荒天時棧橋停泊のための可変ピッチプロペラ操船法の自動化に関する一考察

土 井 正 好*・永 本 和 寿**
出 縄 憲 一***・森 泰 親***

Consideration Regarding Automation of Controllable Pitch Propeller for Mooring Pier in Stormy Weather

Masayoshi DOI*, Kazuhisa NAGAMOTO**,
Kenichi IDENAWA*** and Yasuchika MORI***

The purpose of this study is a design of an automatic peering system with a Controllable Pitch Propeller (CPP) in the case of the stormy weather. A velocity response of CPP has a delay time. Especially, this study verifies the ship's propelling force against the CPP angle and detects the delay time by analyzing the data of the propelling force. The CPP angle is controlled by Generalized Minimum Variance Control (GMVC). This study arranges the GMVC for the automatic mooring system. The proposed GMVC has wind and a tidal effect's terms. The wind effect's term is considered by the ship's drift with the wind. The predicted wind velocity is calculated by the AR model of wind change. The AR model of wind is used for the GMVC of the peering system.

Key Words: predictive control, generalized minimum variance control, controllable pitch propeller, time delay, ARMA model

1. はじめに

台風などの強風下において船舶は棧橋を離れて海上沖に錨泊する^{1)~3)}。なぜなら、風圧によって係留索は負荷が掛かり破断するからである。しかしながら海上沖錨泊が十分に安全ではなく、錨が海底に噛まない走錨により海岸に座礁し燃料漏れなど環境を破壊する海難事故が多く報告されている。また離岸による錨泊は船舶運航者全員を昼夜拘束し、走錨の発生を常に監視する緊張が長時間伴う。また、多くの船舶が海上に輻輳しており、近傍船舶との衝突も心配される。さらには風向が変われば錨を入れ直し、風速によって錨鎖の長さも調整する。船舶エンジンについては常にスタンバイ状態であり、冷却清水ポンプ、潤滑油ポンプなどの補機運転の電力を賄うため発電機は多くの燃料を消費する。一方、海上に十分

な錨地の余裕がなく岸壁に退避した船舶については、係留策の本数を増し、船と岸壁間にはフェンダー (防舷材) を多く置いて強風に備える。

新たな操船法として、強風により係留索が引張られる方向に対して反対側の推進力を与え、係留索への負荷を軽減する操船法が試みられている。近年において係留索の材料強度が向上したことも本操船法の信頼性に繋がった。従来において船舶推進力の増減はエンジン回転数により調整した。一方、最近の船舶は可変ピッチプロペラ (Controllable Pitch Propeller)⁴⁾を搭載する。CPP 推進ではエンジン回転数を一定としてプロペラ翼角を可変とすることによって推進力が得られる。CPP は従来エンジンの回転数調整よりも速やかに推進力が得られる。よって、船舶への風圧を相殺するための棧橋停泊操船法は応答性のよい CPP 推進の船舶において可能である。しかしながら、風速・風向を見ながらそれに対応した CPP 翼角を調整することはベテラン操船者の経験と力量に頼る。もし、風速の急激な変化を見過ごしたならば、プロペラ推進によって係留索の負荷がかえって増大することとなる。そこで、本研究は強風下の棧橋停泊の CPP 翼角をその時々風の風速・風向を検知しながら自動で調整する制御系を設計する。ここで CPP 翼角推進は従来のエンジン回転数調整の推進よりも応答性に優れるものの、それでも CPP 翼角設定から推進が始まるまでに 10 秒程度のむだ時間を含むことを確認した⁵⁾。そこで本研究では、設計制御法として予測制御法の一つである一般化最小分散制御法 (Generalized Minimum

* 広島工業大学工学部 広島市佐伯区三宅 2-1-1

** 弓削商船高等専門学校
愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000 番地

*** 首都大学東京大学院システムデザイン研究科
日野市旭が丘 6-6

* Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology, 2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima

** Yuge National Maritime College, 1000 Yuge Shimoyuge, Kamishima-cho, Ochi-gun, Ehime

*** Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino

(Received December 27, 2011)

(Revised April 24, 2012)

Variance Control)^{6)~9)}を採用する．本研究で提案する制御系は，操作量を CPP 翼角度，制御量を船速とした ARMA (Auto Regressive Moving Average) モデルで表現する．風圧および潮流影響については操作端外乱として定義し，船体推進に及ぼす影響を ARMA モデル中に含める．なお，本研究では定位置制御でありながら変位 [m] を制御量とはしなかった．なぜなら，船体に風圧を受けて船速が発生することから運動エネルギーと仕事の関係 $\frac{1}{2}mv^2 = \mu Fs (0 < \mu < 1)$ より，船体速度を抑制する設計が係留索張力を抑える目的には効果的と考えたからである．なお s は係留索が緩んだ状態から風によって張るまでに船体が移動した距離， μ は船体抵抗を考慮して設定する値である．

一方，係留索張力を直接に制御量として扱わなかった理由は，係留索にロードセルを付設することが可能ではあるものの通常船舶に取り付けることはなく，運用上の取り扱いも困難となるからである．

本研究では実船舶の運動結果から収集したモデルについてまずは標準的な GMVC を適用した．しかしながら，むだ時間システムへの予測制御の制御効果が PID 制御よりも見込めるものの標準的な GMVC 構造のままでは問題が残ることを確認した．本研究では，GMVC の実船舶適用に当たっての複数課題を明確にし，解決を図る．ここで本研究の特徴を以下のように整理する．215.29358pt

- (1) 目標値を船速 0 とした予測制御系の設計
- (2) CPP 翼角推進の ARMA モデル表現
- (3) 風および潮流の外乱影響を ARMA モデルに含め外乱影響による船体運動の動特性表現を新たに構築
- (4) GMVC で用いる風速予測値を風速変化 AR モデルから算出
- (5) GMVC の風および潮流外乱項にサーボ系設計のためのフィルター Δ を設置

2. 研究内容

台風接近などの強風時において，船舶は係留索が強風により破断して漂流することを避けるため，桟橋から離れて海上沖で錨泊する¹⁰⁾．一方最近において，CPP 推進を用いて桟橋停泊を継続する操船法が試されている．**Fig. 1** は船舶が前進，停止，後進の推進力を得るための CPP 形態を示す．翼角調整時においてエンジン回転数は常に一定である．台風接近時の錨泊対応は主機関をスタンバイ状態で待機する．CPP 船では推進を与えずに翼角を中立状態として主機関回転をアイドリングに保つ．CPP 船はエンジンを一定回転数に保持したまま翼角調整によって推進力が柔軟に得られ，緊急の対応が可能である．すなわち，走錨状態や環境変化による錨泊法変更に対して即座に対応するためには，主機関をアイドリング状態で運転する．

Fig. 2 は練習船弓削丸が桟橋に係留索 1 本で留められた状

Fig. 1 Controllable pitch propellers

Fig. 2 Mooring load with CPP angle

Fig. 3 A setup to moor the ship to pier in the strong wind

態で CPP 翼角を前進に 1°, 2°, 3°, 4° の推進力を与えたときの係留索張力を計測した結果である．実験は Fig. 2 の 0 秒時点から徐々に CPP 翼角を 1~4° の指示値まで設定し，十分に係留索張力が最大値を示した状況で任意に CPP 翼角を 0° に戻す．Fig. 2 の結果から，係留索の安全許容張力が 20 kN であることから CPP 翼角 4° では最大で 24 kN と許容張力を超えてしまう．ちなみに CPP 翼角 4° では船速 2.67 m/sec の推進が得られることから，強風や潮流によって船速 2.67 m/sec 以上で流されたならば係留索が破断する恐れが考えられる．

桟橋停泊保持のための CPP 操船法とは，柔軟な増減速調整が可能な CPP によって風や潮流に対抗した推進力を適宜与え係留索に張力をかけない方法である．強風時における CPP 桟橋停泊法を **Fig. 3** に示す．しかしながら，CPP 翼角設定による船速効果は遅れて現われる．このため，プロペラ翼角設定後 10 秒程度遅れて推進力が得られる⁵⁾．このとき，操船者はプロペラの応答遅れを考慮して翼角を設定することから，熟練した経験が必要とする．本研究は CPP 桟橋停泊法に着目して，従来の操船者判断による CPP 翼角設定における長時間にわたる気象観測および CPP 翼角判断の負担を軽減する．まず，制御系設計の前提として，CPP 翼角設定とそれによって作られる船速の時間応答を計測し ARMA モデルを設計する．ここで，CPP 翼角設定に対する応答遅れである「むだ時間」を特定する．一方，強風が船体に吹きつけることによって船体は流される．このとき，風による船体移動を止めるため係留索には張力が働き，張力が大き過ぎると係留索

Fig. 4 Closed control system of CPP propelling with GMVC

Fig. 5 Components of wind pressure

は破断する。本研究の操船法は、強風により流される方向に対して反対側のプロペラ推進力を与えることにより係留索張力を軽減させている。つぎに、むだ時間システムに対して有効な予測制御法である GMVC を本制御対象モデルに対して適用する。本研究では、提案する GMVC 翼角制御系のむだ時間遅れ対処と応答性についてシミュレーション上で比較検証する。

Fig. 4 は、GMVC を CPP 操船に適用した場合の制御系を示す。航海法規などの制約により全自動操船は現実的ではない。そこで、GMVC 計算値を操船者が参照しながら CPP 翼角を設定するアシスト操船方式を構想する。

3. プロペラ効果と風の影響

3.1 CPP のプロペラ推進効果

制御対象は、プロペラによって発生する推進力である。ただし、翼角は大型モータによって作動するため、設定した翼角に到達するまで数秒間かかる。すなわち、CPP の翼角は急激に変化できない。このため、推進速度は翼角設定後遅れて応答する。この速度応答の遅れをシステムのむだ時間として扱う。

3.2 風影響解析

船舶は係留や錨泊しないと風により漂流する。特に受風面積の大きい大型タンカーやフェリーは風圧による影響が大きい¹¹⁾。その結果、強風下の出入港時において、機関推進力および舵を使った操船が困難となる。このため、操船者は強風時においてタグボートの支援を受ける。一般的に風圧は次式のように表わされる¹⁾。

$$R = \frac{1}{2} \rho C (A \cos^2 \phi + B \sin^2 \phi) v^2. \quad (1)$$

ここで R は風圧 [N/m²]、 ρ は空気密度 [0.125 kg/m³]、 C は風向 ϕ に関する係数、 v は風速 [m/sec] を表わす。Fig. 5 は風圧状況を示す。

4. 制御対象の表現と問題の設定

CPP 推進の基本システムは、CPP 翼角設定によって発生

する船速によって表わされる。さらに実際の海上において、風と潮流の影響を考慮する必要がある。すなわち、制御対象は多入力一出力系である。制御対象をつぎの ARMA モデル¹²⁾により表わす。

$$\begin{aligned} A(q^{-1})y(k) &= q^{-j} B_{cpp}(q^{-1})u_{cpp}(k) \\ &\quad + W_c d_{wind}(k) + d_{tidal}(k) + \xi(k), \quad (2) \\ A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}, \\ B_{cpp}(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}. \end{aligned}$$

ここで、 $u_{cpp}(k)$ は CPP 翼角 [°]、制御対象への入力を意味する。また、 $y(k)$ は船速 [m/sec] を表わし、制御対象の出力を意味する。一方、潮流速および風影響 [m/sec] は可観測外乱として扱い、風影響 $d_{wind}(k)$ 、潮流影響 $d_{tidal}(k)$ として定義する。風影響は動特性ではあるが、ARMA モデルの係数表現を時刻 k における風速に対する一定影響値 W_c の表記とする。風影響係数 W_c の算出については 6.2 節で詳しく解説する。なお、潮流速は船体をそのまま漂流させる作用があるためモデル係数表現の必要はない。 q^{-1} は時刻を 1 ステップ過去に推移させる時刻推移作用素、 q^{-j} は CPP 推進におけるむだ時間を表わす。 $\xi(k)$ は平均値 0、分散 σ^2 の白色雑音である。制御系は観測した風影響および潮流を打ち消しながら、停船のための目標値船速 0 へ追従するための CPP 翼角を制御する。

本研究で用いる制御対象表現の ARMA モデルは、制御対象の運動をニュートン力学に基づく物理モデルで表わした運動方程式とは大きく異なる。本研究で採用する自己回帰分散平均 (ARMA) モデルは、入力に対する出力の時系列関係を時刻シフト要素 q^{-1} の多項式によって係数表現しており、式誤差モデルに分類される。すなわち、ARMA モデルでは質量やモーメントといった物理量を入出力以外では加味しない。さらに、本研究で適用する GMVC は ARMA モデルなどの式誤差モデルで表現しないと制御則を設計できない。

5. CPP 推進および風影響モデルのオフライン同定

プロペラ推力の物理的なオープン特性は、エンジン回転数を変化させて船速を調整する旧来の船舶では、

(1) テレグラフ指令 → (2) 対応エンジン回転数 → (3) 固定翼角 + プロペラ回転数 → (4) プロペラ推力 → (5) 慣性力 + 波浪など船体抵抗 → (6) 対水船速 → (7) (+潮流) → (8) 対地船速の過程を経て船速が得られる。一方、CPP 船については、

(1) テレグラフ指令 → (2) 対応プロペラ翼角指示 → (3) 対応プロペラ翼角追従 + 固定プロペラ回転数 → (4) プロペラ推力 → (5) 慣性力 + 波浪など船体抵抗 → (6) 対水船速 → (7) (+潮流) → (8) 対地船速

のように表わされる。なおテレグラフ指令とは、「Half Ahead」や「Dead Slow Ahead」といった船舶運航者が一般的に用いる船速指示を意味する。

本研究における ARMA モデル (2) 式の同定は参考文献 13) を参照した. ARMA モデルのパラメーター $A(q^{-1})$ および $B(q^{-1})$ を次式のように表わす.

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m]^T. \quad (3)$$

ここで, θ はパラメータベクトルとして定義する. 一方, 回帰ベクトル $\varphi(k)$ は,

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), \\ u(k-1), \dots, u(k-m)]^T, \quad (4)$$

つぎに, 出力 $y(k)$ を次式のように表わす.

$$y(k) = \theta^T \varphi(k) + \xi(k). \quad (5)$$

むだ時間無の 1 ステップ予測器を次式のように表わす.

$$\hat{y}(k+1) = [1 - A(q^{-1})]y(k+1) + B(q^{-1})u(k) \\ = \theta^T \varphi(k). \quad (6)$$

制御対象のむだ時間は本章の実験結果より特定する. つぎに, 推定パラメータの評価規準を $J_N(\theta)$ として表わす.

$$J_N(\theta) = 1/N \sum_{k=1}^N l(k, \theta, \varepsilon(k, \theta)). \quad (7)$$

ここで, $l(k, \theta, \varepsilon(k, \theta))$ は予測誤差を計測するためのスカラー関数である. よって, 予測誤差は次式によって算出する.

$$\varepsilon(k, \theta) = y(k) - \hat{y}(k | \theta). \quad (8)$$

未知パラメータの推定値は次式によって算出する.

$$\hat{\theta}(N) = \operatorname{argmin} J_N(\theta). \quad (9)$$

システムの雑音を白色雑音として, 関数

$$l(k, \theta, \varepsilon(k, \theta)) = \varepsilon^2(k, \theta), \quad (10)$$

を導出する. このとき, 評価規準 $J_N(\theta)$ は,

$$J_N(\theta) = 1/N \sum_{k=1}^N \varepsilon^2(k, \theta) \\ = 1/N \sum_{k=1}^N \{y(k) - \theta^T \varphi(k)\}^2, \quad (11)$$

と表わされる. さらに, 評価規準 $J_N(\theta)$ を

$$J_N(\theta) = c(N) - 2\theta^T f(N) + \theta^T R(N) \theta, \quad (12)$$

のように変形する. ここで, (12) 式の $R(N)$, $f(N)$, $c(N)$ は,

$$R(N) = 1/N \sum_{k=1}^N \varphi(k) \varphi^T(k), \\ f(N) = 1/N \sum_{k=1}^N y(k) \varphi^T(k), \\ c(N) = 1/N \sum_{k=1}^N y^2(k), \quad (13)$$

のように表わされる. (12) 式の J_N を微分し, 0 に設定すると,

$$R(N) \hat{\theta}(N) = f(N), \quad (14)$$

が得られる. よって, システムパラメータはオフライン最小分散法によって推定され, 次式を導出する.

$$\hat{\theta}(N) = R^{-1}(N) f(N). \quad (15)$$

6. 船体運動モデル設計のための実験結果

6.1 CPP 推進

実験は CPP 推進のむだ時間を特定するため, 前進および後進について, CPP 翼角変化に対する速度応答を計測する. 計測値のサンプリング周期は 1 秒である. 実験は Fig. 6 の弓削商船高専練習船「弓削丸 (総トン数 240 トン)」を使用した. 弓削丸は船体運動解析に必要な CPP 設定角および船体速度データを毎秒計測できる仕様となっている.

CPP 推進の計測方法は以下の手順で行なう.

- (1) 実験はプロペラによる推進効果を正確に測るために無潮流下で行なう.
- (2) 前進, 後進について $0 \sim 5^\circ$ の CPP 翼角を 0.5° 刻みで設定する.
- (3) 各設定翼角値に対して応答する船速を計測する.
- (4) 船速応答のむだ時間を検証する.

データは 2008 年 10 月および 2009 年 7 月に計測した.

Fig. 7 および Fig. 8 は前進 CPP 翼角 3° に着目した結果を示す.

ここで Fig. 7 は入力である CPP 翼角の時間変化を示し,

Fig. 6 Training ship "Yugemaru"

Fig. 7 Angle change of CPP (ahead 3 degrees)

Fig. 8 Velocity responses (ahead 3 degrees)

Table 1 Coefficients of ARMA model regarding CPP propelling

CPP [deg]	a_1	a_2	b_0	Arrival Velocity [m/s]
0.5	-1.95	0.9506	0.00045	0.38
1.0	-1.95	0.9506	0.00046	0.75
1.5	-1.95	0.9506	0.00046	1.13
2.0	-1.95	0.9506	0.00046	1.51
2.5	-0.6398	-0.3448	0.0115	1.88
3.0	-0.6398	-0.3448	0.012	2.26
3.5	-0.6398	-0.3448	0.011	2.47
4.0	-0.7493	-0.2284	0.015	2.67
4.5	-0.7493	-0.2284	0.014	2.88
5.0	-0.7493	-0.2284	0.0144	3.08

Fig. 8 は出力である船速の時間変化である. Fig. 7 および Fig. 8 の結果より, 船速について CPP 翼角設定時から約 10 秒程度の無反応時間が存在する. 以上のむだ時間の存在は, そのほかの CPP 翼角設定 $0.5 \sim 5.0^\circ$ においても同様に確認された.

ARMA モデル (2) 式の係数 $A(q^{-1})$ および $B(q^{-1})$ は入力データ $u(k)$ および出力データ $y(k)$ としての航海情報を計算することによって同定される. CPP 翼角 2.5° 設定の時間応答結果から ARMA モデル (2) 式の係数を次式のように推定した.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 - 0.6398q^{-1} - 0.3448q^{-2}, \\ B_{cpp}(q^{-1}) &= 0.0115. \end{aligned} \quad (16)$$

Table 1 は, CPP 翼角設定 $0.5 \sim 5.0^\circ$ について 0.5° 刻みの ARMA モデル係数を示す.

GMVC に用いる ARMA モデル係数は, 風に対抗する CPP 設定角度によって変更する. 一般的に, 風は数十秒の間隔で周期的に変動する. そこで制御対象は, 変動する風速の平均値に対抗する CPP 翼角度度についての ARMA モデル係数を採用するゲインスケジューリング方式とする. たとえば, 風速が $8 \sim 16$ m/sec で変動している場合の平均値は 12 m/sec であり, 風速 12 m/sec に対抗する CPP 翼角度度は次節の解析および Table 1 から CPP1.5 $^\circ$ の ARMA モデル係数を用いる.

実際の棧橋においては潮流の影響があり (2) 式の $d_{tidal}(k)$

Fig. 9 A locus of ship's drifting

として検出が必要である. 船首尾方向の潮流影響 $d_{tidal}(k)$ は計測される船舶の対水船速値および対地船速値より, 「対水船速 - 対地船速」から導出できる. ARMA モデル (2) 式は船首尾方向の運動であるため潮流方向に影響されない.

6.2 風の影響

つぎに, 風影響の計測を以下の手順で行なう.

- (1) CPP 翼角を 0, すなわち推進無とする.
- (2) GPS 情報から海上における漂流軌跡および漂流速を計測する.
- (3) 風影響を検証する.

Fig. 9 は風による漂流軌跡を示す. 実験は東経 $133^\circ 15'$, 北緯 $34^\circ 5'$ において推進無により実施した. 潮流無の状況において, 風速が $6 \sim 7$ m/sec, 風向が東から北風へ約 25 分間で変化した状況で漂流した結果である. 図は各時刻における船体方向と風の向きを表わし, 船図下の記載は船首方位 [$^\circ$] と計測時刻 [$^\circ$], [$''$] を示す. 海図は緯度, 経度共に mile で表示され, 0.1 の目盛は 0.1 mile = 185.2 m を表わす.

よって実験結果から, 風速 6 m/sec において船体は 0.6 m/sec 一定速で漂流することが確認された. また, 停止状態から一定の漂流速 0.6 m/sec に到達するまでに 150 秒程度の時間がかかる. 以上の結果から ARMA モデルの風影響に係る係数 W_c は

$$W_c = \frac{1}{645}, \quad (17)$$

より導出する. ここで W_c は風漂流速を算出するための船型依存係数として新たに定義する. (17) 式中の $W_c = 1/645$ は, Fig. 9 の実験において風速 6 m/sec において 150 秒程度かけて船速 0.6 m/sec に達する結果から導出した. そのほかの風速に対する漂流速も, 運動量保存則より (17) 式におおむね従うことを航海実験より確認している. なお, (17) 式中の $W_c = 1/645$ は, 弓削丸について導出した値である. 船型の異なる船舶であっても漂流速を計測することによって, 各船舶に適合した W_c 値を算出することが可能であり, 多様な船舶への (17) 式の適用が期待される.

7. CPP 翼角制御のための一般化最小分散制御 (GMVC)

CPP 翼角設定による船速応答の制御対象にはむだ時間が存在する．そこで，本研究ではむだ時間システムに対して有効な予測制御法の一つである一般化最小分散制御 (GMVC) を適用する．GMVC は予測制御法の中でも比較的簡単な制御構造からなる．本章では，GMVC を本研究の制御対象である CPP 翼角制御系に適用可能な制御構造へ改良する．まず，GMVC の制御則は次式の評価関数を最小化することによって導出される．

$$J = E\{h(k+j)^2\}. \quad (18)$$

ここで， $h(k+j)$ は一般化出力と定義され，次式により構成される．

$$\begin{aligned} h(k+j) &= P(q^{-1})y(k+j) - R(q^{-1})w(k+j) \\ &\quad + S(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k) \end{aligned} \quad (19)$$

$$P(q^{-1}) = 1 + p_1q^{-1} + \cdots + p_{n_p}q^{-n_p},$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1q^{-1} + \cdots + r_{n_r}q^{-n_r},$$

$$S(q^{-1}) = s_0 + s_1q^{-1} + \cdots + s_{n_s}q^{-n_s}.$$

ここで， $w(k)$ は目標値である設定する CPP 翼角である．多項式 $P(q^{-1})$ ， $R(q^{-1})$ ， $S(q^{-1})$ は評価関数中の重みである．なお，フィルタ Δ は $\Delta = 1 - q^{-1}$ からなる．GMVC 制御則は評価関数 $J = E\{h(k+j)^2\}$ の分散を最小化することによって導出される．しかしながら，一般化出力 (19) 式中の出力 $y(k+j)$ は現在時刻 k において観測できないので予測する必要がある．そこで，Diophantine 方程式

$$\begin{aligned} P(q^{-1}) &= E(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F(q^{-1}), \quad (20) \\ E(q^{-1}) &= 1 + e_1q^{-1} + \cdots + e_{j-1}q^{-(j-1)}, \\ F(q^{-1}) &= f_0 + f_1q^{-1} + \cdots + f_hq^{-h}, \end{aligned}$$

を定義し，一意解 $E(q^{-1})$ および $F(q^{-1})$ を算出する．ここで，(19) 式および (20) 式中の Δ は目標値変化および操作端外乱の印加に対して，サーボ系を満足するために必要な設定である． Δ を組み込まない標準的な GMVC では目標値追従および外乱の印加によってオフセットを残す¹⁴⁾．

(19) 式中の $P(q^{-1})y(k+j)$ は Diophantine 方程式 (20) 式を適用することにより次式となる．

$$\begin{aligned} P(q^{-1})y(k+j) &= E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k) + F(q^{-1})y(k) \\ &\quad + \Delta E(q^{-1})W_c d_{wind}(k+j) + \Delta E(q^{-1})d_{tidal}(k+j) \\ &\quad + \Delta E(q^{-1})\xi(k+j). \end{aligned} \quad (21)$$

一般化出力 (19) に (21) 式を代入することによって，評価関数は次式のように表わされる．

Fig. 10 Block diagram of closed loop system with proposed GMVC

$$\begin{aligned} J &= \mathbf{E}[\{E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k) + F(q^{-1})y(k) \\ &\quad + \Delta E(q^{-1})W_c d_{wind}(k+j) + \Delta E(q^{-1})d_{tidal}(k+j) \\ &\quad - R(q^{-1})w(k+j) + S(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k) \\ &\quad + \Delta E(q^{-1})\xi(k+j)\}^2]. \end{aligned} \quad (22)$$

評価関数 (22) 式中の可観測データを一般化予測出力 $\hat{h}(k+j | k)$ としてまとめると，

$$J = \mathbf{E}[\{\hat{h}(k+j | k) + \Delta E(q^{-1})\xi(k+j)\}^2], \quad (23)$$

となる．ここで，一般化予測出力 $\hat{h}(k+j | k)$ は，

$$\begin{aligned} \hat{h}(k+j | k) &= E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k) + F(q^{-1})y(k) \\ &\quad + \Delta E(q^{-1})W_c d_{wind}(k+j) + \Delta E(q^{-1})d_{tidal}(k+j) \\ &\quad - R(q^{-1})w(k+j) + S(q^{-1})\Delta u_{cpp}(k), \end{aligned} \quad (24)$$

より構成される．以上より， $\hat{h}(k+j | k) = 0$ として最小化することによって，CPP 翼角制御のためのサーボ型 GMVC 制御則 (25) 式

$$\begin{aligned} \{E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1}) + S(q^{-1})\}\Delta u_{cpp}(k) &= R(q^{-1})w(k+j) - F(q^{-1})y(k) \\ &\quad - \Delta E(q^{-1})\{W_c d_{wind}(k+j) + d_{tidal}(k+j)\}, \end{aligned} \quad (25)$$

を導出する．

設計した GMVC により閉ループ系を構成したときのブロック図を Fig. 10 に示す．

8. 予測風速の算出

導出した GMVC(25) 式は，このままの状態では算出できない．なぜなら，GMVC(25) 式中の $d_{wind}(k+j)$ および $d_{tidal}(k+j)$ は未来値だからである．潮流速については，数十分単位で徐々に変化するため CPP のむだ時間未来値 $d_{tidal}(k+j)$ の代わりに現在値 $d_{tidal}(k)$ を用いても支障はない．一方，風については数十秒単位で周期的に速度が変動することを日常的に経験している．Fig. 11 は，2011 年 7 月 19 日の 11:30～40 において台風 6 号接近時の風速変化を弓削商船高専棧橋で計測した結果である．完全に同一ではないものの，約 100 秒周期で風速 12～22 m/sec の範囲で上下していることがわかる．

Fig. 11 Change of strong wind (typhoon No.6, 11:30~40, July 19, 2011)

そこで本研究は, CPP 推進のむだ時間先風速値 $d_{wind}(k+j)$ を AR モデルから予測値算出する¹⁵⁾. 変動する風速変化を AR モデル

$$G(q^{-1})d_{wind}(k) = e(k), \quad (26)$$

として表わす. $e(k)$ は白色雑音, $G(q^{-1})$ は q^{-1} の多項式である. これより j ステップ先の風速値は,

$$d_{wind}(k+j) = N(q^{-1})d_{wind}(k) + M(q^{-1})e(k+j), \quad (27)$$

より与えられる. ここで $M(q^{-1}), N(q^{-1})$ はつぎの Diophantine 方程式

$$1 = G(q^{-1})M(q^{-1}) + q^{-j}N(q^{-1}), \quad (28)$$

$$M(q^{-1}) = 1 + m_1q^{-1} + \dots + m_{j-1}q^{-(j-1)},$$

$$N(q^{-1}) = n_0 + n_1q^{-1} + \dots + n_{ng}q^{-ng},$$

によって一意に算出される. ここで $G(q^{-1})$ の係数 $\{g_1, g_2, \dots, g_{ng}\}$ は評価関数 $J = E\{e(k)^2\}$ を最小化することで導出する. よって j ステップ先の風速予測値は,

$$\hat{d}_{wind}(k+j) = N(q^{-1})d(k), \quad (29)$$

より算出できる.

これより, GMVC(25) 式は風速予測値 $\hat{d}_{wind}(k+j)$ を用いた次式

$$\begin{aligned} & \{E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1}) + S(q^{-1})\}\Delta u_{cpp}(k) \\ &= R(q^{-1})w(k+j) - F(q^{-1})y(k) \\ & \quad - E(q^{-1})\{W_c\hat{d}_{wind}(k+j) + d_{tidal}(k)\}, \quad (30) \end{aligned}$$

により計算する. なお, (30) 式において潮流値は $d_{tidal}(k+j)$ の代わりに $d_{tidal}(k)$ を用いる.

9. CPP 翼角制御のシミュレーション

本研究で提案する GMVC の応答性についてシミュレーションで検証する. シミュレーションは 8 章の風速変化の实例 Fig. 11 を参考にして, 風速が 12~22 m/sec の範囲で 100 秒周期の正弦波で変動すると仮定する. この状況において風速平均値は 17 m/sec である. 風速 17 m/sec において漂流

Fig. 12 Ship's velocity with wind (17 m/sec)

Fig. 13 CPP control with GMVC

速は 1.7 m/sec まで到達することから, 風に対抗するための CPP 翼角度は Table 1 より CPP2.5° が妥当である. よって, シミュレーションにおける CPP の ARMA モデル係数は Table 1 の CPP2.5° を適用する. サンプル周期は 1 秒である. CPP 推進におけるむだ時間は 6.1 節の検討より 10 ステップとする.

GMVC に用いる風速予測値は,

$$\hat{d}_{wind}(k+10) = n_0d(k) + n_1d(k-1), \quad (31)$$

より得られる.

9.1 GMVC による翼角制御

Fig. 12 は, 船舶前方から強風 (12~22 m/sec, 100 秒周期) が吹いた場合の漂流速を示す. 実線が制御量である船速 (m/sec), 破線が操作量である CPP 翼角 (°) を示す.

Fig. 12 より, CPP 翼角は常に入力無の 0 を設定すると船速 1.8 m/sec まで漂流することがわかる. 漂流速 1.8 m/sec では係留索の張力は 6 kN まで増加する. 実験に用いた係留索の許容張力は 20 kN までなので安全範囲ではあるが, さらなる強風域では許容限界まで張力が上昇することが考えられる. そこで CPP 翼角制御法によって漂流速を抑える.

Fig. 13 および Fig. 14 は CPP 翼角制御に GMVC を適用した結果である. Fig. 13 が操作量である CPP 翼角, Fig. 14 が制御量である船速の時間応答結果を示す. Fig. 13 および Fig. 14 は操作量重み $Q = 0, Q = 0.5, Q = 30$ の結果を比較

Fig. 14 Velocity with GMVC

Fig. 15 Velocity with PID and GMVC

する. GMVC の操作量重み $Q = 0.5$ は実線で示され, 船速が 0.2 m/sec まで抑えられている. 点線の操作量重み $Q = 0$ では, 船速を 0.1 m/sec まで抑えるものの CPP 翼角が最高で 20.7° を指示するため現実には適用できない. 一方, 一点鎖線の操作量重み $Q = 30$ では, 操作量重みが大き過ぎるために船速抑制効果が得られず, 船速は 0.7 m/sec までしか抑えられない. これより, 本制御対象では操作量重み $Q = 0.5$ が最も応答性が良く, 船速も 0.2 m/sec 以下に抑えることを確認した. なお, Fig. 13 および Fig. 14 の丸点線は, GMVC(25) 式の風速項および潮流項についてサーボ系に構成しなかった場合,

$$\begin{aligned} & \{E(q^{-1})B_{cpp}(q^{-1}) + S(q^{-1})\}\Delta u_{cpp}(k) \\ &= R(q^{-1})w(k+j) - F(q^{-1})y(k) \\ & \quad - E(q^{-1})\{W_{cd}d_{wind}(k+j) + d_{tidal}(k+j)\}, \end{aligned} \quad (32)$$

のシミュレーション結果を示す.

Fig. 14 の結果から, 風速項や潮流項についてサーボ系を構成しないとオフセットが残る.

9.2 PID 制御との比較

強風時桟橋停泊のための GMVC 翼角制御法について, PID 制御を適用した. PID 制御適用の条件を以下に示す.

- (1) リアルタイムに制御量と目標値 (0 m/sec) 追従誤差をなくすフィードバック制御である.
- (2) 風は外乱として捉え, むだ時間先の風速予測を行なう.
- (3) 最適な PID 係数は試行錯誤的に導出する.

以上の条件より, PID 制御のゲインは $K_d = 2.5874$, $K_p = 0.2526$, $K_i = 0.0247$ とする. 適用する PID 制御について 1 次遅れ系で近似すると時定数は約 100 sec である. 一方, GMVC は操作量重み $Q = 0.5$ に設定する. 風速は 9.1 節のシミュレーション条件と同様に 100 sec 周期 $12 \sim 22 \text{ m/sec}$ で変化する. Fig. 15 は桟橋停泊のための CPP 翼角制御について, 提案 GMVC と PID 制御を適用した場合の制御量比較を示す. 実線が GMVC, 点線が PID の結果である.

Fig. 15 の結果より, GMVC が 0.2 m/sec まで船速を抑制

したのに対して, PID 制御は 0.8 m/sec しか抑えられない. これより, 提案 GMVC は PID 制御よりも船速を抑えることを確認した.

10. おわりに

本研究では, CPP 翼角による船速応答の関係を ARMA モデルとして表現し, 船体運動の実測値よりモデル推定を行なった. 実験結果より, CPP の船速応答には明確なむだ時間が存在することを確認した. また, 風影響による船体漂流速度を計測し, 風速値に対する漂流速度の関係を明らかにし, CPP 推進の ARMA モデル上で表現した. つぎに, 制御対象をむだ時間システムとして捉え, 風に対して船体漂流を抑える CPP 翼角制御のための GMVC 制御系を設計した. なお, 設計 GMVC ではむだ時間先の風速値を用いるため, 風速変化 AR モデルから風速予測値を算出した. 最後に, シミュレーションにより GMVC を適用した桟橋停泊のための CPP 翼角制御法は, PID 制御よりも応答性を改善することを確認した.

今後は, 台風などの強風時において桟橋停泊実験を行ない, マニュアル操船における係留索張力をロードセルにより計測する. 続いて, 強風時において自動的に係留索張力を抑えることを目標として, GMVC 算出による CPP 翼角値に従った操船を検証し, 提案法の実用性を向上させる. さらに船型の異なる船舶について, 運動のモデル化と提案 GMVC の制御効果を比較検証する.

謝辞 本研究は造船学術研究推進機構 (REDAS) の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) 本田啓之輔: 操船通論, 成山堂 (2005)
- 2) 岩井 聡: 操船論, 海分堂 (1977)
- 3) 横田利雄: 船舶運用法, 海分堂 (1966)
- 4) KAMOME PROPELLER Co Ltd. (1961)
- 5) M. Doi, T. Takehira, K. Nagamoto and Y. Mori: Delay Time of Propelling Force with Ship's Controllable Pitch Propeller (CPP), ICCAS-SICE2009, 551/554 (2009)
- 6) 土井, 神谷, 森: 一般化最小分散制御のロバスト漸近追従特性に関する一考察, 電気学会 C 部門論文誌, **119**-C11, 1420/1426 (1999)
- 7) P.E. Wellstead and M.B. Zarrop: *Self-Tuning Systems*,

- John Wiley & Sons Ltd. (1991)
- 8) D.W. Clarke and P.J. Gawthrop: Self-Tuning Control, IEE Proc., **120D**-6, 633/640 (1979)
 - 9) D.W. Clarke, C. Mohdadi and P.S. Tufts: Generalized Predictive Control, Automatica, **23**-2, 137/160 (1987)
 - 10) 高橋福治: 大型カーフェリーの操船・風との対話, 日本マリンエンジニアリング学会誌, **42**-1, 111/116 (2007)
 - 11) 藤野, 不破: 外力下の操縦運動, 日本造船学会第3回操縦性シンポジウム, 177/211 (1981)
 - 12) 大津, 長谷川: オートパイロットの評価と展望, 日本造船学会第3回操縦性シンポジウム, 243/280 (1981)
 - 13) 足立修一: Matlabによる制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 (1996)
 - 14) 土井, 中内, 森: 一般化最小分散制御における内部モデル原理に基づくサーボ系設計, 電気学会 C 部門論文誌, **119**-C4, 496/501 (1999)
 - 15) T. Kamiya, M. Doi, H. Mochiyama and Y. Mori: Visual Tracking for References Generated by a Stochastic Model, Asian Journal of Control, **5**-3, 437/444 (2003)

=====

[著 者 紹 介]

土 井 正 好 (正会員)

1991年弓削商船高専機関学科卒業。94年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学課程卒業。96年防衛庁入庁, 研究職技官として航空機開発に従事。99年防衛大学校理工学研究科機械工学専攻修了。2003年慶應義塾大学大学院理工学研究科へ論文提出による学位授与(博士(工学))。2007年舞鶴工業高専機械工学科准教授, 2010年広島工業大学工学部知能機械工学科准教授, 現在に至る。ビークル制御の研究に従事。

永 本 和 寿

1982年大島商船高専航海学科卒業。83年日水船舶(株)航海士。91年運輸省海技大学校七尾分校教諭。92年口之津海上技術学校教諭。2005年弓削商船高専弓削丸一等航海士, 現在に至る。船舶操船アシスト制御法の研究に従事。

出 縄 憲 一

2010年中央大学理工学部精密機械工学科卒業。2012年首都大学東京大学院システムデザイン研究科修了, 現在に至る。船舶運動性に係る制御系設計の研究に従事。

森 泰 親 (正会員・フェロー)

1976年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。81年同大学院博士課程修了(工学博士)。99年防衛大学校精密機械工学科教授, 2003年東京都立科学技術大学電子システム工学科教授, 2005年首都大学東京大学院システムデザイン研究科教授, 現在に至る。デジタル制御系設計の研究に従事。

=====