

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289314

研究課題名(和文) モーター周期制御による操舵応答性向上に関する研究

研究課題名(英文) Study on Improvement of Turning Performance by Cyclic Control of Motor-driven Propulsion System

研究代表者

賞雅 寛而 (TAKAMASA, Tomoji)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：20134851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、産業的・環境的要請から電気推進船が多く開発建造されており、モーターインバータ技術の発達によって、非常に高周期のプロペラ回転制御が可能になってきている。本研究は平成25～27年度の3年間に、プロペラの周期制御による低速航行時の操縦性向上を目的として、モーター周期制御時の予測推力から操縦性向上に必要な周期制御パターン評価、実船の旋回性能試験によりモーター周期制御の有効性評価及び小型電気推進船(電池推進船)の性能評価をそれぞれ行った。結果、モーター周期制御が平均推力の向上に有効に寄与すること、小型電気推進船が内燃機関船に比較して高い環境性能と快適性を持っていることを示した。

研究成果の概要(英文)：Recently, a lot of electric or motor driven-propulsion ships have been built due to industrial and environmental requirements. Rapid development of motor-inverter system makes high frequency cyclic propeller control possible. This study conducted from 2013 through 2015 was aimed to improve turning performance or ship maneuverability by cyclic control of motor-driven propulsion system by conducting the average thrust power test at the time of motor cyclic control in turning, and to evaluate environment and comfort advantages of motor-driven ships against conventional engine propelled ships. The results showed that the cyclic control of motor-driven propulsion system improved the average thrust power and ships propelled by electric motors provided higher environment-friendly performance as well as comfort for passengers than those propelled by internal combustion engines.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶工学 電気機器工学 制御工学 次世代交通システム 電池推進船

1. 研究開始当初の背景

船舶はプロペラ推進であり、通常舵の角度を変えることにより、その転針を行う。低速の場合には舵に当たるプロペラ噴流速度が低いためにモーメントが小さくなり、操縦応答性がきわめて低くなる。そのためスラスタ設置やタグボート使用などが必要であるが、近年プロペラ自身の方向を変えられるアジマスプロペラやポッドプロペラの採用が国内外で進められている。

一方、船舶の静穏化・低振動化、推進効率の向上のために電気推進船が多く開発建造されている。電気推進船は、ディーゼル機関で駆動される発電機で発電し、推進モーターを駆動する。当初は砕氷船、調査船等の特殊な用途の船舶に用いられてきたが、高効率の電気推進システムの開発及びポッド推進装置の採用による最適船型の採用により、従来の推進方法と同程度の燃費効率が達成されるようになった。その結果、欧州を中心にクルーズ船、一般貨物船に 90 年代より電気推進システムの導入が拡大した。我が国においても 1998 年のケーブル敷設船光進丸を皮切りに、浚渫船、氷海タンカー、高速フェリー、など数多くの建造実績がある。このプロペラ回転数制御(すなわちモーターの回転数制御)は通常 PWM (Pulse Width Modulation) で行われており、制御精度が高いため、1) 急加減速命令に対する高追従性、2) 過回転制御による安定運航・システムの信頼性向上、3) スムースな船速制御などの利点を持つ。

ここで、研究代表者らは世界初の急速充電対応型電池推進船「らいちょう」及びこれも世界初のモーター駆動ウォータージェット船「らいちょう S」を開発建造した。電池推進船は電気推進船とは異なり、船内に発電設備を持たず 2 次電池を搭載している。「らいちょう」は、全長 10 m、定員 12 人の小型船舶で、自動車用の急速充電システムを採用し、30 分の充電で 45 分ほどの全速(毎時約 20 km)連続航行が可能である(図 1)。リチウム電池 - 推進モーターを動力とすることで、騒音や振動を抑える、航行中の排気ガスや CO₂ を出さない、高出力で短時間の充電時間を特徴としており、その革新性が学術的・産業的にも高く評価され、「マリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー 2011」(日本マリンエンジニアリング学会)、「日本シップ・オブ・ザ・イヤー 2010(小型旅客船部門)」(日本船舶海洋工学会)及び「日本ポート・オブ・ザ・イヤー 2010、2011 特別賞」(日本



図 1 らいちょう

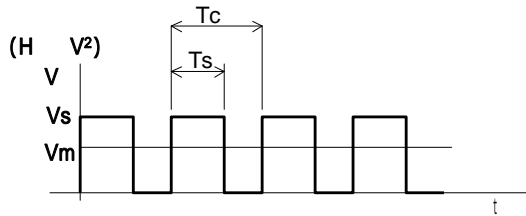
ポート・オブ・ザ・イヤー実行委員会)を受賞している。

このらいちょうシリーズの運航実験の中で研究代表者らは、低速域の小型電池推進船を用いた予備実験により、モーターを以下に示すような周期制御をすることにより操縦応答性が大きく向上することを確認した。

前述のように、低速運転時には単純に回転数を下げると、噴射圧力(プロペラ噴流圧力)は回転数の 2 乗に比例しているため低くなり舵の効きが不安定となり操縦が困難になる。ここで図 2 に示すように回転をパルス状に駆動させ推力の横方向成分が船を曲げるモーメントに要する噴流圧力(Vs 時の噴流圧力 Hs)を得るとともに、パルス幅のデューティ比(Ts/Tc)を変化させることにより速度(Vm)が制御できる。

また矩形波であるパルスを図 3 に示す運動曲線を用いた運動制御を行うことで加速度 A を連続系とし、最適な躍動 J(加速度の微分値 Jerk(ジャーク)という)にて振動が抑制できることになる。

上記の周期的制御による、旋回性能の向上例を図 4 に示す。



V: モーター(プロペラ)の回転速度
H: 噴射圧力

$$H_s = V_s^2$$

$$V_m = V_s \cdot \frac{T_s}{T_c}$$

図 2 モーター(プロペラ)回転速度波形(矩形波)

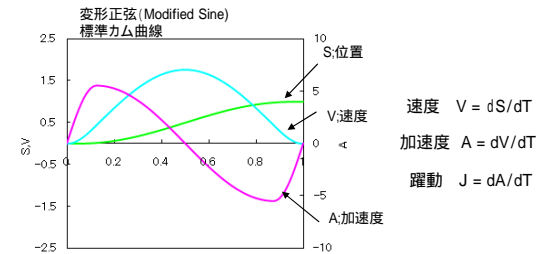
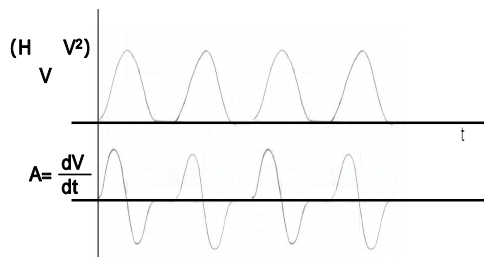


図 3 モーター(プロペラ)回転速度波形(カム曲線)

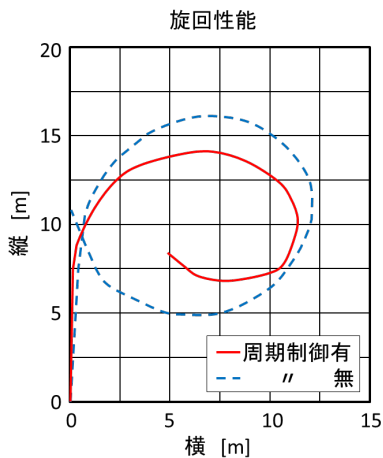


図4 予備実験結果「らいちょう」
($T_c = 2\text{sec}$, $T_s = 1\text{sec}$)

2. 研究の目的

本研究では、このプロペラの周期変動による操舵応答性の向上を実用化するために、プロペラ周期変動による操縦特性の向上を実験的に確認し(パラメータは回転数、パルス幅デューティ比など)、並行してプロペラ周りの流動シミュレーションを行い、最適な回転数 - デューティ比の関係を明らかにする。なおこの研究では小型電池推進船を用いるが、得られたプロペラ周期変動特性は大型電池推進船にも十分に適用可能であると考えられる。

本研究により、操舵性向上に必要な周期特性を明らかにすることができれば、電気推進船の操安性の向上及び高効率化ひいては電気推進船のさらなる普及による低炭素化社会の実現につながると期待される。

3. 研究の方法

上述のように本研究においては、プロペラ回転を周期的変動、間欠の周期変動制御し、旋回性能を得ながら平均速度を低くする。周期変動の曲線は振動を抑制するため加速度と躍動が連続系になる図5に示す周期変動制御パターンを用いた。

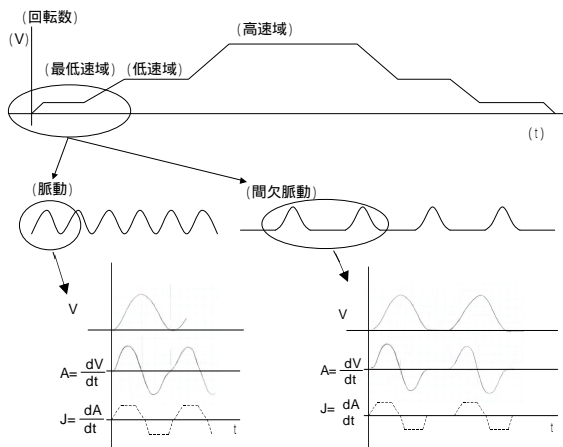


図5 周期変動制御パターン

本研究課題「モーター周期制御による操舵応答性向上に関する研究」は平成 25~27 年度の 3 年間に、プロペラの周期制御による低速航行時の操縦性向上を目的として、モーター周期制御時の予測推力から操縦性向上に必要な周期制御パターン評価、実船の旋回性能試験によりモーター周期制御の有効性評価及び小型電気推進船(電池推進船)の性能評価をそれぞれ行った。

4. 研究成果

モーター周期制御時の予測推力から操縦性向上に必要な周期制御パターン評価、実船の旋回性能試験によりモーター周期制御の有効性評価(雑誌論文)においては、周期制御時のモーター回転数から平均推力を予測した。

図6の上図は周期制御におけるインバータへのトルク指令信号を示したものである。図に示される Δt 、 t_c 、 T_s および T_m は、それぞれ、周期制御におけるトルク指令時間、トルク指令周期、定格トルクを100%とした場合のトルク指令値および平均トルク指令値である。本研究では、 Δt と t_c の比で表されるDuty比 $D(=\Delta t/t_c)$ 、および、噴射周波数 $f_1(=1/t_c)$ を変化させた際の旋回性能を評価する。ここで、トルク指令値は、 $T_s = T_m/D$ で表わされる。したがって、平均トルク指令値 T_m を同一とする場合、 D を減じることで T_s を高く設定できる。

図6の下図は、周期制御時のトルク指令値(上図)に対するモーター回転数の時間変化を示している。図に示されるように、矩形形状のオン・オフ信号でインバータに入力されるトルク指令に対して、オン信号が入力される間($t_0 - t_1$)のモーター回転数 $N_{ON}(t)$ は、設定トルクにおける定常回転数 N_s に至るまでに応答遅れを有し、一方、オフ信号が入力されている間($t_1 - t_2$)のモーター回転数 $N_{OFF}(t)$ は、モーターの慣性によって時間とともに徐々に減じる傾向を示す。

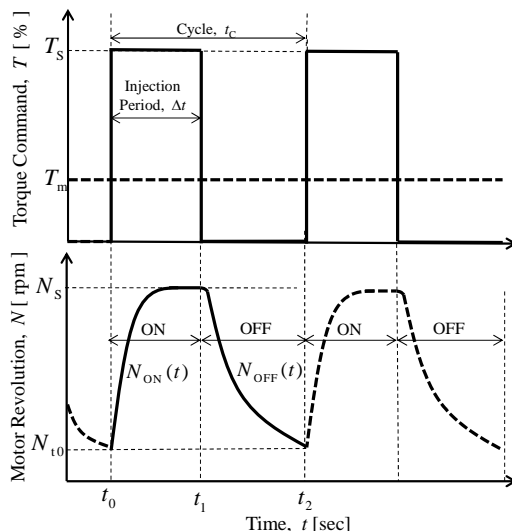


図6 トルク信号とモーター回転

図7は周期制御時におけるモーター回転数の計測値と予測値の比較例である。予測値は計測値にほぼ一致しており、Duty比0.33～1および噴射周波数 $0.66 \sim 2.5 \text{ s}^{-1}$ の範囲における両者の平均相対誤差は8.2%であった。

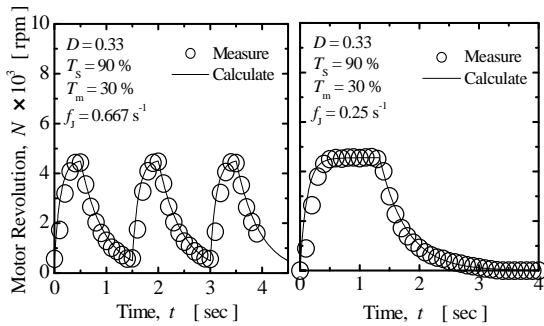


図7 予測及び実測モーター回転

これらモーター回転から算出した予測平均推力より、噴出周波数 $f_j = 0.8 \sim 2.0 \text{ s}^{-1}$ およびDuty比 $D (= \Delta t / t_c)$ (Δt : 周期制御におけるトルク指令時間(s), t_c : トルク指令全周期(s)) = 0.33 ~ 0.6の範囲において、モーター周期制御が平均推力の向上に有効に寄与することを解析的に示した。

これらの周期制御パターンを含めたモーター周期制御時の旋回性能試験を電池推進船で実施した結果(実験パラメータは表1参照)の、Duty比および噴射周波数に対する旋回角速度の増減の傾向は、モーター回転数から予測した推力比の結果と定性的な一致を示した。モーター周期制御による旋回性能は、図8及び図9に示されるように本試験の範囲においてDuty比 $D = 0.33$ 、噴射周波数 $f_j = 1 \text{ s}^{-1}$ の条件が最も高く、連続出力時と比較して10%以上の旋回角速度の向上が確認された。

表1 旋回実験パラメーター

Run #	Average Torque, T_m [%]	Command Torque, T_s [%]	Duty Ratio, D [-]	Jet Frequency, f_j [s^{-1}]	
A1	30	90	0.33	0.67	
A2		60	0.50		
A3		30	1.00		
A4		90	0.33	0.33	0.25
A5					0.83
A6					1
A7					1.5
A8					2
A9					2.5
B1	25	75	0.33		0.67
B2		50	0.50		
B3		25	1.00		
C1	20	60	0.33	0.67	
C2		40	0.50		
C3		20	1.00		

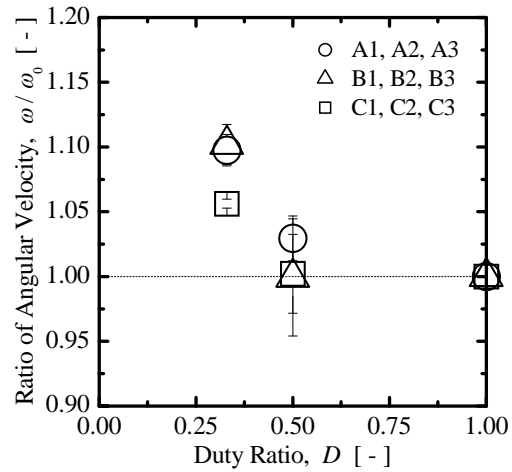


図8 旋回角度に及ぼすDuty比の影響

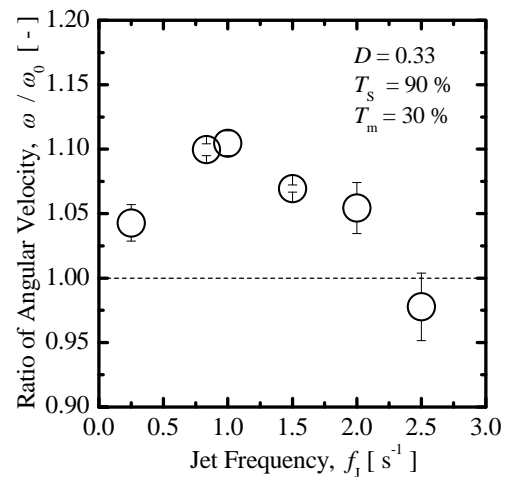


図9 旋回角度に及ぼす噴出周波数の影響

また電池推進船の快適性(静音)性能評価を行い(参考文献、雑誌論文)電池推進船が背景雑音に近似した非常に低騒音であり、内燃機関船に比較し19 dB以上の差があることを実験的に示し、小型電気推進船が内燃機関船に比較して高い環境性能と快適性を持っていることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

田島宏一, 波津久達也, 清水悦郎, 大出剛, 賞雅寛而, モーター駆動ウォータージェット推進船の周期制御による旋回性能の向上, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第50巻, 第3号, pp. 101-106, 2015, オープンアクセスなし。

西村真佐人, 清水悦郎, 大出剛, 出力制限機能付電池推進船用運航支援システムの開発, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第48巻, 第5号, pp. 84-89,

2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/48/5/48_670/_article/-char/ja/.

西村真佐人, 清水悦郎, 甘糟和男, 杜宇航, 大出剛, 賞雅寛而, 電池推進船と内燃機関船の水中音の比較, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第48巻, 第4号, pp. 137-142, 2013, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/48/4/48_560/_article/-char/ja/.

〔学会発表〕(計 5件)

佐藤征哉, 木船弘康, 大出剛, CHAdeMOに準拠した電池推進船の電力システム構成, 第85回(平成27年度)マリンエンジニアリング学術講演会, 平成27年10月27日, 富山国際会議場(富山県富山市).

田島宏一, 斉藤凜太郎, 波津久達也, 清水悦郎, 大出剛, 賞雅寛而, ウォータージェットの周期制御による旋回性能の向上, 第84回(平成26年度)マリンエンジニアリング学術講演会, 平成26年11月19日, 海峽メッセ下関(山口県下関市).

竹内透, 山岸進, 木船弘康, 電池推進船らいちょうNを用いた運航プラントシステム構成について, 第84回(平成26年度)マリンエンジニアリング学術講演会, 平成26年11月21日, 海峽メッセ下関(山口県下関市).

田島宏一, 大出剛, 波津久達也, 福原豊, 木船弘康, 賞雅寛而, 電池推進船「らいちょうS」搭載電池の特性評価, 第83回(平成25年)マリンエンジニアリング学術講演会, 平成25年9月3日, グランシップ静岡(静岡県静岡市).

Tatsuya HAZUKU, Tomoji TAKAMASA, Tsuyoshi OODE, Etsuro SHIMIZU, Hiroyasu KIFUNE, Seiichi TAKEDA, New Type of Plug-In Electric Boat "RAICHO-S", International Symposium Underwater Technology 2013 (UT13), 平成25年3月7日, 東京大学(東京都目黒区).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

賞雅 寛而 (TAKAMASA, Tomoji)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号: 20134851

(2) 研究分担者

波津久 達也 (HAZUKU, Tatsuya)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号: 60334554

清水 悦郎 (SHIMIZU, Etsuro)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号: 60313384

木船 弘康 (KIFUNE, Hiroyasu)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号: 90323849

福原 豊 (FUKUHARA, Yutaka)
東京海洋大学・学術研究院・助手
研究者番号: 90361807