

自律型海中ロボットの知的行動の研究

——その4：スライディングモードを用いた運動制御——

A Study on Intelligent Behaviors of Autonomous Underwater Robots

——4th Report: Motion Control of the Robot by Sliding Controllers——

藤井輝夫*・浦環*

Teruo FUJII and Tamaki URA

1. はじめに

筆者らはこれまで、自律型海中ロボットの知的行動の研究を行うためのテストベッドとして、Twin-Burger¹⁾の設計建造を進めてきた。前報²⁾では完成したテストベッドの詳細について報告するとともに、運動制御を行う前段階として簡単な衝突回避方法について述べた。Twin-Burger に具体的な運動を行わせるためには、その運動特性を求め、これに基づいて運動制御を行う必要があるが、一般に潜水機の運動は非線形性が強い上に運動モード間の相互影響が大きく、さらに未知の外乱が存在するという過酷な条件下での運動制御が要求される。本報では非線形性を直接扱うことが可能で、運動特性の変動や未知の外乱に対して優れた特性を有するスライディングモード制御³⁾を Twin-Burger に適用することを考え、運動特性試験の結果に基づいてコントローラを設計し、これを用いた運動制御実験を行うことにより、その有効性を検討する。

2. スライディングモードを用いた運動制御

Twin-Burger は、オープンフレーム構造をしているため、模型実験によって運動特性を精密に求めることが困難であり、またテストベッドという性質を考えると搭載機器の変更などが頻繁に行われる可能性がある。スライディングモード制御は、このように運動特性が誤差を含むような形でしか得られない場合でも、その誤差を許容しうる制御方法であり、運動モード間の非線形なカプリングの項についても、これを外乱とみなすことにより、各運動モードに関して独立にコントローラを考えることができる。ここでは、Twin-Burger の4つの運動モードに関してスライディングモードを用いた位置と速度に関する制御を行うことを考える。

$\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ なる状態量を持つ SISO (Single Input Single Output) システムを、

$$\ddot{x}^{(n)} = b(\mathbf{x}; t) [f(\mathbf{x}; t) + U + d(t)], \quad (1)$$

と表す。ここで、 $x^{(n)}$: x に関する n 次の微係数、 $d(t)$: 外乱である。2次系を考えると $b(\mathbf{x}; t)$ は慣性の逆数、 $f(\mathbf{x}; t)$ は力の次元を持つダンピングやスプリングの効果などを含む関数であり、 U は制御入力である。このとき、 f および b に関してその推定値を \hat{f} 、 \hat{b} とするとそれらは誤差を含むものであり、

$$f(\mathbf{x}; t) = \hat{f}(\mathbf{x}; t) + \Delta f(\mathbf{x}; t), \quad (2)$$

ここで、 Δf は現実の系と推定値との誤差を表す。これに対して、予想される誤差の程度に応じ、

$$F(\mathbf{x}; t) \geq |\Delta f(\mathbf{x}; t)| \quad (3)$$

なる上限を考える。 b についても同様にして

$$1/\beta \leq \hat{b}(\mathbf{x}; t)/b(\mathbf{x}; t) \leq \beta \quad (4)$$

となる β を考える。また外乱に関しても

$$D(t) \geq |d(t)| \quad (5)$$

なる D を考える。 x が x_d に沿うようなトラッキング制御を行う場合、トラッキングエラーは、

$$\tilde{x} = x - x_d \quad (6)$$

と表され、トラッキングエラーのベクトルとして、

$$\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \dots, \tilde{x}^{(n-1)}]^T \quad (7)$$

が定義できる。

2次系について Sliding Surface を

$$s = \tilde{x} + \lambda \dot{\tilde{x}} \quad (8)$$

とすると、そのダイナミクスは(1)式の理想的状態 ($d(t) = 0$) を考えて、

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{\tilde{x}} - \ddot{x}_d + \lambda \ddot{\tilde{x}} \\ &= b(\mathbf{x}; t) [f(\mathbf{x}; t) + U] - \ddot{x}_d + \lambda \dot{\tilde{x}} \end{aligned} \quad (9)$$

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究 速 報
と得られる。この s に関する Sliding Condition として

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (10)$$

を満足するように制御則を導く。ここで η は正の定数である。まず推定した運動特性に対応する制御力として、

$$\hat{U} = \hat{f}(x; t) - 1/\hat{b}(x; t) [\lambda \dot{x} - \ddot{x}_d] \quad (11)$$

が求められる。さらに(10)式の条件を満たすように、ここでは Boundary Layer³⁾を考慮して、

$$U = \hat{U} - K(x; t) \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right), \quad (12)$$

ここで、 ϕ は Boundary Layer の厚さ、 $\text{sat}(\cdot)$ は飽和関数で、

$$K(x; t) = [(\beta - 1)/\hat{b}(x; t)] |\lambda \dot{x} - \ddot{x}_d| + F(x; t) + D(t) \quad (13)$$

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x & : |x| \leq 1 \\ \text{sgn}(x) & : |x| \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

により制御力が計算できる。

3. Twin-Burger の運動特性

前節に述べた制御則を Twin-Burger に適用するためには、(1)式の運動方程式に対応する運動特性を求める必要がある。ここでは簡単な近似を考え、慣性と速度の符号付き自乗に比例する抗力のみを考慮して、

$$\begin{aligned} \text{Surge} &: M_u \dot{u} + C_u |u| = U_u, \\ \text{Sway} &: M_v \dot{v} + C_v |v| = U_v, \\ \text{Heave} &: M_w \dot{w} + C_w |w| = U_w, \\ \text{Yaw} &: M_r \dot{r} + C_r |r| = U_r, \end{aligned} \quad (15)$$

の形の運動方程式を考える。ここで u : Surge の速度、 v : Sway の速度、 w : Heave の速度、 r : Yaw の角速度である。 M および C に関しては、それぞれ変位あるいは速度に関して強制的なりミットサイクル運動を行うことにより、その実験データからこれらを最小自乗推定する。その一例として、Yaw について、モーメント 2.96 [Nm] を発生し、Heading 角 ψ の絶対値が 5 [deg] を越えた時に推力の符号を変えることによりリミットサイクル運動を行わせた実験の結果を Fig. 1 に示す。このデータから最小自乗推定により M_r および C_r を求めた結果、これらを用いて行ったシミュレーションと実験データとは非常に良い一致を示した (Fig. 2 参照)。他の運動モードに関しても同様にしてパラメータの推定を行い M および C に関して Table 1 に示すような推定値が得られた。

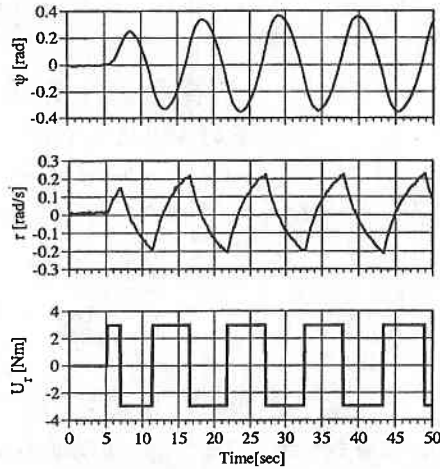


Fig. 1 Limit Cycle Motion of The Twin-Burger (Yaw)

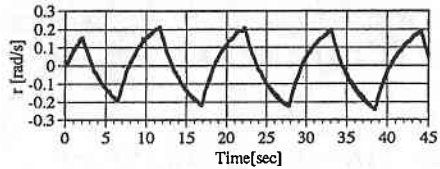


Fig. 2 Verification of the Estimation Results (Yaw)

Table 1 Estimated Motion Parameters

Surge	$M_u = 191.9$ [kg] $C_u = 150.3$ [kg/m]
Sway	$M_v = 320.1$ [kg] $C_v = 338.4$ [kg/m]
Heave	$M_w = 470.6$ [kg] $C_w = 75.3$ [kg/m]
Yaw	$M_r = 29.4$ [kgm ²] $C_r = 1.56$ [kgm ²]

4. Twin-Burger の運動制御

Twin-Burger の制御可能な運動モードに関する運動方程式を(1)式の定式化に合わせて、

$$\begin{aligned} \dot{u} &= b_u [f_u(x) + d_u(t) + U_u], \\ \dot{v} &= b_v [f_v(x) + d_v(t) + U_v], \\ \dot{w} &= b_w [f_w(x) + d_w(t) + U_w], \\ \dot{r} &= b_r [f_r(x) + d_r(t) + U_r], \end{aligned} \quad (16)$$

と表すと $f(x)$ は、

$$x = [x, u, y, v, z, w, \psi, r]^T \quad (17)$$

の関数となるが、各自由度間の干渉の影響を外乱あるいはモデル誤差に含まれるものとみなして(16)式の近似を用

いると、 f および b はそれぞれ、

$$\begin{aligned} f_u(x) &= -C_u u |u|, & b_u &= 1/M_u, \\ f_v(x) &= -C_v v |v|, & b_v &= 1/M_v, \\ f_w(x) &= -C_w w |w|, & b_w &= 1/M_w, \\ f_r(x) &= -C_r r |r|, & b_r &= 1/M_r, \end{aligned} \tag{18}$$

となる。これらに対し、パラメータ推定の際の実験結果を参考にして(3)式の F および(4)式の β には、Table 2 に示すような値を用いるものとした。なおこれらの値は、Surge, Sway, Heave, Yaw に関するモデル誤差および運動特性変動の上限を、それぞれ M に関して 20%, 30%, 10%, 15%, C に関して 20%, 30%, 30%, 20% 考慮することに対応している。また(5)式の D に関しては、外乱の定常的特性として特に顕著な傾向が得られないため、ここではすべて等しく 0.2 とした。

各モードに関する Sliding Surface を

$$\begin{aligned} s_u &= \tilde{u} + \lambda_u \tilde{x}, \\ s_v &= \tilde{v} + \lambda_v \tilde{y}, \\ s_w &= \tilde{w} + \lambda_w \tilde{z}, \\ s_r &= \tilde{r} + \lambda_r \tilde{\psi}, \end{aligned} \tag{19}$$

として、(12)式に従って位置と速度の目標軌道に関して制御力を算出する。簡単のためここでは、時不変システムと考えて f は時間によらず一定値とし、また Boundary Layer についても時間的に一定の厚みであるとした。(19)式の λ および Boundary Layer の厚み ϕ に関しては、必要なトラッキング性能を考慮しながら、実験による試行錯誤を通して決定し、Table 2 の値を用いることにした。

5. 運動制御実験

スライディングモード制御に基づいて構成されたコントローラを Twin-Burger に適用し、長方形とジグザグ状の2種類の経路に追従して航行させることを考える。これらの経路を航行するためには、深度および針路を保ちながら直進する運動と経路内の頂点において次の頂点に向かって回頭する運動を行う必要がある。

経路上の直線部分では、直進する運動を実現するために、Surge に関して Fig. 3 に示すような台形状の速度変化によって直進する位置 x [m] と速度 u [m/s] の軌道を設定する。ここでは、直進すべき距離 x_d [m] に応じて台形の上底部分の時間を変化させ、速度の最大値 $u_{max} = 0.2$ [m/s]、加減速時の加速度の最大値 $|\dot{u}_{max}| = 0.05$ [m/s²] として目標軌道を算出した。この際、Yaw に関しては ψ [rad] 一定で針路保持を、Sway に関しては横滑り速度 $v=0$ [m] を保持することを目標とした制御を行う。

Table 2 Parameters for Sliding Mode Control

Surge	$F_u = -30.0u u $ $\beta_u = 1.2$	$\lambda_u = 1.0$ $\phi_u = 0.3$
Sway	$F_v = -101.5v v $ $\beta_v = 1.3$	$\lambda_v = 0.5$ $\phi_v = 0.5$
Heave	$F_w = -15.06w w $ $\beta_w = 1.3$	$\lambda_w = 0.1$ $\phi_w = 0.5$
Yaw	$F_r = -0.156r r $ $\beta_r = 1.2$	$\lambda_r = 2.0$ $\phi_r = 0.3$

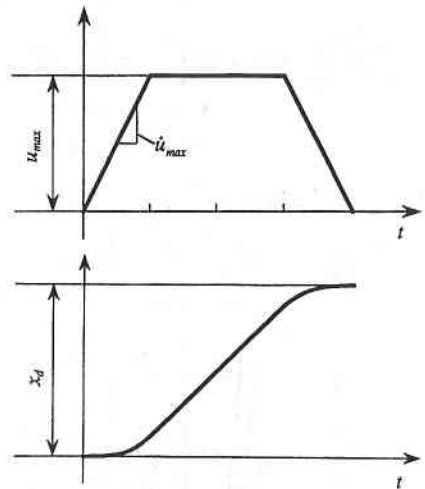


Fig. 3 Target Trajectory of Surge Motion Control

また経路上の頂点においては、必要な方向に向かって回頭する動作を実現するために、Yaw に関して Surge と同様に台形状の速度変化によって、位置 ψ [rad] と速度 r [rad/s] に関する軌道を設定する。経路内において必要となる回頭動作の際の位置の目標は常に $\pi/2$ [rad] であり、ここでは角速度の最大値 $r_{max} = \pi/8$ [rad/s]、加減速時の角加速度の最大値 $|\dot{r}_{max}| = \pi/8$ [rad/s²] として目標軌道を算出した。この際、Surge および Sway に関する制御は行わないものとする。なお Heave については、直進および回頭いずれの場合においても、常に深度を一定に保つ制御を行うものとする。

以上のような直進および回頭の動作を組み合わせると長方形およびジグザグ状の経路追従を行った実験結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。図中点線が目標の経路であり、Yawing のデータは直接センサで計測されたものであるが、Surging についてはプロペラ式の対水速度センサの出力データを積分して求めたものである²⁾。

Fig. 5 の長方形の経路に関しては、最大誤差が 0.2 [m] 程度で経路の追従が達成されており、Surge および Yaw ともにかなりよい結果が得られている。また

研究速報

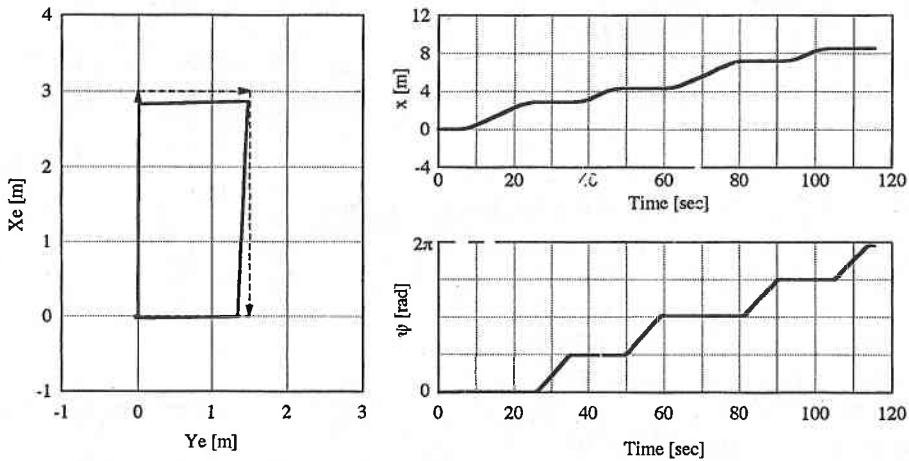


Fig. 4 Experimental Results of Path Following (Rectangular)

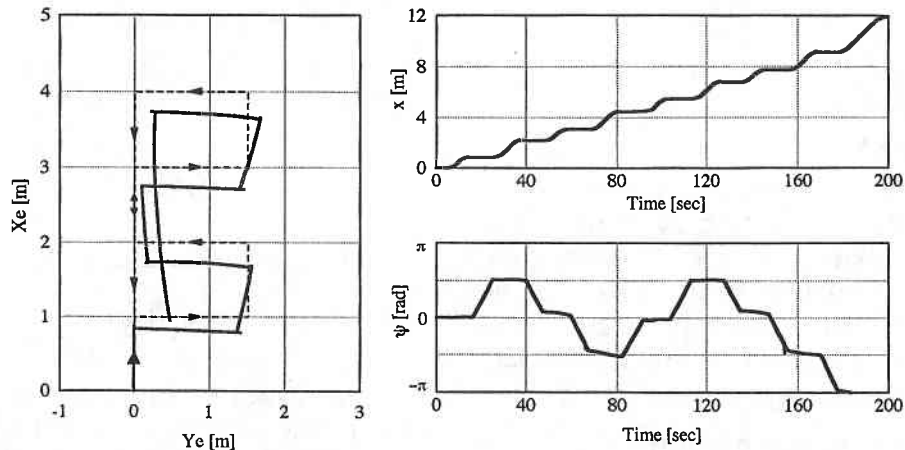


Fig. 5 Experimental Results of Path Following (Zigzag)

Fig. 6 のジグザグ状の経路に関しても、おおむね目的の制御は達成されているが、最大0.5 [m] 程度の誤差が見られる。これは対水速度センサの誤差によるものであり、このようなロボットの位置情報の獲得方法については、センサの信号処理や他の原理によるセンシングの方法なども含めて今後検討を進める必要がある。

以上の結果からスライディングモード制御によって、Twin-Burger は設定した経路に追従して航行可能であることが確認された。

6. おわりに

本研究では、自律型海中ロボット Twin-Burger の運動制御について考え、スライディングモード制御を適用する方法について検討した。Twin-Burger の制御可能な4つの運動モードについて、それぞれ独立したコント

ローラをスライディングモード制御に基づいて構成し、これを用いて実際に2種類の経路追従航行の実験を行ったところ、良好な制御結果を得た。このことはスライディングモード制御がTwin-Burgerの運動制御手法として有効であることを示すものであり、これによりTwin-Burgerが具体的作業を行う場合に、ミッションに応じた経路に従って航行することが可能となる。

(1993年7月28日受理)

参考文献

- 1) 藤井, 浦: 生産研究, Vol. 44, No. 9(1992)
- 2) 藤井, 浦, 黒田: 生産研究, Vol. 45, No. 10(1993)
- 3) Slotine and Li: "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1991)