

自律型海中ロボットの知的行動の研究

— その 3 : テストベッド Twin-Burger の動作試験 —

A Study on Intelligent Behaviors of Autonomous Underwater Robots

— 3rd Report: System Verification of the Test-Bed Robot Twin-Burger —

藤井輝夫*・浦

環*・黒田洋司*

Teruo FUJII, Tamaki URA and Yoji KURODA

1. はじめに

自律型海中ロボットの知的行動の研究ツールとして、汎用性のあるテストベッドロボット“Twin-Burger¹⁾”が設計製作され、前報²⁾では完成したロボットのハードウェアおよび基本ソフトウェアシステムの詳細について報告した。ここでは、ロボットが具体的に航行する際に必要となる基礎データを得るために実施したスラストの特性試験と、全体システムとしての動作検証のために行われた簡単な衝突回避の実験について報告する。

2. スラストの特性試験

Twin-Burger のスラストは定格出力48.6W の DC モータの回転を、ギアによって1/4.33 に減速し、さらに水密のためにマグネットカップリングを介してプロペラに伝えるものである。モータはFETによる電流駆動で、 $-5V \sim 5V$ の入力信号電圧に対して正逆転両方向に制御可能であり、2相の磁気式エンコーダによって回転数をモニタすることができる。

当面はオープンループによる推力制御を考慮するため、入力信号電圧-推力の静的な関係が必要となるが、将来ローカルなフィードバックを用いて推力制御を行うことを念頭において、ここでは静的な特性についても検討することとし、4基のスラストそれぞれについて静的および動的な特性試験を行う。実験のための定式化としてスラストの特性を以下のような方程式で表す³⁾。

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} &= \beta\tau - \alpha\Omega \quad |\Omega|, \\ Thrust &= C_t \Omega \quad |\Omega|. \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Ω はスラストの回転角速度、 τ は入力信号電圧、 α 、 β は動特性を特定するパラメータ、 C_t は比例係数である。静的な試験により β/α および C_t が、動的な試験結果に基づいてパラメータ推定を行うことにより、 α 、 β の値が求められる。実験システムの構成を

*東京大学生産技術研究所 第2部

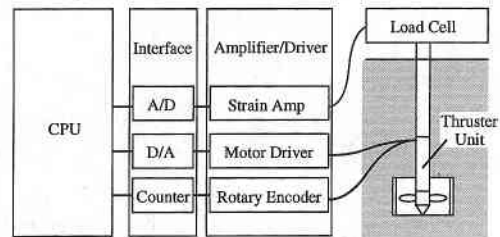


Fig. 1 Experimental System for Thruster Tests

Fig. 1 に示す。なお、推力に関するスラスト回りの流れの影響については、テストベッドの運動速度が小さいことを考慮して、その効果は小さいものとする。

2.1 静的特性試験

ボラードプル状態で入力信号電圧を $-5V \sim 5V$ まで $0.5V$ 間隔で変化させ、静的な推力を測定する。これにより、1) 入力電圧-回転角速度自乗、2) 入力電圧-推力、3) 回転角速度自乗-推力の3曲線が得られる。一例として Th-L (フレームの左側に配置する前後運動用スラスト) に関する曲線を Fig. 2 に示す。また、1) および 3) から求められる β/α および C_t の値を Table 1 に示す。以上の結果から Twin-Burger の運動制御を行う際に必要となる推力-入力信号電圧変換式が Table 2 のように得られる。変換式はスラストの回転方向によってそれぞれ異なり、ここでは Twin-Burger のボディ固定の座標系に対して正方向に運動が起こる方向を正回転 (FWD) 方向としている。

2.2 動的特性試験

疑似ランダム 2 値信号をスラストに入力して、推力の時系列的な変化を測定し、最小自乗法によるパラメータ推定により α 、 β の値を求める。試験結果の一例として前項と同じく Th-L に関する入力信号と推力の時系列時な変化の測定データを Fig. 3 に示す。同定の結果は Table 3 に示すように、 β に関しては安定した値が得られたが、 α に関してはスラストの回転数を計測するエンコーダの分解能の問題等により $\Omega \quad |\Omega|$ の測定値が不安

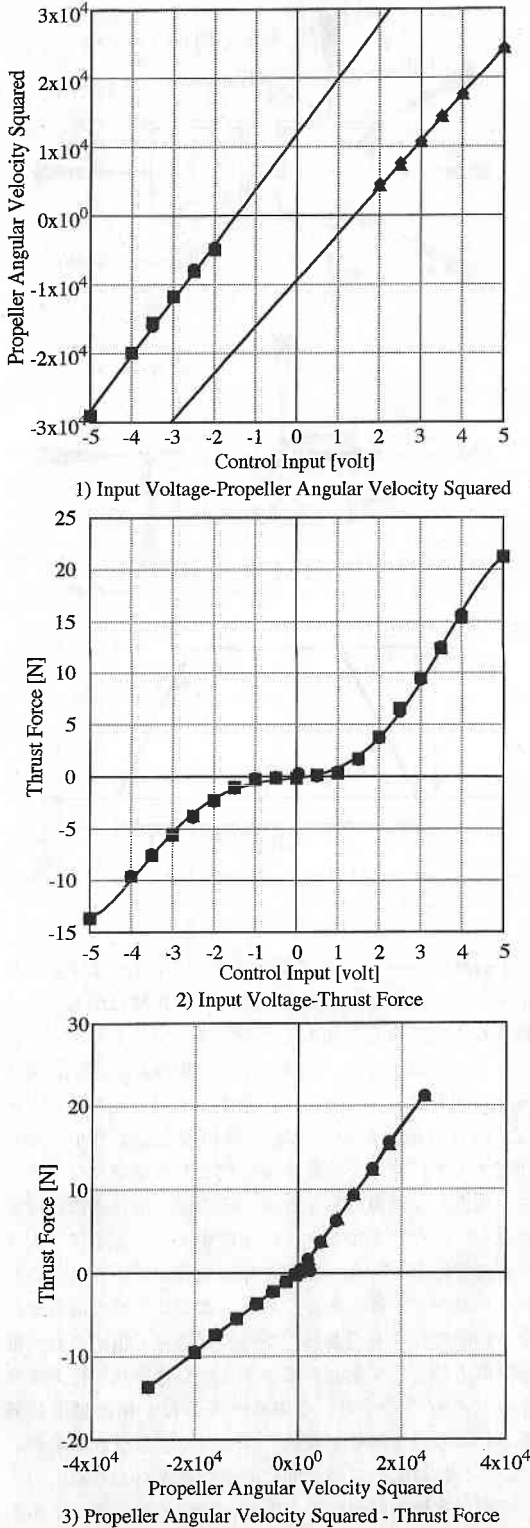


Fig. 2 Characteristic Curves of Thruster-Left (Th.-L)

Table 1 Thruster Parameters Estimated from Static Tests

Thruster	Direction	C_t [N·s ²]	β/α [v ⁻¹ ·s ²]
Left	FWD	8.761×10^{-4}	6.742×10^3
	BAK	4.767×10^{-4}	8.046×10^3
Right	FWD	8.753×10^{-4}	5.532×10^3
	BAK	4.967×10^{-4}	6.350×10^3
Horizontal	FWD	8.732×10^{-4}	6.099×10^3
	BAK	4.687×10^{-4}	7.000×10^3
Vertical	FWD	8.852×10^{-4}	6.215×10^3
	BAK	4.902×10^{-4}	6.892×10^3

Table 2 Control Voltage Calculation Curves

Thruster-Left (Th.-L)	
FWD	$\Omega G = 1.414 \times 10^3 \times Thrust^4 + 5.797 \times 10^1$ $V^+ = 5.516 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.507 \times 10^2 \times \Omega + 1.076$
BAK	$\Omega G = 2.098 \times 10^3 \times Thrust^4 - 1.275 \times 10^2$ $V^- = -2.850 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.862 \times 10^2 \times \Omega - 8.349 \times 10^1$
Thruster-Right (Th.-R)	
FWD	$\Omega G = 1.142 \times 10^3 \times Thrust^4 + 7.258 \times 10^1$ $V^+ = 7.350 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.428 \times 10^2 \times \Omega + 9.865 \times 10^1$
BAK	$\Omega G = 2.012 \times 10^3 \times Thrust^4 - 1.295 \times 10^0$ $V^- = -4.785 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.371 \times 10^2 \times \Omega - 8.843 \times 10^1$
Thruster-Horizontal (Th.-H)	
FWD	$\Omega G = -(2.133 \times 10^3 \times (-Thrust^4) - 5.574 \times 10^1)$ $V^+ = 4.251 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.047 \times 10^2 \times \Omega + 1.044$
BAK	$\Omega G = -(1.145 \times 10^3 \times (-Thrust^4) + 7.681 \times 10^1)$ $V^- = -6.898 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 7.251 \times 10^2 \times \Omega - 1.226$
Thruster-Vertical (Th.-V)	
FWD	$\Omega G = 1.130 \times 10^3 \times Thrust^4 - 3.094 \times 10^1$ $V^+ = 4.903 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.409 \times 10^2 \times \Omega + 1.036 \times 10^0$
BAK	$\Omega G = 2.039 \times 10^3 \times Thrust^4 - 1.663 \times 10^2$ $V^- = -3.493 \times 10^{-5} \times \Omega^2 + 1.505 \times 10^2 \times \Omega - 9.535 \times 10^1$

定となったことの影響で安定した推定値が得られず、 β/α の値が静的な試験の結果と食い違っている。そのため、 α に関しては静的な試験により得られた β/α の値から逆に計算して求めることにした。

3. 簡単な衝突回避実験

完成した Twin-Burger の動作を検証すると同時に、具体的な運動を行う前段階として、水中においてロボットの安全を確保するための簡単な衝突回避動作の実験を行う。

研 究 速 報

Table 3 Thruster Parameters Estimated from Dynamic Tests

Thruster	Direction	α	β	$\alpha(\text{calculated})$
Left	FWD	5.386×10^{-4}	3.068	4.551×10^{-4}
	BAK	2.756×10^{-4}	3.025	3.760×10^{-4}
Right	FWD	6.596×10^{-4}	2.618	4.732×10^{-4}
	BAK	0.570×10^{-4}	2.587	4.074×10^{-4}
Horizontal	FWD	5.141×10^{-4}	2.631	4.314×10^{-4}
	BAK	1.821×10^{-4}	2.648	3.783×10^{-4}
Vertical	FWD	3.319×10^{-4}	2.716	4.370×10^{-4}
	BAK	0.154×10^{-4}	2.701	3.932×10^{-4}

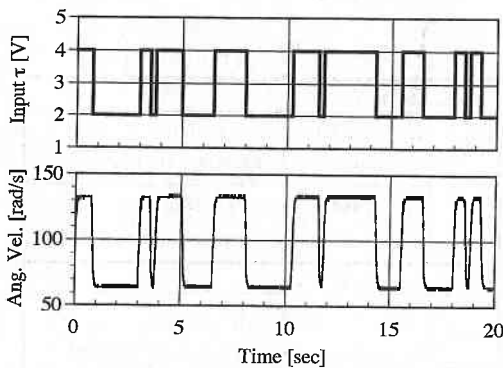


Fig. 3 Time History of Thruster Dynamic Test (Thruster-Left)

Table 4 The Rule Base for Reflexive Control Logic

if		then	
$R_r < R_{Limit}$	$R_f > 1 [m]$	$u < -0.2 [m/s]$ else $U_1 = U_2 = 6 [N]$ $U_1 = U_2 = 4 [N]$	
	$R_{l30} < R_{Limit}$ $R_{r30} < R_{Limit}$	$R_r > 1 [m]$	$u > 0.2 [m/s]$ else $U_1 = U_2 = -6 [N]$ $U_1 = U_2 = -4 [N]$
$R_{lt} < R_{Limit}$		$R_{rt} > 1 [m]$	$U_3 = 6 [N]$
	$R_{rt} < R_{Limit}$	$R_{lt} > 1 [m]$	$U_3 = -6 [N]$
	$R_b < R_{Limit}$		$U_4 = -6 [N]$

Range data: R_f (fore), R_r (rear), R_{r30} (right 30 deg), R_{l30} (left 30 deg), R_{rt} (right), R_{lt} (left), R_b (below)
 R_{Limit} : Range to start collision avoidance action
 Thrust Force: U_1, U_2 (Surge), U_3 (Sway), U_4 (Heave)
 u : Surging Speed

運動制御を行わない状態のテストベッドは外力の影響をうけやすく特に水槽内において壁付近に沈めた場合には壁に対して衝突する可能性がある。このような非制御状態における衝突回避を実現するために、Table 4 に示すような超音波測距センサのデータに基づくルールによって反射的に衝突回避を行うことを考える。

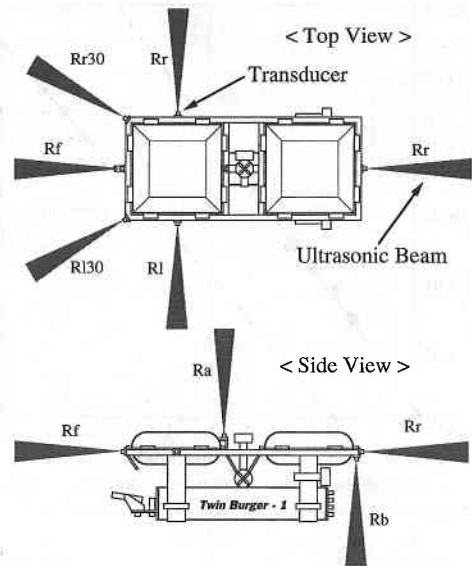


Fig. 4 Arrangement of Ultrasonic Transducers

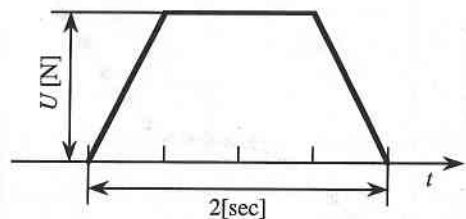


Fig. 5 Trajectory of Thruster Force for Reflexive Collision Avoidance

Twin-Burger の超音波測距のための振動子はFig. 4 に示すように配置されており、横方向の距離に関してはそれぞれ1点のみしか知ることができない。したがって、ここでは回頭することは考えずに、前後左右上下に関する並進運動によって衝突を回避するものとした。たとえば、前方の距離が指定した限界値 R_{Limit} より小さく、回避するのに十分な距離を後方にとれる場合にはスラスタを後進して回避行動をとる。その際、前後進の速度を考慮して、たとえば前向きに速度が大きいときには大きな推力で回避を行う。回避動作は超音波測距センサのサンプル時間が1秒であるため、ここでは1回の回避動作を2秒間で行うものとし、ルールによって指定された推力を最大値としてFig. 5 に示すような台形状に推力を変化させるものとする。なおルール群はOR論理的に適用されるものであり、複数のルールが満たされる場合には、これに対応して複合的に回避行動が行われる。

実際に水槽内において人間が超音波の振動子に手をかざすことにより、疑似的に障害物が近づいたものとして

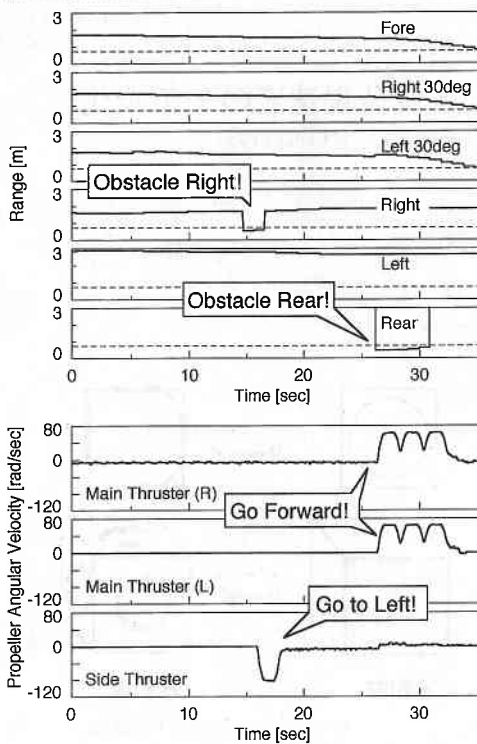


Fig. 6 Experimental Result of Reflexive Collision Avoidance

回避行動を行わせた結果を Fig. 6 に示す。ここで、すべての方向に関して $R_{Limit}=0.75m$ である。15秒付近およ

び26秒付近において、それぞれロボットの右側および後方に障害物を検知し、回避行動が行われており、Twin-Burger がシステム全体として満足に動作し、超音波測距に基づく衝突回避が可能であることが確認された。

4. おわりに

自律型海中ロボットの知的行動の研究のためのテストベッド Twin-Burger に関して、本論文では搭載したスラスタの特性試験を実施し、今後運動制御を考える上で必要となる基礎的なデータを得た。また、完成したテストベッドの動作検証のため簡単な衝突回避実験を行い、Twin-Burger がセンサ、アクチュエータおよび通信システムなどを含めたシステム全体として満足に動作することを確認した。運動制御の方法や具体的な航行実験等については次報以降に報告する予定である。

(1993年 8月18日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤井, 浦: “自律型海中ロボットの知的行動の研究 (その1)”, 生産研究, Vol. 44, No. 9(1992) pp. 43-46
- 2) 藤井, 浦, 黒田: “自律型海中ロボットの知的行動の研究 (その2) 生産研究, Vol. 45, No. 10(1993) pp. 68-71
- 3) Yoerger, Cooke, and Slotine: “The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation into Control System Design”, IEEE J. OE, Vol. 15, No. 3 (1990) pp. 167-178