

小型 AUV “MR-X1”のスラスターによる運動制御

正員 中 村 昌 彦* 正員 百 留 忠 洋**
吉 田 弘** 青 木 太 郎**

Motion Control of AUV “MR-X1” by Thrusters

by Masahiko Nakamura, *Member* Tadahiro Hyakudome, *Member*
Hiroshi Yoshida, Taro Aoki,

Summary

A small AUV “MR-X1” was developed in 2000 for detailed investigation of the seafloor and marine organisms at JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology). In order to assure high maneuverability under low-speed cruising and good hovering performance, the motion of the vehicle is controlled by five thrusters. When the vehicle was built, PID control was implemented, but in order to improve control performance, renovation of the vehicle operating system has been ongoing since 2007, and a model based control (LQI control) is due to be adopted when this is complete.

The paper summarizes the mathematical model of the vehicle and the design method of the motion and path controller, and shows successful numerical simulated results.

1. 結 言

海洋観測・調査用の自律型海中ビークル (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) は実用化の段階に入り、世界中でさまざまなAUV^{1, 2, 3, 4, 5, 6)}が建造されている。これらビークルの内、全長 4m以上のビークルは測線上を航走して海洋観測・調査を行う巡航型と位置づけられ、全長 2~3m以下のビークルはある程度の巡航も可能であるが主として限られた海域内での詳細調査用と位置づけられる。海洋研究開発機構が2000年より開発中の小型AUV「MR-X1」⁷⁾は2m級のビークルとしてある程度の測線計測 (巡航) と詳細調査ができるという位置づけで、海底面や海洋生物の綿密な調査に重点を置いた小型ビークル (世界で建造されているAUVは全長 4~6m級のものが主流になっている。これより機構では2m級の本ビークルを小型に分類している。) である。低速時においても高い運動制御能力が得られるよう、スラスターで機体の運動が制御される。また、詳細調査中は機体の安定性を高くす

る (将来ロボットハンド取り付けを予定) のが有利と考え、浮心と重心を大きく離すことができるよう、機体は縦長形状となっている。AUVの運用では、ビークルを着水点から調査完了点まで航走させる必要があり、効率のよい運動制御が求められる。建造時はPIDコントロールが採用され試験されてきたが、2007年より、複雑なビークル管制処理を短時間で実行可能な (複数個のCPUを並列使用する) システムへの変更が進行中であり、完成後はより高度な運動制御が可能となる。

新管制システム完成後の実装を目指し、本論文では「MR-X1」の数学モデルを基に現代制御理論を用いてビークル運用の色々な局面で使用されるコントローラーを設計し、運動制御シミュレーションを行った。良好な結果が得られたので報告する。

2. AUV「MR-X1」の概要

ビークルの主要目を Table 1 に、概観、機器構成を Fig.1、Fig.2 に示す。機体形状はマンボウ型で、全長 2.5m、幅 0.8m、高さ 1.2m、空中重量 7840N、最大航走速度 2knot、最大潜航深度 4200m である。機体フレームはアルミニウム合金製で、FRP 製のカバーでフェアリングされており、リチウムイオン電池により 15 時間程度の運用が可能である。フレームには

* 海洋研究開発機構海洋工学センター (九州大学)

** 海洋研究開発機構海洋工学センター

電子・電気・通信機器や慣性航法装置を格納するアルミニウム合金製耐圧容器、スラスター、リチウムイオン電池、ショットバラストタンク、浮力材等が固定されている。ビークルには高い運動性能を一（150W）がそれぞれ1機、上昇・下降用に機体中央左右上部に垂直スラスター（150W）がそれぞれ1機、計5機のスラスターが配備されている。

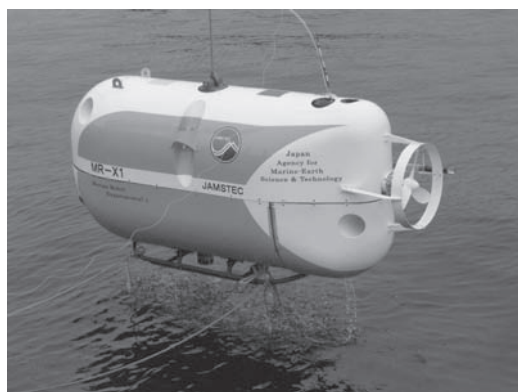


Fig. 1 Autonomous Underwater Vehicle "MR-X1"

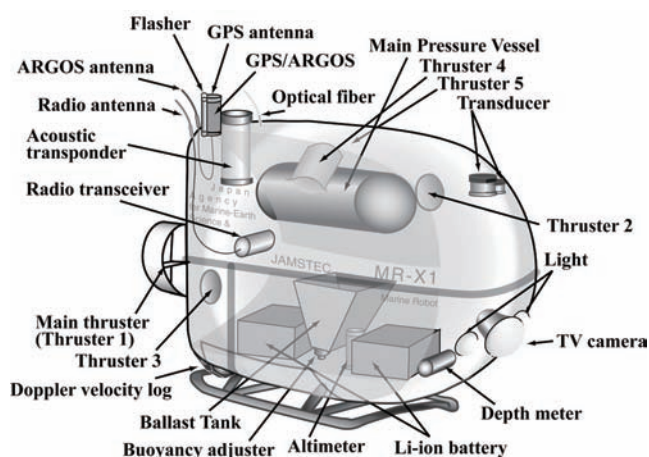


Fig. 2 Structure of "MR-X1"

Table 1 Principal dimensions of "MR-X1"

Length	2.525 m
Breadth	0.85 m
Height	1.2 m
Weight in air	7840 N
Weight in water	0 N (in the simulation)
Maximum submerged depth	4200 m
Maximum speed	2 knot
Maximum operation time	15 hours (Lithium ion battery)
Main thruster	400 W (Maximum thrust : 230 N)
Side thruster	150 W (Maximum thrust : 36 N)
Vertical thruster	150 W (Maximum thrust : 36 N)

水中重量の微調整はショットバラスト（直径数ミリの鉄球、最大搭載可能重量：500N）を用いて行い、ワンショットで約

5N のバラストが投下される。なお、光ファイバーの切断、母船との通信状態の悪化、スラスターの故障、バッテリー電圧の低下等の異常事態が発生した場合は、一度に全バラストを投下することにより、緊急浮上が可能である。

ビークル管制（自動制御）用センサーとしてはリングレーザージャイロで構成される慣性航法装置、ドップラー流速計（対地速度計）、深度計、高度計等が搭載されている。また、観測装置としてはTVカメラ、サイドスキャンソナーを装備しているが、必要に応じて他の計測機器に変更可能である。

ビークルは Fig.3 に示すように4つのオペレーションモードを備えている。

[#1 Wireless control (acoustic) mode]

ビークルが母船から離れ、超音波通信状態が安定した時に使用される。

[#2 Autonomous mode]

自律航行状態で観測・計測を行う場合に使用される。

[#3 UROV mode]

母船からビークルを投入直後、超音波通信状態が不安定な時に使用される。なお、このモードでは、データ通信速度・容量が大きいので、ミッション開始に向け、詳細な動作試験が可能である。

[#4 Wireless control (radio) mode]

ミッション終了後、浮上したビークルの操作に使用される。

ビークル投入から回収までの一連の運用中、最適なモードが選択され、使用される。オペレーションモードの切り替えは船上操作画面のモードボタン一つで切り替えが容易に行える。但し、UROV モード終了時は光ファイバーがビークル側で切断される（切断された光ファイバーは船上にて回収される。）ので、潜航中に再びこのモードを選択することはできない。

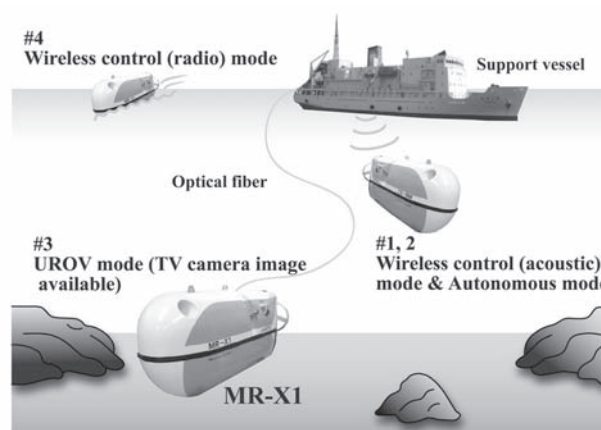


Fig. 3 Operation mode of "MR-X1"

3. ビークル運動制御の概要

ミッション終了までのビークル運用には、Fig.4 に示すようなシナリオが考えられる。

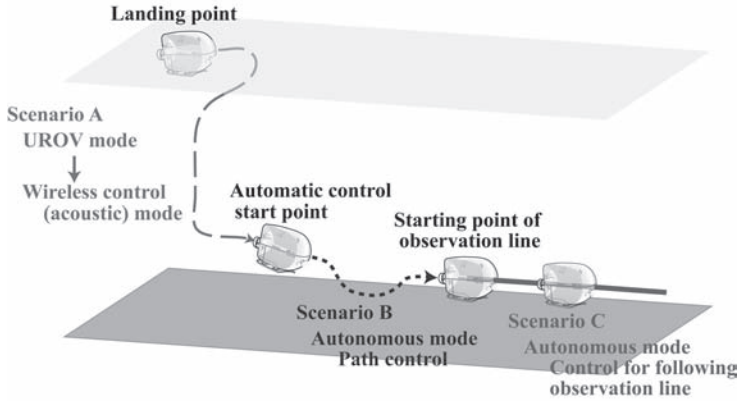


Fig. 4 Outline of motion control of AUV

[Scenario A]

着水点から測線の開始点付近までビークルが誘導される。

[Scenario B]

自律航行が開始され、自動制御によりビークルが測線の開始点まで誘導される。

[Scenario C]

自律航行（自動制御）によりビークルが測線上を航走する。

シナリオAにおいては、ビークルはまずUROVモードで操作され、さまざまな動作テストをしながら母船から離される。超音波通信が安定する距離（深度）にビークルが達した時点で光ファイバーが切断され（切断された母船からビークルまでの光ファイバーは回収される。）、Wireless control (acoustic) モードに切り替えられる。測線の開始点付近に達するまでビークルはさらに降下潜航を続ける。翼制御方式の巡航型AUVでは方向舵角、昇降舵角、メインスラスタ回転数を光ファイバーまたは超音波通信によりビークルに指令し、純手動操作でビークルを測線の開始点付近に比較的容易に誘導することができると思われるが、本ビークルの場合、多数のスラスタを手動で操作することは非常に困難である。方位指令、深度指令、速度指令を光ファイバーまたは超音波通信によりビークルに発令し、半自動（ビークルの運動そのものは指令に従って自動制御される）でビークルを目的地点近傍に誘導するのが得策と考えられる⁸⁾。第5章ではシナリオA用のコントローラーを設計し、運動シミュレーションにより性能の評価を行う。

シナリオBにおいては、ビークルが測線の開始点付近に達した時点で Autonomous モードに切り替えられる。ビークル

は測線の開始点まで最適経路を計算しながら自律航行する。第6章ではシナリオB用のコントローラーを設計し、運動シミュレーションにより性能の評価を行う。

シナリオCにおいては、ビークルは測線上を精度よく航走することが要求される。方位を制御するだけでは、潮流等の外乱がある場合、測線からずれるため、ビークル横方向の位置制御が必要となる。本ビークルはマンボウ型なので、横方向に発生する揚力を利用して（船首方向を調節して）横方向位置を制御するのが有利と考えられる。横からの潮流がある場合、斜航角により揚力を発生することで、水平スラスタを駆動し続けることなく測線上を航走することも可能となる。しかしながら、ビークルに搭載される計測機器によっては、斜航角をとることが望ましくない場合もある。第7章ではシナリオC用の2種類（斜航角を許す場合と許さない場合）のコントローラーを設計し、運動シミュレーションにより性能の比較評価を行う。

4. AUV「MR-X1」の運動方程式

ビークルの運動はFig.5 に示す2つの座標系を用いて表される。運動方程式を(1)～(9)式に、流体力係数の値をTable 2 に示す。流体力係数は力を $0.5 \rho U^2 LB$ で、モーメントを $0.5 \rho U^2 L^2 B$ で無次元化した場合の値を示した（ U ：ビークル速度、 L ：全長、 B ：全幅）。運動制御に重要と考えられる横方向流体力係数の多くは平板翼理論を使用して推定した⁹⁾。ビークル形状が縦に平たいマンボウ型なので十分な精度を持つと考えられる。新ビークル管制システム完成後、本論文で提案する運動制御法の実装試験と平行して模型実験を行い、流体力係数の精度を検証・向上し、運動制御性能を改善していく予定である。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}^T & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{matrix} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} m+A_{11} & 0 & 0 & 0 & m z_G & 0 \\ 0 & m+A_{22} & 0 & -m z_G & 0 & m x_G \\ 0 & 0 & m+A_{33} & 0 & -m x_G & 0 \\ 0 & -m z_G & 0 & I_{xx}+A_{44} & 0 & 0 \\ m z_G & 0 & -m x_G & 0 & I_{yy}+A_{55} & 0 \\ 0 & m x_G & 0 & 0 & 0 & I_{zz}+A_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_x = -(m+A_{33})q w_a + (m+A_{22})r v_a + m x_G q^2 + m x_G r^2 - m z_G p r + (m+A_{11})(q w_c - r v_c) - (m-\rho \nabla) g \sin \theta + X_{uu} |u_a| u_a + X_{vv} v_a^2 + T_1 \quad (4)$$

$$F_y = (m+A_{33})p w_a - m x_G p q - m z_G q r + (m-\rho \nabla) g \sin \theta \cos \theta - (m+A_{11})u_a r + Y_v v_a + Y_r r - (m+A_{22})(r u_c - p w_c) + T_2 + T_3 + T_4 \sin \delta_4 - T_5 \sin \delta_5 \quad (5)$$

$$F_z = -(m+A_{22})p v_a + m z_G p^2 + m z_G q^2 - m x_G p r + (m+A_{11})u_a q - (m+A_{33})(p v_c - q u_c) + (m-\rho \nabla) g \cos \theta \cos \theta + Z_{ww} |w_a| w_a + T_4 \cos \delta_4 + T_5 \cos \delta_5 \quad (6)$$

$$M_x = -m z_G p w_a - \{(I_{zz}+A_{66}) - (I_{yy}+A_{55})\} q r - (A_{33}-A_{22})v_a w_a + m z_G u_a r + m z_G (r u_c - p w_c) - (m z_G - \rho \nabla z_B) g \sin \theta \cos \theta + K_p p - l_{z2} T_2 - l_{z3} T_3 + l_{z4} T_4 - l_{z5} T_5 \quad (7)$$

$$M_y = -m z_G q w_a + m z_G r v_a + m x_G p v_a - \{(I_{xx}+A_{44}) - (I_{zz}+A_{66})\} p r - m x_G u_a q + m x_G (r v_c - q u_c) - m z_G (q w_c - r v_c) - (m x_G - \rho \nabla x_B) g \cos \theta \cos \theta - (m z_G - \rho \nabla z_B) g \sin \theta + M_{qq} |q| q - l_{x4} T_4 \cos \delta_4 - l_{x5} T_5 \cos \delta_5 + l_{x1} T_1 \quad (8)$$

$$M_z = m x_G p w_a - \{(I_{yy}+A_{55}) - (I_{xx}+A_{44})\} p q - m x_G u_a r - m x_G (r u_c - p w_c) + (m x_G - \rho \nabla x_B) g \sin \theta \cos \theta + N_v v_a + N_r r + l_{x2} T_2 + l_{x3} T_3 + l_{x4} T_4 \sin \delta_4 - l_{x5} T_5 \sin \delta_5 \quad (9)$$

ただし、

m : ビークルの質量

A_{ij} : 付加質量

u, v, w, p, q, r : x, y, z -軸方向速度、 x, y, z -軸まわり角速度

φ, θ, ψ : オイラー角

T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 : スラスター推力

$X_{uu}, X_{vv}, Y_v, Z_{ww}, N_v$: 速度に関する流体力係数

K_p, M_{qq}, N_r, Y_r : 角速度に関する流体力係数

$(X_B, 0, Y_B)$: 浮心の座標

$(X_G, 0, Y_G)$: 重心の座標

∇ : ビークル排水容積

g : 重力加速度

ρ : 海水密度

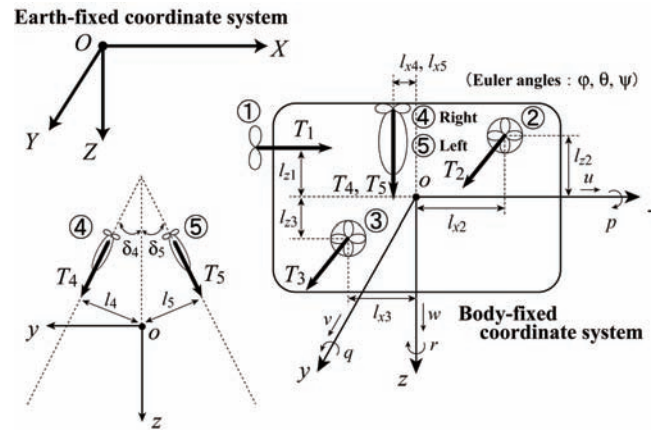


Fig. 5 Coordinate system

Table 2 Hydrodynamic coefficients

L	2.525m	l_{z3}/L	0.0594	A_{66}/I_{zz}	1.22
B	0.850m	$l_{x4}, l_{x5}/L$	-0.0317	X'_{uu}	-0.119
D	1.180m	m	2102.4kg	X'_{vv}	-0.261
x_G/L	-0.0606	I_{xx}	$(0.35D)^2 m$	Y'_v	-1.651
z_G/L	0.00713	I_{yy}	$(0.25L)^2 m$	Y'_r	-0.352
x_B/L	-0.0606	I_{zz}	$(0.25L)^2 m$	Z'_{ww}	-0.851
z_B/L	-0.0218	A_{11}/m	0.15	K'_p	-0.0300
l_{z1}/L	-0.0341	A_{22}/m	2.88	M'_{qq}	-0.0800
l_{x2}/L	0.335	A_{33}/m	1.00	N'_v	-0.352
l_{z2}/L	-0.166	A_{44}/I_{xx}	0.35	N'_r	-0.0751
l_{x3}/L	-0.475	A_{55}/I_{yy}	1.00		

u_c, v_c, w_c は物体固定座標系における潮流速度成分であり、空間固定座標系での X, Y, Z -方向の流速を V_x, V_y, V_z とすると次式で得られる。

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \mathbf{E} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

また、 u_a, v_a, w_a はビークルの潮流との相対速度成分であり次式で求められる。

$$\begin{cases} u_a = u - u_c \\ v_a = v - v_c \\ w_a = w - w_c \end{cases} \quad (11)$$

ビークルは垂直尾翼を持たないため、 N_v の値が負であり、ヨー運動が静的安定性を持たないことに注意を要する。この現象はビークルの実海域試験でも報告されている。ビークルを直進させるためには常に横方向スラスタによる制御を必要とする。

5. シナリオAで使用されるコントローラーの設計とシミュレーション結果

シナリオAでは着水点から測線の開始点付近までビークルを誘導するコントローラーが必要である。ビークルの位置を大きく操作する必要があるが、この段階では位置指令を発令するよりもビークルの深度、方位指令を発令して手動操作（半自動操作）感覚でビークルを誘導する方が望ましいと考えられる。シナリオA（特に初期段階）では色々な動作テストを行う必要があり、オペレータがビークルを思いのままに操縦しているという感覚を残しておくことが重要である。

5.1 コントローラーの設計

ビークルの深度・方位・速度制御は、(3)式を平衡点まわりに線形化してコントローラー設計に用いる、LQI制御により行う¹⁰⁾。初期の試験では安全のため最大速度より遅い1ノットで航行させる予定なので、速度1ノット ($u = 0.514$ m/sec) で定常航行している状態を平衡状態とした。(3)式を潮流速度0として平衡点まわりに線形化¹⁰⁾すると状態空間表現

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y}_M = \mathbf{C}_M\mathbf{x} \end{cases} \quad (12)$$

が得られる。 $\mathbf{x}$ はシステムの状態、 $\mathbf{u}$ は操作入力、 $\mathbf{y}_M$ は観測出力であり、次式で表される。ただし、添え字 * は平衡状態の値であることを表している。

$$\mathbf{x} = [Z \ \varphi \ \psi \ u - u^* \ v \ w - w^* \ p \ r]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{u} = [T_1 - T_1^* \ T_2 \ T_4 - T_4^*]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{y}_M = [Z \ \varphi \ \psi \ u - u^*]^T \quad (15)$$

水平スラスタ3の推力は $T_3 = -T_2$ とし、水平スラスタを駆動してもy-方向の力を発生しないようにした。また、横揺れに関してはBGを大きくすることにより安定性を確保できるので、 $T_5 = T_4$ とし、左右垂直スラスタの推力差による横揺れ制御は行っていない。

制御目的は、被制御変数を $\mathbf{y}$ 、定値目標入力を $\mathbf{y}_c$ とすると

$$\mathbf{e} = \mathbf{y}_c - \mathbf{y} \rightarrow \mathbf{0} \quad (t \rightarrow \infty) \quad (16)$$

で表される。ここで、

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_M \mathbf{C}_M \mathbf{x} \equiv \mathbf{C} \mathbf{x} = [Z \ \varphi \ \psi \ u - u^*]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{y}_c = [Z_c \ \varphi_c \ \psi_c \ u_c]^T \quad (18)$$

LQI コントロールシステム概念図を Fig.6 に示す。これ

は積分動作を含み、次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F} & -\mathbf{B}\mathbf{F}_I \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{y}_c \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{F} & -\mathbf{F}_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_I \end{bmatrix} \quad (20)$$

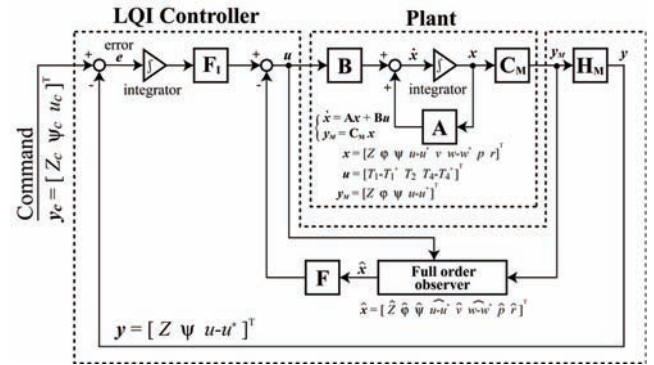


Fig. 6 Block diagram of LQI controller (Scenario A)

コントローラーの設計は次式で表される2次形式評価関数を最小にする $\mathbf{F}$, $\mathbf{F}_I$ を求めることである。

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + \dot{\mathbf{u}}^T(t) \mathbf{R} \dot{\mathbf{u}}(t)) dt \quad (21)$$

$\mathbf{Q}$ は被制御変数に対する重み行列、 $\mathbf{R}$ は操作入力に対する重み行列で、スラスタ推力が飽和しないように設定する（シミュレーションで使用した対角要素の値はそれぞれ[0.2, 0.1, 1.0]、[1.0, 1.0, 1.0]）。解は、周知のように次式で得られ、

$$[\mathbf{F} \ \mathbf{F}_I] = \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{B}^T \ \mathbf{0}] \mathbf{\Pi} \quad (22)$$

$\mathbf{\Pi}$ は次式で示すようにRiccati方程式の解である。

$$\mathbf{\Pi} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{\Pi} - \mathbf{\Pi} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{\Pi} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (23)$$

なお、観測できない状態変数は、全状態オブザーバー⁴⁾を用いて推定することにする。

5.2 シミュレーション結果

Fig.7 にシナリオAのシミュレーターを示す。コントローラーにはビークルの状態 Z, φ, ψ, u と指令値 $Z_c, \varphi_c, \psi_c, u_c$ が入力され、スラスタ推力 T_1, T_2, T_4 が出力される。

MR-X1 は水平尾翼（昇降舵）が無く、トリム角ゼロ状態で使用されるため、AUVの降下潜航時によく行われる、メインスラスタを使用して螺旋状に旋回しながら降下潜航する航法は潜航時間短縮の効果がない。潮流に流されにくくなる効果はシミュレーションで確認できたが、メインスラスタ駆動によるバッテリーの消耗を考えると、降下終了後位置

修正を行う方が良いと考えられる。そこで、螺旋状に旋回しながら降下するのではなく、方位を維持したまま前進速度ゼロで垂直降下することにし、シミュレーションを行った。MR-X1は約400Nのバルクバラストを搭載可能で、重力による降下潜航が可能であるが、更新中であるビークル管制システムの信頼性が確実なものになるまで、安全上、水中重量をほぼゼロに調整する予定である。そこでシミュレーションでは垂直スラスタを使用して降下潜航するものとした。

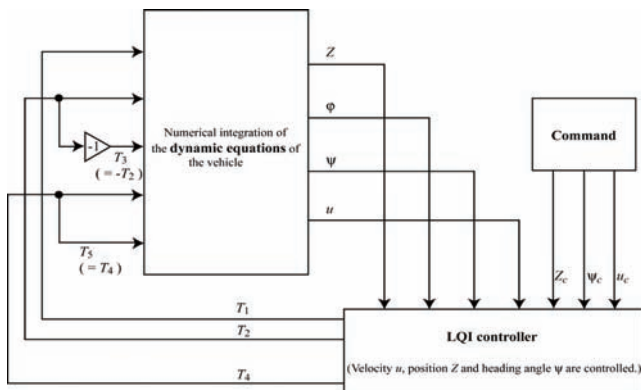


Fig. 7 Outline of simulator (Scenario A)

Fig.8、Fig.9に、着水後降下潜航しながら270度回頭(1.8度/秒)し、ビークルが母船から離れたところで停止の上、方位を維持したまま前進速度ゼロで垂直降下するシミュレーション結果を示す。前進速度1ノットを平衡状態として設計したコントローラーであるが、停止指令($u_c = -0.514$ m/sec)を発令し、ビークルを停止しても制御が破綻することはない。垂直降下時にビークルがY方向に若干移動してしまうのは、降下時ビークルがわずかにトリムするためである。シミュレーションより2000mの降下に約2.2時間かかることがわかった。垂直スラスタはほぼ最大推力を発生しているので、現状ではこれ以上の時間短縮は望めない。

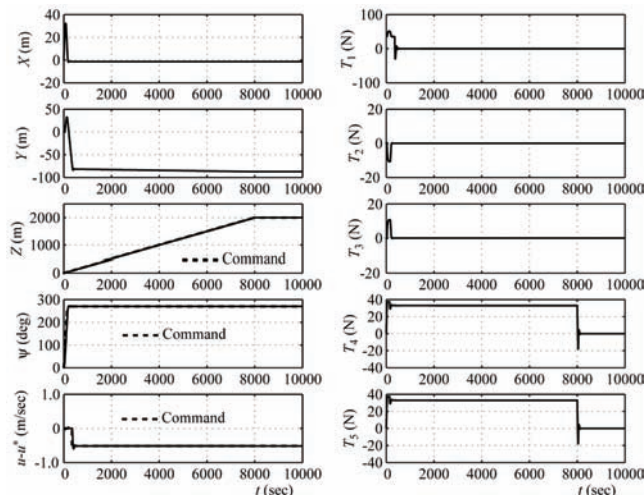


Fig. 8 Motion and thrust of "MR-X1" (Trim angle = 0 deg) (Scenario A)

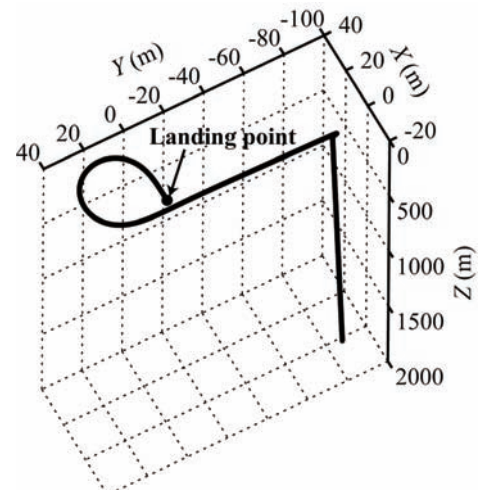


Fig. 9 Trajectory of "MR-X1" (Trim angle = 0 deg) (Scenario A)

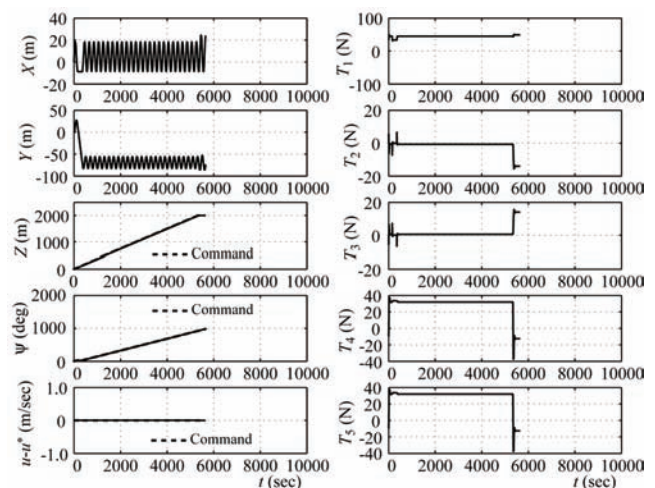


Fig. 10 Motion and thrust of "MR-X1" (Trim angle = 15 deg) (Scenario A)

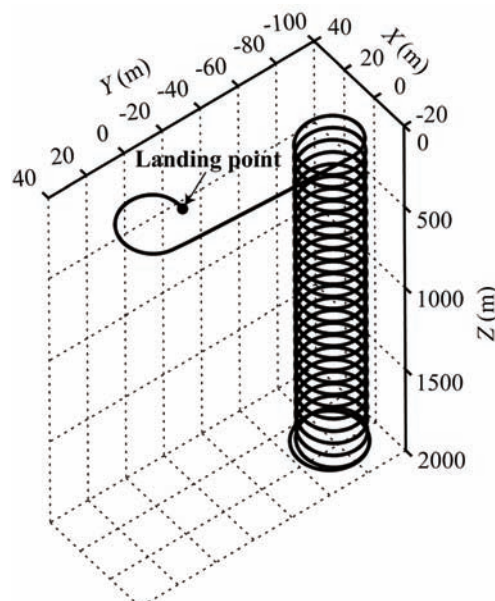


Fig. 11 Trajectory of "MR-X1" (Trim angle = 15 deg) (Scenario A)

そこで、降下時間短縮の可能性をさぐるため、重心を前方に移動し頭下げのトリム（約-15 度）をビークルに与えた場合のシミュレーションを行った。結果を Fig.10、Fig.11 に示す。頭下げトリム状態でメインスラスタを使用し、螺旋状に旋回降下させると、降下時間を 1.5 時間に大きく短縮できることがわかる。メインスラスタを駆動し、水平スラスタも若干駆動しなければならないので、前進速度ゼロで垂直降下する場合よりバッテリーの消耗が大きそうであるが、実際には降下時間が短縮される（垂直スラスタの駆動時間が短縮される）ため、全スラスタが行わなければならない仕事は 1.1 倍程度であった。ただし、航行速度を速くした場合は大きなメインスラスタ推力が必要となり、垂直スラスタ駆動時間の短縮効果が相対的に小さくなるため、低速域でのみ有効な航法であるといえる。バッテリーにさほど負担をかけることなく 32%もの降下時間短縮を図れることが確認できたので、重心移動装置の搭載を検討していきたい。

6. シナリオBで使用されるコントローラーの設計とシミュレーション結果

シナリオBでは測線開始点付近に位置するビークルを正確に測線開始点まで誘導するコントローラーが必要である。ここではオペレータがビークルを操縦するのではなく、自動制御に任せるのが得策である。オペレータは測線開始点座標を入力するだけでよい。

6.1 ビークルの経路制御

6.1.1 最適経路の生成

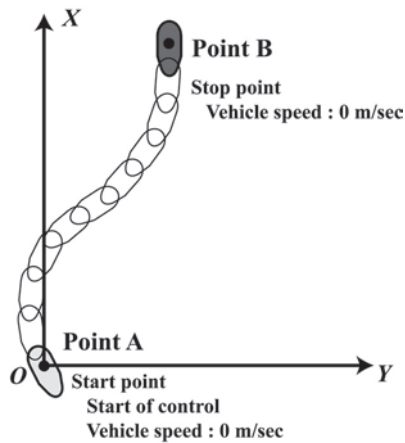


Fig. 12 Path control (step 1)

(1)式よりビークルをスタート位置A点から設定位置B点に誘導するための最適経路（速度）が導出される^{11, 12)}。A点ではビークルは停止しており、任意の方向を向いている（Fig.12）。また、B点にビークルが到達した時ビークルはX軸方向を向いており、スピードは0である。最適経路（速度）が生成された後、ビークルは生成された経路（速度）を

追従するように制御される。

ビークルの横揺れ、縦揺れ、y-軸方向速度 v は小さいとすると (1) 式は次式のように簡略化される。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \psi \\ u \sin \psi \\ w \\ r \end{bmatrix} \quad (24)$$

u, v, r を入力として X, Y, Z, ψ を制御したいが、このままでは困難なので、X-軸が増加している間に Y-軸方向ならびに Z-軸方向の偏差を無くし、X-軸に追従させるコントローラーを時間軸状態制御系を用いて設計する。まず、X-軸を時間軸としてシステム(24)を時間軸変換する。

$$\frac{dX}{dt} = u \cos \psi \quad (25)$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = u \sin \psi \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \tan \psi \quad (26)$$

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{dZ}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = w \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \frac{w}{u \cos \psi} \quad (27)$$

$$\frac{d\psi}{dX} = \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = r \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \frac{r}{u \cos \psi} \quad (28)$$

$\xi_1 = X, \quad \xi_2 = \tan \psi, \quad \xi_3 = Y, \quad \xi_4 = Z$ とおくと、

$$\frac{d\xi_1}{dt} = u \cos \psi \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_2}{dX} &= \frac{d\xi_2}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = \frac{d\xi_2}{d\psi} \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} \\ &= \frac{1}{\cos^2 \psi} \cdot r \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \frac{r}{u \cos^3 \psi} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\frac{d\xi_3}{dX} = \frac{d\xi_3}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = u \sin \psi \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \tan \psi = \xi_2 \quad (31)$$

$$\frac{d\xi_4}{dX} = \frac{d\xi_4}{dt} \cdot \frac{dt}{dX} = w \cdot \frac{1}{u \cos \psi} = \frac{w}{u \cos \psi} \quad (32)$$

さらに $u \cos \psi, \frac{r}{u \cos^3 \psi}, \frac{w}{u \cos \psi}$ を μ_1, μ_2, μ_3 とおくと、

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ に対する目標値を $\xi_{1c}, \xi_{2c}, \xi_{3c}, \xi_{4c}$ とし、システム (33) に対する安定化フィードバックを適当な定数 k_1, k_2, k_3, k_4 を用いて

$$\begin{cases} \mu_1 = k_1 (-\xi_1 + \xi_{1c}) \\ \mu_2 = k_2 (-\xi_2 + \xi_{2c}) + k_3 (-\xi_3 + \xi_{3c}) \\ \mu_3 = k_4 (-\xi_4 + \xi_{4c}) \end{cases} \quad (34)$$

とする。定数 k_1, k_2, k_3, k_4 は極配置法により簡単に求めることができる。すなわち、

$$\begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & -k_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 \end{bmatrix} \quad (35)$$

の極が左半平面に来るように k_1, k_2, k_3, k_4 の値を決めればよい。シミュレーションでは、振動的なふるまいを避けるため極が実軸上に来るように、かつ、ハイゲインになりピークルが応答できなくなるのを避けるため極が半径1の円内に来るようにゲイン(0.003, 0.50, 0.01, 0.02)を決めた。

変換を元に戻すと、

$$u_c = \frac{\mu_1}{\cos \psi} = k_1 \frac{(-\xi_1 + \xi_{1c})}{\cos \psi} = \frac{k_1(-X + X_c)}{\cos \psi} \quad (36)$$

$$w_c = \mu_3 u \cos \psi = k_4(-\xi_4 + \xi_{4c}) u \cos \psi \\ = k_4(-Z + Z_c) u \cos \psi \quad (37)$$

$$r_c = \mu_2 u \cos^3 \psi \\ = \{k_2(-\xi_2 + \xi_{2c}) + k_3(-\xi_3 + \xi_{3c})\} u \cos^3 \psi \\ = \{-k_2 \tan \psi + k_3(-Y + Y_c)\} u \cos^3 \psi \quad (38)$$

ピークルの速度を(36)~(38)式のように制御することができれば、ピークルをA点からB点(X_c, Y_c, Z_c)に誘導することができる(Step 1)。

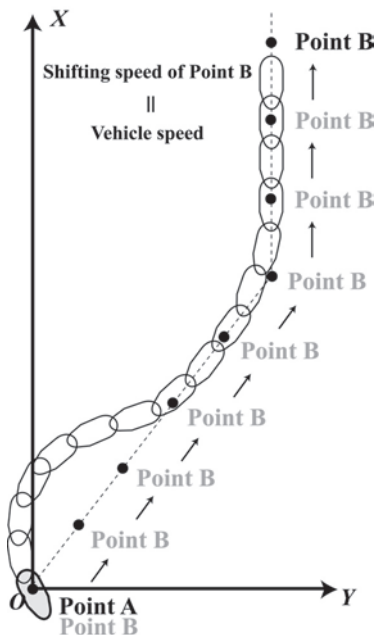


Fig. 13 Path control (step 2)

しかしながら、効率的な運用を考えると、ピークルがB点に達した時、ピークルは設定スピードで航走し続けることが望ましい。Fig.13に示すように、B点をA点から徐々に移動してやれば、ピークルは測線の開始点に達した後も設定スピードで測線上を航走することが可能となる(Step 2)。6.2節

に示すシミュレーションではB点をX-方向にはピークルの設定スピードで、Y-, Z-方向にはそれぞれ測線開始点まで0.2m/sec, 0.12m/secで移動させている。ただし、X-方向移動は200秒後に設定スピードに到達するように徐々に移動し、Y-, Z-方向移動はシミュレーションを繰り返し最適なスピードを見出した。また、Step 1のままでゲイン k_1, k_2, k_3, k_4 の値がB点とA点の距離に大きく依存してしまう(距離が大きくなると(36)~(38)式で計算されるピークル速度初期値が大きくなりピークルの移動可能速度を超えてしまうため、ゲインを小さくする必要がある)。次節で示す速度コントローラの重み行列の決定も同様である。言い換えると、距離が小さいとして設計したコントローラは距離が大きくなると性能が大きく劣化してしまい、最悪の場合、経路制御不能に陥る。この問題を回避する上でもStep 2は有効である。

6.1.2 ピークルの速度制御

ピークルの速度制御は、潮流(外乱)が無い状態の(3)式を平衡点(ピークル停止状態)まわりに線形化して設計に用いる、LQI制御により行う¹⁰⁾。ピークル停止状態を平衡状態としたので、 u^*, w^*, T_1^* などの値はすべて0である。制御開始時(Fig.13 A点)はピークルが停止しており、設定巡航速度も1ノットと低いため、(ピークル移動開始時を念頭において)停止状態を平衡点として速度コントローラを設計した。巡航速度が速い場合は停止状態を平衡点に選ばない方がよい性能が得られるかもしれないので検討を続けて行きたい。

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B u \\ y_M = C_M x \end{cases} \quad (39)$$

$$x = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (40)$$

$$u = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T \quad (41)$$

$$y_M = [u \ v \ w \ r]^T \quad (42)$$

$$y_c = [u_c \ v_c \ w_c \ r_c]^T \quad (43)$$

なお、横揺れに関してはBGを大きくすることにより安定性を確保できるので、 $T_5 = T_4$ とする。LQIコントロールシステムの概念図をFig.14に示す。ゲイン F, F_1 の決定は5.1節と同様であるので省略する。シミュレーションで使用した重み行列 Q, R の対角要素の値はそれぞれ[0.2, 0.1, 1.0]、[1.0, 1.0, 1.0]である。将来の実海域試験ではPID制御による速度制御も実装し、経路制御性能の比較を行いたい。

6.2 シミュレーション結果

Fig.15に経路制御シミュレーターを示す。ピークルの非線形運動方程式を数値積分して得られるピークル現在位置と移動するB点位置から、現在位置からB点に向かう最適経路

(ビークル速度) が計算される。得られた速度は指令速度としてビークル速度制御 LQI コントローラーに入力される。コントローラーは各スラスタの推力を出力してくるので、これらがビークルの運動方程式に入力される。以上の演算ループが、B 点が測線開始点に達した後ビークルが測線上を航走しだすまで繰り返される。実機でのサンプリング周期が確定していないため、シミュレーションは連続系で行っているが、実装はビークルに搭載される CPU システムや周辺機器の制約からコントローラーをサンプリング時間で離散化して行う予定である。ビークルの運動が急峻でないため、2 Hz 程度のサンプリング周期でも離散化したコントローラーが性能よく運動を制御し得ることをシミュレーションで確認済みである。

Fig.16 に経路制御中のビークルの運動・スラスタ推力時系列を、Fig.17 にビークル運動軌道示す。経路自動制御が開始された時、ビークルは測線の始点から Y-方向、Z-方向に 100m 離れた位置にあり、船首方向も測線方向から 40 度ずれている。図中破線はビークルの目標速度である。ビークルは目標速度に精度良く追従し、測線の始点に滑らかに移動した後、測線上を設定スピード 1 ノットで航走し続けていることがわかる。

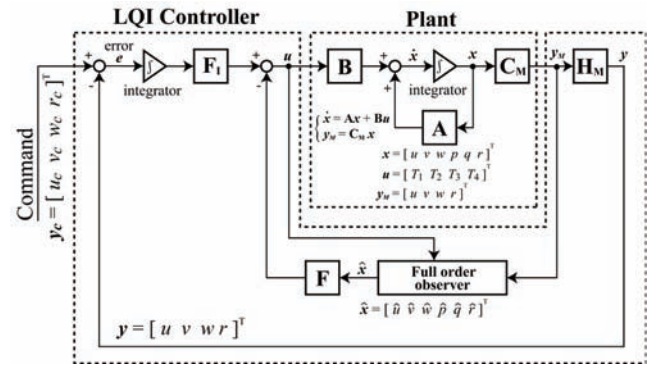


Fig. 14 Block diagram of LQI controller (Scenario B)

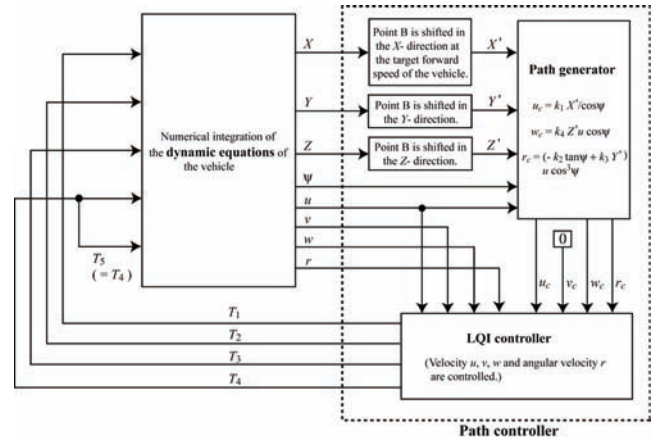


Fig. 15 Outline of simulator (Scenario B)

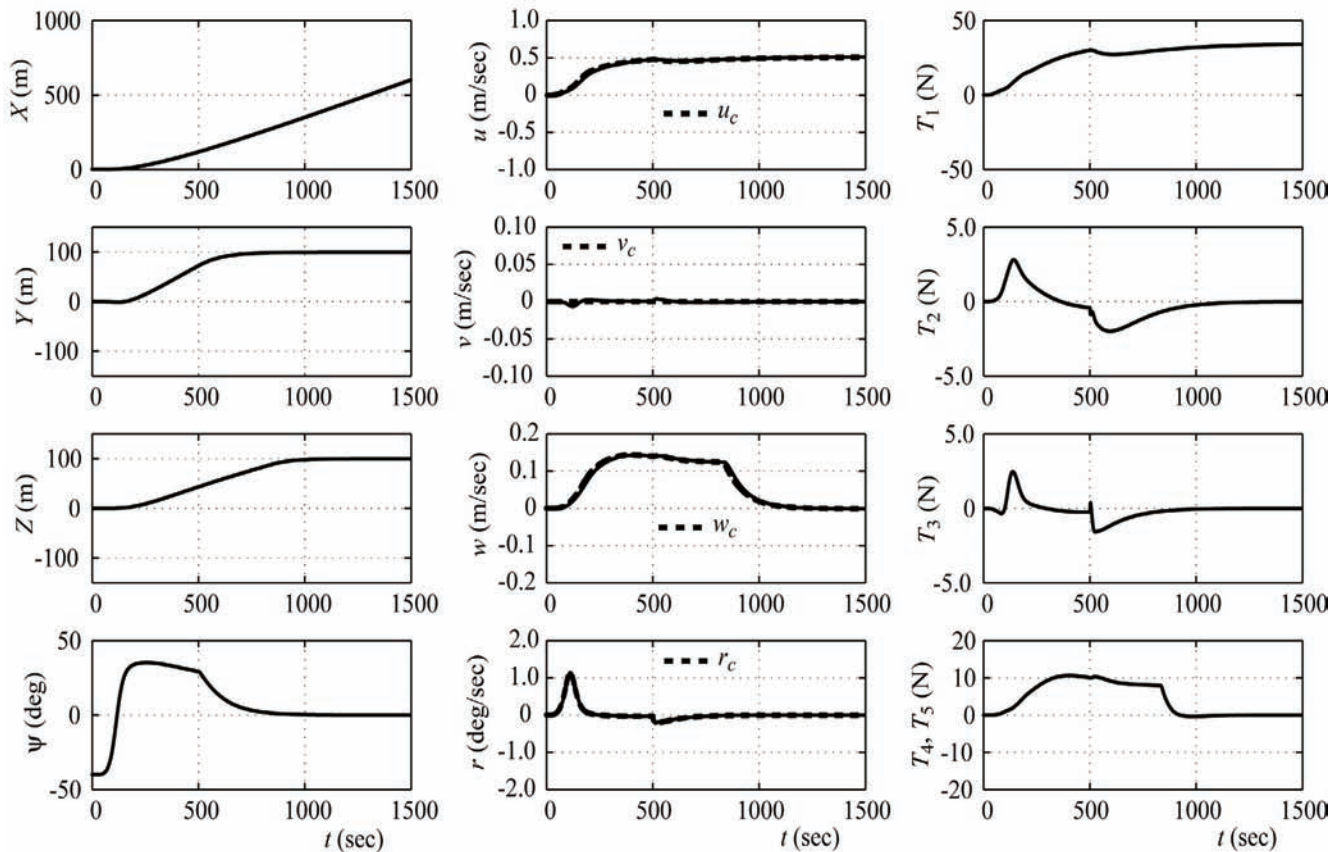


Fig. 16 Motion and thrust of “MR-X1” (Scenario B)

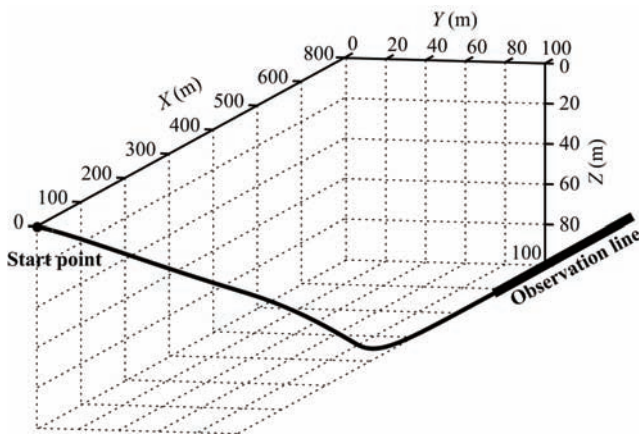


Fig. 17 Trajectory of "MR-X1" (Scenario B)

本ビークルにとって測線上を精度良く自動航走できることが重要と考え、潮流等の外乱の影響については次章(経路制御用コントローラーから測線追従用コントローラーへの切り替えシミュレーション)で検討することとした。

7. シナリオCで使用されるコントローラーの設計とシミュレーション結果

シナリオCではビークルを精度よく測線上を航走させるコントローラーが必要である。方位制御のみでは、潮流等の外乱によりビークルが流される可能性が大きいため、測線に直角方向の位置偏差を制御する機能が要求される。経路制御もこの制御仕様を満たすことができるが、B点(Fig.13)を移動し続ける必要があり、測線が直線の場合、より単純な制御方法が望ましい。また、経路制御では方位角をゼロにしようと制御されるが、測線に対して角度をもつことが許されるなら、揚力を利用して(サイドスラスタをほとんど駆動することなく)横方向流れに対抗することができ、有利となる。

7.1 コントローラーの設計(斜航を許す場合)

ビークルの測線追従制御は、潮流(外乱)が無い状態の(3)式を平衡点(速度1ノット($u = 0.514 \text{ m/sec}$))で定常航行している状態を平衡状態とする。)まわりに線形化して設計に用いる、LQI制御により行う。本ビークルはマンボウ型なので、ヨー角を調節して横方向に発生する揚力を利用してY方向位置を制御することにする。横からの潮流がある場合、斜航角により揚力を発生することで、水平スラスタを駆動し続けることなく測線上を航走することも可能となる。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y_M = C_M x \end{cases} \quad (44)$$

$$x = [Y \ Z \ \varphi \ \theta - \theta^* \ \psi \ u - u^* \ v \ w - w^* \ p \ q \ r]^T \quad (45)$$

$$u = [T_1 - T_1^* \ T_2 \ T_4 - T_4^*]^T \quad (46)$$

$$y_M = [Y \ Z \ \varphi \ \theta - \theta^* \ \psi \ u - u^*]^T \quad (47)$$

$$y_c = [Y_c \ Z_c \ u_c]^T \quad (48)$$

添え字 * は平衡状態の値であることを表している。LQIコントロールシステム概念図をFig.18に、シミュレーターをFig.19に示す。水平スラスタ3の推力は $T_3 = -T_2$ とし、横揺れに関してはBGを大きくすることにより安定性を確保できるので、 $T_5 = T_4$ とした。ゲイン F 、 F_1 の決定は5.1節と同様であるので省略する。なお、シミュレーションで使用した重み行列 Q 、 R の対角要素の値はそれぞれ $[0.025, 0.05, 0.25]$ 、 $[10.0, 10.0, 16.0]$ である。

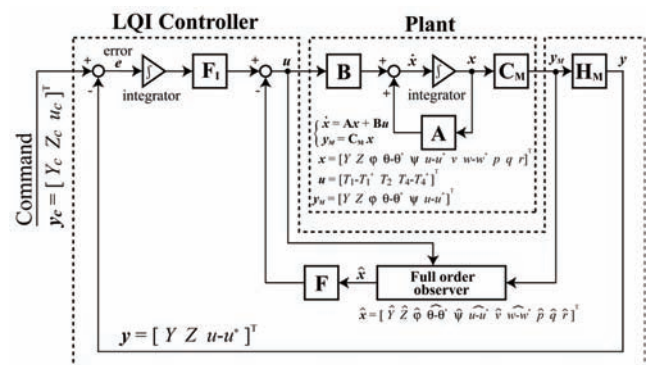


Fig. 18 Block diagram of LQI controller (a) (Scenario C)

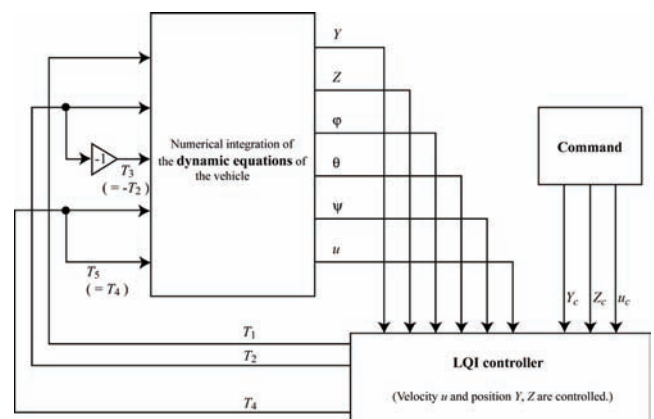


Fig. 19 Outline of simulator (a) (Scenario C)

7.2 シミュレーション結果(斜航を許す場合)

シミュレーション結果をFig.20に示す。 $t = 1500$ 秒で経路制御コントローラーから測線追従コントローラーに切り替えられている。また、 $t = 2000$ 秒で測線を10mシフトし、ビークル深度を10m増大させている。コントローラー切り替えは滑らかに行われ、ビークルは測線シフトにもヨー角を調節してオーバーシュート無く安定して追従している。深度変更も問題ない。

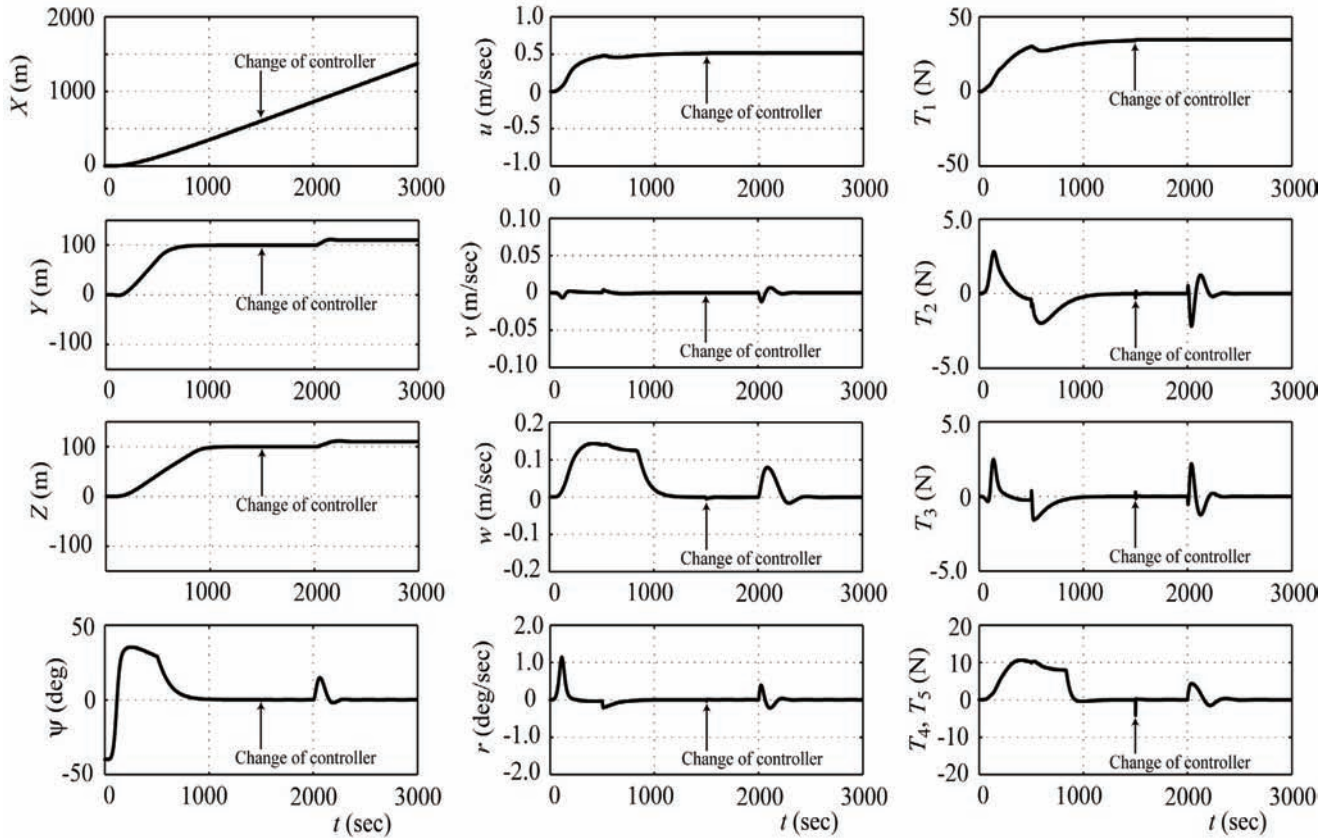


Fig. 20 Motion and thrust of “MR-X1”

(Scenario B >>> Scenario C : Controller is changed at $t = 1500$ sec)

深海域では流れがほとんど無いと思われるので問題ないが、浅海域で試験する場合、ビークル形状より、横からの流れに対する制御性能をシミュレーションにより検証しておく必要がある。Fig.21 ~ Fig.24 にY-方向に 0.05 ノット、0.1 ノット、0.2 ノット 0.3 ノットの潮流がある場合の計算結果を示す。Fig.20 と同様、 $t = 1500$ 秒で経路制御コントローラから測線追従コントローラに切り替え、 $t = 2000$ 秒で測線を 10m シフトし、ビークル深度を 10m 増大させている。潮流速度の増大にともない測線追従コントローラは斜航角を大きくとり、揚力により流れに対抗し、測線からずれないようにしていることがわかる。揚力をうまく利用しているため、横方向の流れがあっても、水平スラスタは推力を発生していない。バッテリーに優しいコントロール方式であると言える。ただし、潮流が 0.3 ノットに達すると、測線からのずれは大きくないもののヨー運動が振動的になっている。平衡状態からのずれが大きくなる (ψ^* の値が 0 度からかなりはずれる) ため、線形コントローラではカバーできない領域に入ったものと考えられる。ヨー角が大きく変動する場合のゲインスケジューリングが可能ならばさらに大きな流れに対抗できると思われるので検討を続けて行きたい。また、コントローラ切り替え前の経路制御部分に注目すると、潮流速度の増大にともない、ヨーモーメントに打ち勝ち船首方

位 0 度を保つために、前方水平スラスタ推力が増大し、飽和に達してしまっている。方位の誤差を許容するなら、速度制御コントローラ設計時のヨー角速度に対する重みを小さくすることで前方水平スラスタ推力の増大を緩和することができる。Fig.25 にシミュレーション結果を示す。Fig.23 と比べると方位の誤差はやはり若干増大しているが、前方水平スラスタ推力は激減していることがわかる。

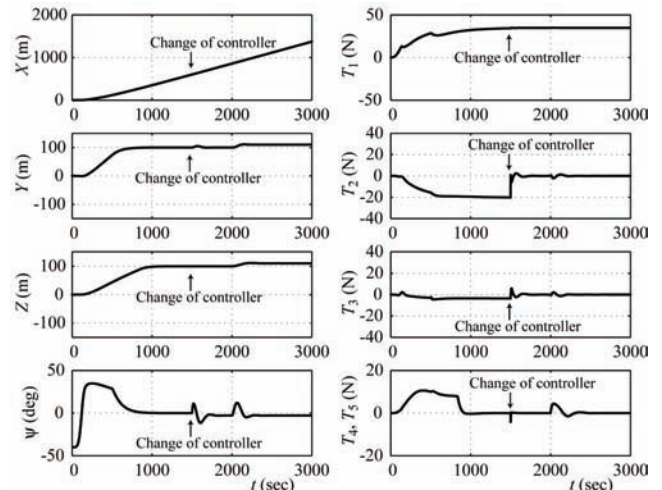


Fig. 21 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.05 knot in Y-direction)

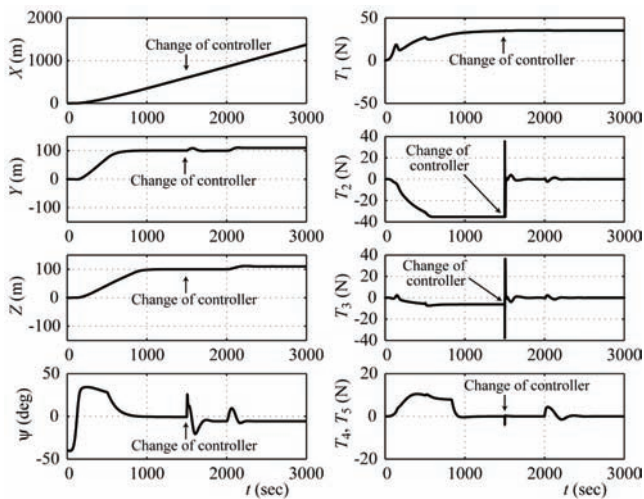


Fig. 22 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.10 knot in Y-direction)

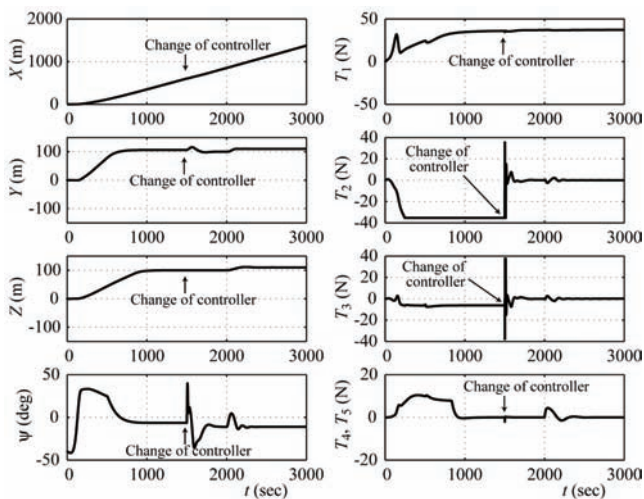


Fig. 23 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.20 knot in Y-direction)

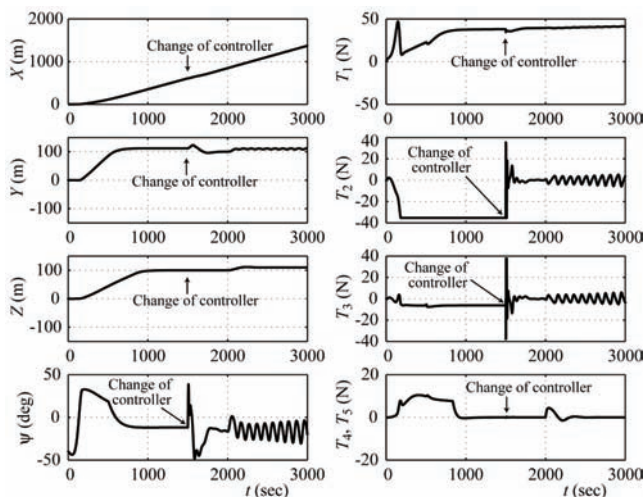


Fig. 24 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.30 knot in Y-direction)

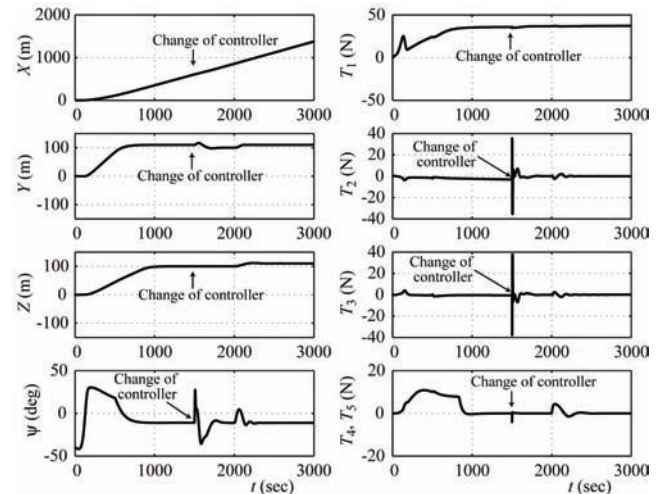


Fig. 25 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.20 knot in Y-direction) The value of weight Q to
velocity v is reduced in Scenario B.

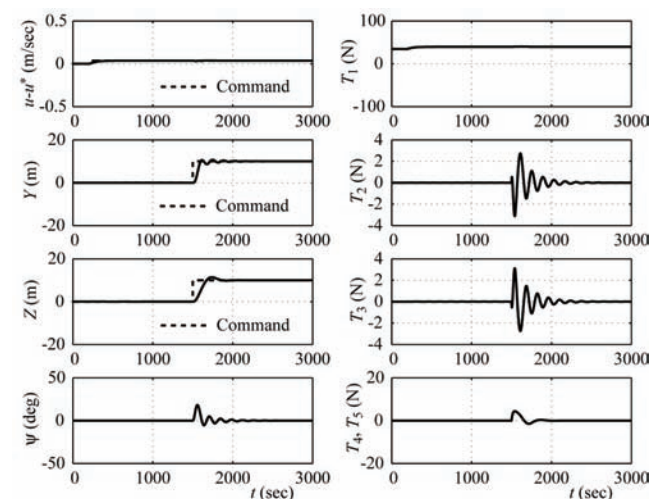


Fig. 26 Motion and thrust of "MR-X1"
(u : 1.0 knot $\gg$ 1.07 knot) (Scenario C)

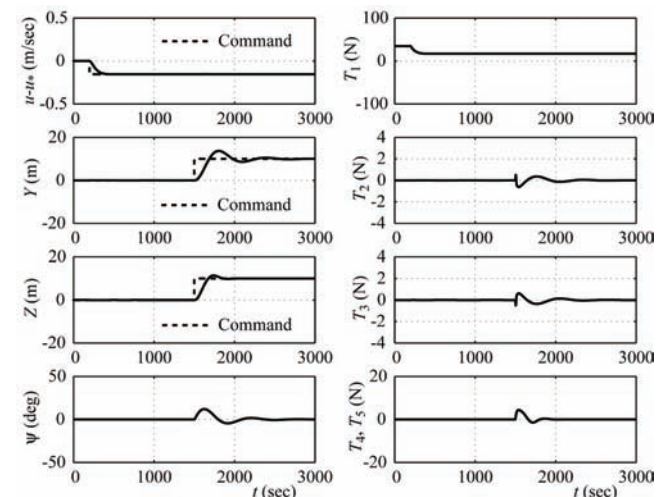


Fig. 27 Motion and thrust of "MR-X1"
(u : 1.0 knot $\gg$ 0.7 knot) (Scenario C)

Fig.26、Fig.27 は測線追従中のビークル速度を7%増速、30%減速した場合のシミュレーション結果である。いずれの場合も速度変更自体は安定して行われているが、測線をシフトするとオーバーシュートが大きくなり、応答に振動の傾向が現われる。測線追従中に設定速度から減速することはあっても大きく増速することは無いと思われるので、十分なロバスト性を有していると考えるが、ヨー角だけでなく速度に対するゲインスケジューリングも検討し、コントロール性能の更なる向上を目指して行きたい。

7.3 コントローラーの設計（斜航を許さない場合）

ビークルに搭載される計測機器によっては、斜航角をとることが望ましくない場合もある。そこで、本節では潮流中で測線がシフトされても、船首方位が常に測線方向に一致するように運動を制御するコントローラーを設計する。平衡状態は7.1節と同様1ノットで定常航走状態とし、前後2機の水平スラスタの推力差でヨー運動を、推力和でスウェイ運動を制御することにする。ただし、 ψ_c の値は常に0である。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y_M = C_M x \end{cases} \quad (49)$$

$$x = [Y \ Z \ \varphi \ \theta - \theta^* \ \psi \ u - u^* \ v \ w - w^* \ p \ q \ r]^T \quad (50)$$

$$u = [T_1 - T_1^* \ T_2 \ T_3 \ T_4 - T_4^*]^T \quad (51)$$

$$y_M = [Y \ Z \ \varphi \ \theta - \theta^* \ \psi \ u - u^*]^T \quad (52)$$

$$y_c = [Y_c \ Z_c \ \psi_c \ u_c]^T \quad (53)$$

LQIコントロールシステム概念図をFig.28 に、シミュレーターをFig.29 に示す。横揺れに関してはBGを大きくすることにより安定性を確保できるので、 $T_5 = T_4$ とした。ゲイン F 、 F_1 の決定は5.1節と同様であるので省略する。なお、シミュレーションで使った重み行列 Q 、 R の対角要素の値はそれぞれ $[0.005, 0.01, 1.0, 1.0]$ 、 $[1.0, 1.0, 1.0, 4.0]$ である。

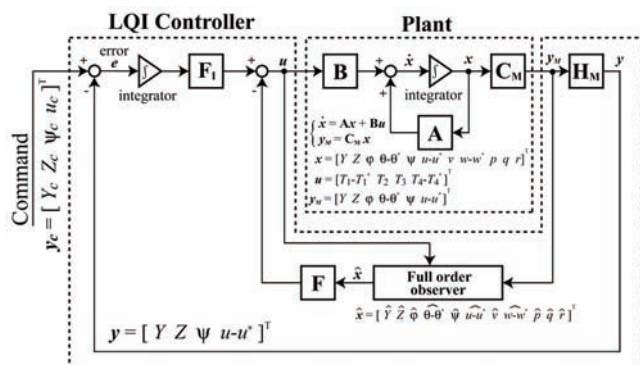


Fig. 28 Block diagram of LQI controller (b) (Scenario C)

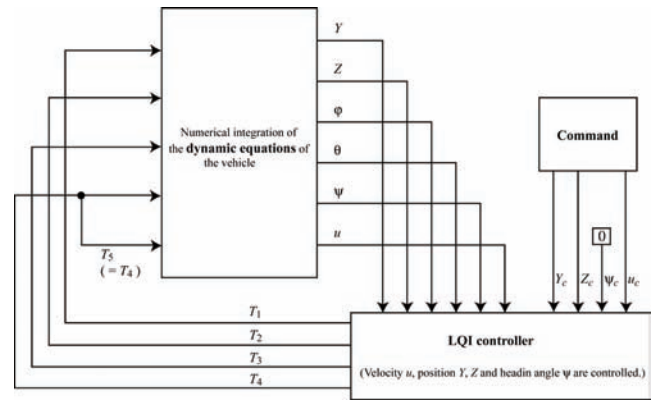


Fig. 29 Outline of simulator (b) (Scenario C)

7.4 シミュレーション結果（斜航を許さない場合）

測線追従中潜航深度を 10m 増大するとともに測線をシフトした場合のシミュレーション結果を Fig.30 に示す。Fig.20 と比較すると、整定時間は長くなるものの、測線をシフトしても船首方位は変化しないことがわかる。海底地形の計測を行う場合は不可欠の運動制御方法といえるかもしれないが、経路制御の場合と同様、ビークルの形状から横方向の流れが存在する場合、制御性能の劣化が懸念される。

Y-方向の流れが存在する場合の計算結果を Fig.31 に示す。わずか 0.07 ノットの流れに対しても前方水平スラスタ推力が最大値に達してしまっている。流れ方向への測線シフトはこなすことができるが、もはや流れに逆らった測線シフトは推力が飽和するため不可能である。水平スラスタの推力増大が望まれる。

最後に、Fig.32、Fig.33 に測線追従中のビークル速度を 30% 増速、70%減速した場合のシミュレーション結果を示す。いずれの場合も安定した測線シフト、潜航深度の変更が行われている。斜航を許す場合より速度変更に対するロバスト性ははるかに高いといえる。

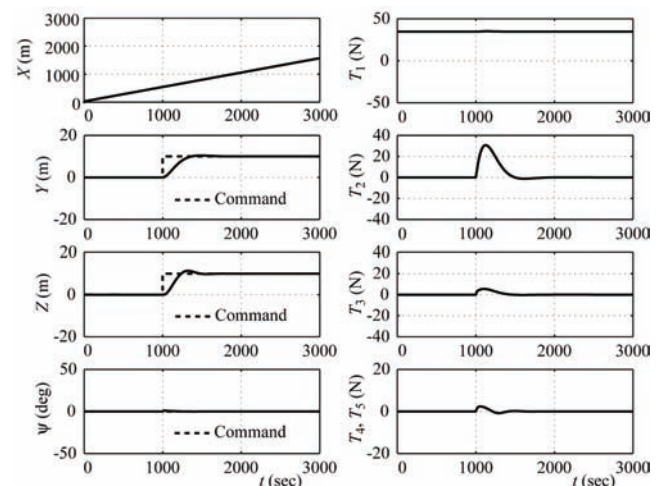


Fig. 30 Motion and thrust of “MR-X1” (Scenario C)

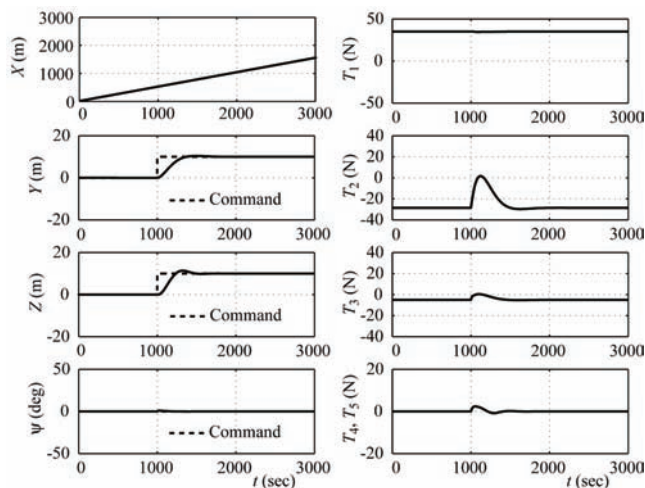


Fig. 31 Motion and thrust of "MR-X1" in current
(0.07 knot in Y-direction) (Scenario C)

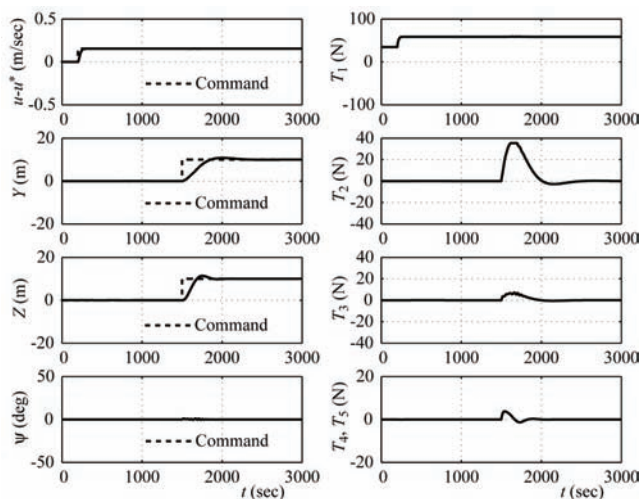


Fig. 32 Motion and thrust of "MR-X1"
($u : 1.0 \text{ knot} \gg 1.3 \text{ knot}$) (Scenario C)

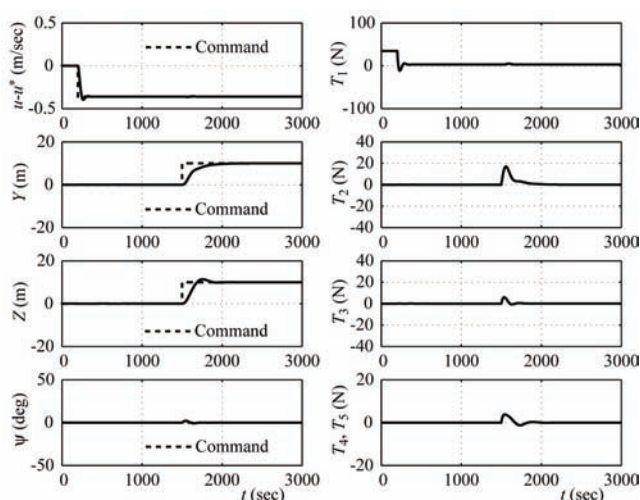


Fig. 33 Motion and thrust of "MR-X1"
($u : 1.0 \text{ knot} \gg 0.3 \text{ knot}$) (Scenario C)

8. 結 言

開発中の小型 AUV「MRX-1」への実装を目指し、数学モデルを基に現代制御理論を用いてビークル運用の色々な局面で使用されるコントローラーを設計し、運動制御シミュレーションを行った結果、次の結論を得た。

- (1) 必要に応じて方位・深度・速度指令を与え、半自動的に着水したビークルを測線開始点に誘導するコントローラーを設計し、性能が良好であることを確認した。
- (2) 現状の垂直スラスタ能力では 2000m の降下潜航に 2.2 時間必要であるが、ビークルにトリム角を与え、メインスラスタを使用し、螺旋状に旋回降下することができれば降下時間を 30% 程度短くすることができ、バッテリーの消耗もほとんど増大することはない。
- (3) 測線開始点付近にあるビークルを測線開始点に誘導し、測線上を設定スピードで航走させる経路制御コントローラーを設計し、性能が良好であることを確認した。
- (4) 設計した経路制御コントローラーは 0.3 ノット程度の横方向流れに対抗可能である。
- (5) ヨー角を調節することによりビークルを測線に沿って精度良く航走させる測線追従コントローラーを設計し、測線シフトに対して追従性能が良好であることを確認した。
- (6) 設計した測線追従コントローラーは 0.2 ノット程度の横方向流れに対抗可能で、揚力を利用するため水平スラスタ推力も非常に小さくてすむ。また、速度変更に対するロバスト性能も悪くない。
- (7) 搭載センサーによっては船首方位変動が望ましくないので、船首方位を測線に常に一致させ、ビークルを精度良く航走させる測線追従コントローラーを設計し、測線シフトに対して追従性能が良好であり、船首方位も変化しないことを確認した。
- (8) 設計した船首方位を維持可能な測線追従コントローラーは、ヨー角を調節することにより測線追従を行うコントローラーより、横方向流れに対して脆弱であるが、速度変更に対するロバスト性は非常に優れている。
- (9) マンボウ型のビークル形状より、水平スラスタ能力を向上することが望まれる。

今後は速度変化、斜航角変化に対するゲインスケジューリングを検討し、実海域試験を通じて制御性能の向上を図って行きたい。

参 考 文 献

- 1) P. G. Collar et al. : Autosub : an Autonomous Unmanned Submersible for Ocean Data Collection, Electronics & Communication Engineering Journal, Vol.7 issue 3, 1995, pp.105-114.
 - 2) J. Kristensen et al. : Hugin-an Untethered Underwater Vehicle for Seabed Surveying, OCEANS ' 98, Conf. Proc. Vol.1, 1998, pp.118-123.
 - 3) J. S. Ferguson et al. : The Theseus Autonomous Underwater Vehicle. Two Successful Missions, Underwater Technology' 98 Proc. 1998 Symposium, 1998, pp.109-114.
 - 4) D. R. Yoerger et al. : Fine-scale Seafloor Survey in Rugged Deep-ocean Terrain with an Autonomous Robot, Robotics and Automation, 2000. Proc. ICRA '00. IEEE International Conference, Vol.2, 2000, pp.1787-1792.
 - 5) T. Ura et al. : Introduction to an AUV “r2D4” and its Kuroshima Knoll Survey Mission, OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN ' 04, Vol.2, 2004, pp.840-845.
 - 6) R. P. Stokey et al. : Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle, OCEANS 2005 Proc. of MTS/IEEE, Vol.2, 2005, pp.1301-1304.
 - 7) H. Yoshida, T. Aoki, T. Murashima, S. Tsukioka, H. Nakajoh, T. Hyakudome, S. Ishibashi and R. Sasamoto : A Deep Sea AUV “MR-X1” for Scientific Work, Proceedings of OCEANS 2003, Vol.2, 2003, pp.1174-1179.
 - 8) 百留忠洋, 中村昌彦, 吉田弘, 田原淳一郎, 澤隆雄, 石橋正二郎, 青木太郎 : 小型 AUV 「MR-X1」 の運動制御, 第 20 回海洋工学シンポジウム, 2008.
 - 9) M. Ohkusu, M. Kashiwagi and W. Koterayama : Hydrodynamics of a Depth Controlled Towed Vehicle, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.162, 1987, pp.99-109.
 - 10) H. Kajiwar, W. Koterayama, M. Nakamura, H. Terada and T. Morita : Control System Design of an ROV Operated Both as Towed and Self-propulsive Vehicle, Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, 1993, pp.451-454.
 - 11) M. Sampei, T. Tamura, T. Kobayashi and N. Shibui : Arbitrary Path tracking Control of Articulated Vehicles Using Nonlinear Control Theory, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol.3, No.1, 1995, pp.125- 131.
 - 12) E. Shimizu, M. Yamakoshi and M. Ito : Anti-Sway Control of the Rubber Tired Transfer Crane, Proceedings of Dynamics and Design Conference, Vol. 2001, No.7, 2001, pp.72-75.
-