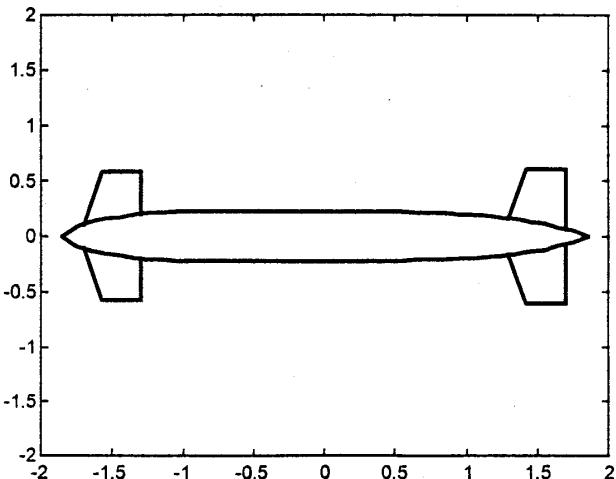


Fig. 9 Configuration of optimized horizontal wings of AUV

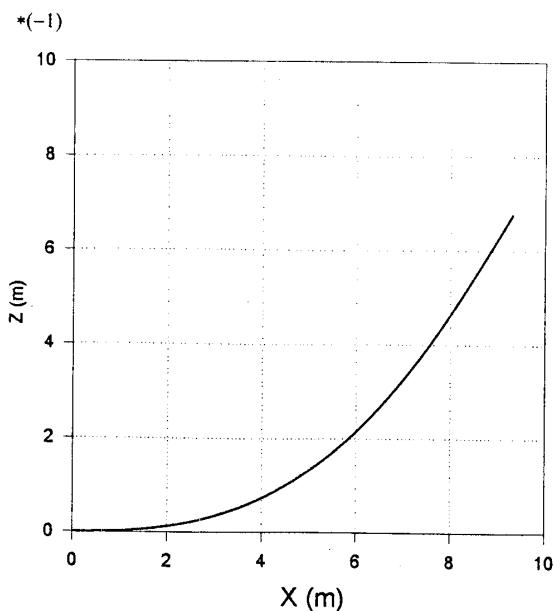


Fig. 10 Loci of AUV in step response in vertical plane

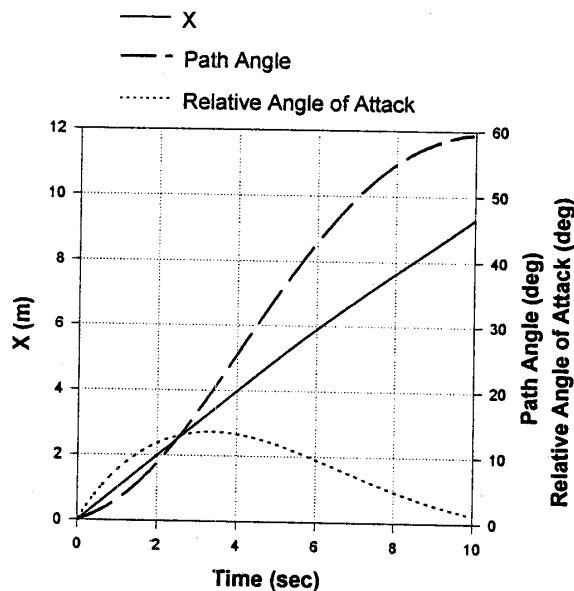


Fig. 11 Path angle of AUV and relative angle of attack on forward horizontal wing in step response in vertical plane

尾翼の位置を表す $L_f 1$ (Fig. 1 参照) を与えて、上部および下部垂直尾翼の大きさ、具体的には、Fig. 1 に示す C_{fu0} , C_{fu} , C_{fd0} , C_{fd} の翼弦長を与える、翼幅 B_{fu} , B_{fd} の最適化を行うことを考える。最適化にあたって、次の点を考慮する。

- (1) 機体の横方向の固有安定性から減衰係数が正であること。

(2) 旋回半径。

これはカーブした海底ケーブルのトラッキング性能を

表す。

(3) ケーブルトラッキング時の旋回中のロール角が 10° を越えないこと。

これはカーブした海底ケーブルのトラッキング中の磁気センサーのケーブル検出性能やカメラによる撮影性能と関係する。

(4) 旋回中の垂直尾翼の相対迎角が 20° 未満であること。

(ii) 計算条件

垂直尾翼の位置について、 $L_f 1 = 1.70\text{ (m)}$ とする。上部および下部垂直尾翼の大きさについて、 $C_{fu} = 0.28\text{ (m)}$, $C_{fu0} = 0.4\text{ (m)}$, $C_{fd} = 0.28\text{ (m)}$, $C_{fd0} = 0.4\text{ (m)}$ とする。一方、スラスターの水平軸との傾き (Ω) を 15° とする。

(iii) 最適化形状と運動性能

横方向の運動性能は垂直尾翼の大きさと(5)式の左右のスラスターの推力差に依存する。垂直尾翼の大きさが増すほど動的安定性が増し、旋回性能は低下する。したがって、動的安定性が確保できる最小の垂直尾翼の大きさをまず決定する。その後、スラスター推力と旋回性能の関係調べる。

拘束条件(1)から固有値解析を行うと、 $B_{fu} = 0.199\text{ (m)}$, $B_{fd} = 0.08\text{ (m)}$ の大きさ以上のとき安定となることがわかる。このときすべての減衰係数が 1.0 となる。安定性を重視して、 $B_{fu} = 0.254\text{ (m)}$, $B_{fd} = 0.08\text{ (m)}$ の大きさを採用する。Fig. 12 にそのときの AUV 形状の側面図を示す。Fig. 13 にスラスターの推力差をパラメータとして、推力差のステップ応答(旋回運動)時における運動特性を表すパラメータ、(1)ヨー角が 180° になったときの横方向移動距離 (Y), (2)同状態でのロール角、(3)同状態での垂直尾翼の相対迎角、の変化を示す。推力差が大きくなるほど、横方向移動距離は推力差にほぼ反比例して小さくなるが、それと共にロール角や垂直尾翼の相対迎角が推力差に

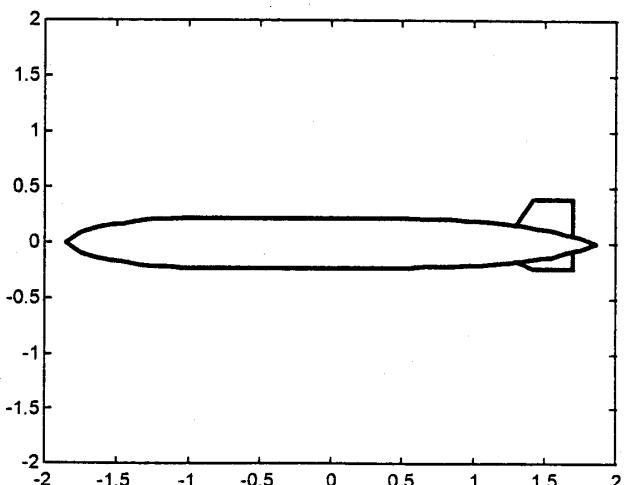


Fig. 12 Configuration of optimized vertical tails of AUV

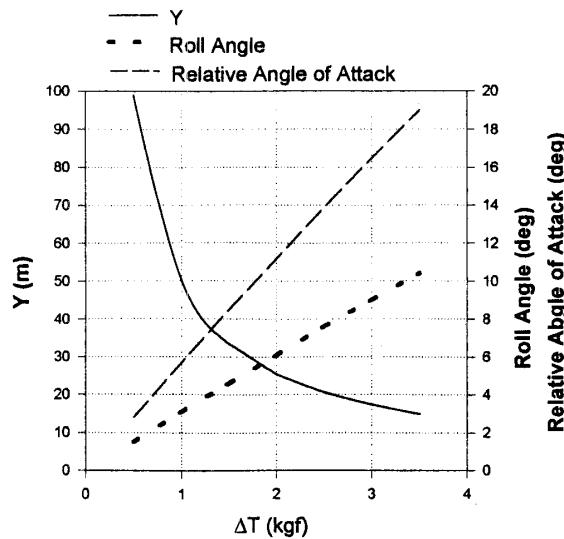


Fig. 13 Y coordinate, roll angle and relative angle of attack on vertical tails at the yaw angle of 180° in turning in horizontal plane

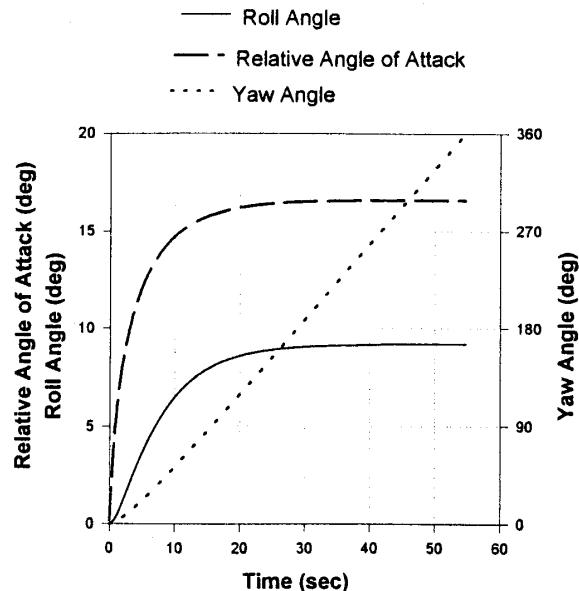


Fig. 15 Roll angle, relative angle of attack on vertical tails and yaw angle in turning of AUV in horizontal plane at $\Delta T = 3.0$ (kgf)

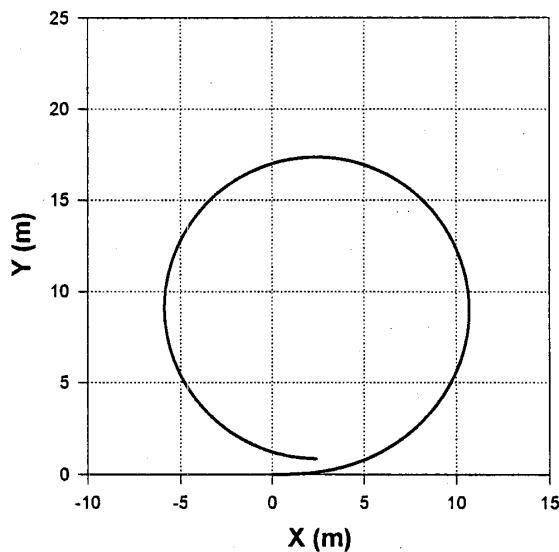


Fig. 14 Loci of AUV in turning at $\Delta T = 3.0$ (kgf)

比例して大きくなる。拘束条件(3)(4)から推力差が 3.5 (kgf) 付近が限界値となる。 $\Delta T = 3.5$ (kgf) のときの横方向移動距離は 15.1 (m) となる。Fig. 14 に、 $\Delta T = 3.0$ (kgf) のときの 55 秒間の AUV の (O -XY) 平面内の軌跡を示す。Fig. 15 に同じ条件でのロール角、垂直尾翼の相対迎角、ヨー角の時間変化を示す。ヨー角が 180° 付近でロール角や垂直尾翼の相対迎角がほぼ定常状態になることがわかる。

5. 結 論

センサー配置、低流体抵抗、前方障害物回避運動性能、ケーブルトラッキング時の旋回性能、ロール運動を考慮し

た海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の機体形状として、低流体抵抗力特性をもつ回転体形状の胴体、前部および後部水平翼、上下垂直尾翼、前部水平翼に取り付けられた昇降舵、後部水平翼の両端に取り付けられた一対のスラスターの配置を基本に考え、その設計法について模型実験や数値シミュレーションを通して考察し、次の結論を得た。

- 1) 非線形最適化手法を用いた水平翼の設計では、磁気センサーの配置、機体の固有安定性、前方障害物回避運動性能に関する拘束条件を満足しつつ、翼面積の最小化を計ることができる。
- 2) 垂直翼の設計では、最小の翼面積を機体の固有安定性から求めることができ、後部水平翼の両端に取り付けられたスラスターの推力差に応じて旋回性能、旋回中のロール運動が規定される。

参 考 文 献

- 1) Asakawa, K., Kojima, J., Ito, Y., Shirasaki, Y. and Kato, N.: Development of Autonomous Underwater Vehicle for Inspection of Underwater Cables, Proc. of UNDERWATER INTERVENTION '93 (UI '93), (1993), pp. 208-216
- 2) 加藤直三, 伊藤嘉彦, 小島淳一, 浅川賢一, 白崎勇一: 海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の運動制御 (その1 縦方向運動制御), 日本造船学会論文集, 第174号, (1993), pp. 309-317
- 3) 加藤直三, 伊藤嘉彦, 小島淳一, 浅川賢一, 白崎勇一: 海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の運動制御 (その2 ケーブルトラッキング制御), 日本造船学会論文集, 第175号, (1994), pp. 219-226
- 4) Ito, Y., Kato, N., Kojima, J., Takagi, S., Asakawa, K. and Shirasaki, Y.: Cable Tracking for Auton-

- omous Underwater Vehicle, Proc. of 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, (1994), pp. 218-224
- 5) Kato, N., Ito, Y., Kojima, J., Takagi, S., Asakawa, K. and Shirasaki, Y.: Control Performance of Autonomous Underwater Vehicle "AQUA EXPLORER 1000" for Inspection of Underwater Cables, Proc. of OCEANS '94, (1994), pp. I 135-I 140
- 6) 浦環, 大坪: 航行型無索無人潜水艇に関する研究(その1 グラディング航行の研究), 日本造船学会論文集, vol. 162, (1987), pp. 117-124
- 7) Gertler, M.: Resistance Experiments on a systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution-for Application to the Design of High-Speed Submarines: Report C-297, The David W. Taylor Model Basin, Navy Department, (1950)
- 8) Smith, S. M. and Dunn, S. E.: The Ocean Voyager II : An AUV for Coastal Oceanography, Proc. Of AUV '94, (1994), pp. 139-pp. 147
- 9) Kato, N. and Kouda, S.: Attitude Control and Navigation of Unmanned, Untethered Submersible, Proc. of 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (1989), Vol. VI, pp. 89-96
- 10) USAF Stability and Control of DATCOM, Flight Control Division, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, (1975)
- 11) Parson, M. G.: Optimization Methods for Use in Computer-Aided Ship Design, Proc. of 1st Ship Technology and Research Symposium, SNAME, (1975), pp. 13-1~13-27