

非線形計画法による最短時間操船の変針問題への応用 (続報)

—実船への適用—

学生員 杉田浩士* 正員 長谷川 和彦**
正員 若林伸和***

Application of Minimum Time Manoeuvring by NLP Method to Course Changing Problem (Continued)
—Application to Real Ship—

by Koji Sugita, *Student Member* Kazuhiko Hasegawa, *Member*
Nobukazu Wakabayashi, *Member*

Key Words: *Optimisation, Real ship experiment, Wind effect, Autopilot*

1. 緒言

船舶の操縦性能はその大きさや船型、海象条件などによって異なるため、その特徴を事前に知っておくことが重要といえるが、操船は操船者の経験によって培われるところが大きい。そこで著者らおよび大津は前報¹⁾において、それを補う指標としての合理的な操船方法を求めるため、最適化法の一つである非線形計画法を用いた。そして、最適化する対象を操船にかかる時間とした最短時間操船問題を変針操船を対象として解いた。

本研究では、前報で検討した航行範囲に関する制約条件を用いて最適化計算を行い、その結果を実船実験で検証した。

2. 最適化計算について

本研究では、数理計画法の一つである非線形計画法により操船にかかる時間を最適化（最短化）する。ここではこのような問題を最短時間操船問題と呼ぶ。

2.1 最短時間操船問題

最適制御問題は以下のように定式化できる^{2),3),4)}。

$$\text{状態方程式: } \dot{\mathbf{x}}(\tau) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \mathbf{p}, \tau] \quad (1)$$

$$\text{初期条件: } \varphi_0[\mathbf{x}(0), \mathbf{u}(0), \mathbf{p}, \tau = 0] = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\text{終端条件: } \varphi_f[\mathbf{x}(1), \mathbf{u}(1), \mathbf{p}, \tau = 1] = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\text{経路途中での制約条件: } \mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \tau) \leq \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \tau) = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\text{評価(目的)関数: } J = \varphi[\mathbf{x}(1)] + \int_0^1 L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \tau) d\tau \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ は状態変数と制御変数とともに時間 t の関数であり、 \mathbf{p} は時間の関数ではない最適化すべき変数とする。また、(6)式中の φ は終端時刻 t_f における到達度を評価する関数である。太字で表わした記号はベクトルを意味する。なお、最短時間操船問題では終端時間 t_f が未知であるため、

(7)式のように時間 t を終端時間で正規化した τ を用いている。

$$\tau = \frac{t}{t_f} \quad (7)$$

最短時間操船問題では、目的関数は $J = t_f$ 、制御変数 \mathbf{u} は舵角、そして制約条件は限界舵角や目的地、目標変針角などである。また、未知ベクトル \mathbf{p} には終端時間 t_f が含まれる。

非線形計画法を用いて最短時間操船問題を解く場合には、時間軸を要素に分割し、状態変数、制御変数、および終端時間の初期値をもとに状態方程式を積分することで各時間節点での状態量を求める。その後、同様の計算が繰り返される過程で制御変数および終端時間は更新され、最適解が導かれる。

2.2 航路に関する制約条件

後述する最適化計算では上述のような制約条件に加えて、航路に関して次のような制約条件を与える。すなわち、Fig. 1 に示したように船と航路線との時々刻々の距離 $|g_1|_k$, $|g_2|_k$ の合計量を制限するものである。なお、添え字の 1, 2 は変針点 WP_1 の前と後を表わし、 k は初期点から k 番目の地点であることを表わす。この制約により現実の操船方法に近い形で変針問題の最適化が可能になることが前報¹⁾で示されている。

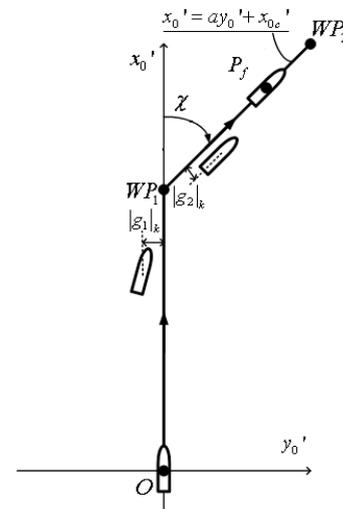


Fig. 1 Path line of a ship

* 大阪大学大学院工学研究科 (研究当時)

** 大阪大学大学院工学研究科

*** 神戸大学大学院海事科学研究科

原稿受付 平成 24 年 4 月 6 日

春季講演会において講演 平成 24 年 5 月 17, 18 日

©日本船舶海洋工学会

3. 操縦運動モデルと対象船

操縦運動を表すための座標系を Fig. 2 に示す. 風向 ψ_W は反時計まわりを正とする. なお Fig. 2 中の記号は 2 章で用いたものと一部重複するがこれらは別のものとし, これらの記号は以降では断りがない限り, 本章で扱う方の意味で用いる.

前章の状態方程式にあたる操縦運動方程式には(8), (9)式に示すように MMG モデルを用いる. 対象船は神戸大学海事科学部附属練習船「深江丸」とした. 主要目を Table 1, 横投影図等を Fig. 3 に示す. 係数は前田による解析結果⁵⁾を用いた. 風圧力は藤原らによる方法⁶⁾を用いて(10)式のように算出した.

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X_H + X_P + X_R + X_W \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur &= Y_{HP} + Y_R + Y_W \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N_{HP} + N_R + N_W \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X_H &= R + X_{vr}vr \quad (R < 0) \\ X_P &= (1 - t)T \\ X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_{HP} &= Y_vv + Y_r r + Y_{vv}v|v| + Y_{vr}v|r| + Y_{rr}r|r| \\ Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_{HP} &= N_vv + N_r r + N_{rr}r|r| + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \quad ((x_R + a_H x_H)は負の値) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} X_W &= \frac{1}{2}\rho A_T C_X(\psi_{WA})U_{WA}^2 \\ Y_W &= \frac{1}{2}\rho A_L C_Y(\psi_{WA})U_{WA}^2 \\ N_W &= \frac{1}{2}\rho L A_L C_N(\psi_{WA})U_{WA}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, (8)式の第 1 式から 3 式はそれぞれ船体前後方向, 横方向, 回頭方向の運動方程式を表す. また, m は質量, I_{zz} は慣性モーメント, u, v は前後方向と横方向の船速, r は回頭角速度, 記号($\dot{\quad}$)は時間微分を表す. X, Y, N はそれぞれ船体前後方向, 横方向, 回頭方向の流体力を, 添え字の H, P, R, W はそれぞれ船体, プロペラ, 舵, 風に関する流体力であることを表わす. (9)式はその流体力を具体的に記述したものであり, 右辺の X, Y, N に付いた添え字はその変数の微係数であることを示す. T はスラスト, t はスラスト減少率, F_N は舵直圧力, t_R は舵の付加抵抗係数, a_H は舵によって生じる付加横力率, x_R は舵の直圧力の作用中心点と船体重心の前後方向距離, x_H はその付加横力の作用点と船体重心の前後方向距離, δ は舵角を表す. また, (10)式の A_T, A_L はそれぞれ船体の水面上部分の正面投影面積と側面投影面積である. C_X, C_Y, C_Z は風圧力係数であり, 船体や上部構造の形状から得られる. また, U_{WA} は船が受ける相対風速を, ψ_{WA} は相対風向を表す.

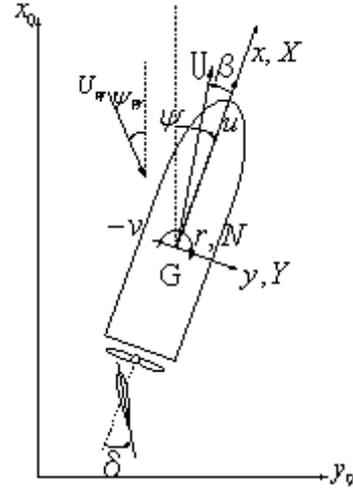


Fig. 2 Coordinate system

Table 1 Principal particulars of subject ship

Type of Ship	Training Ship
L_{pp} [m]	45
B [m]	10
d [m]	3.2
C_b	0.53

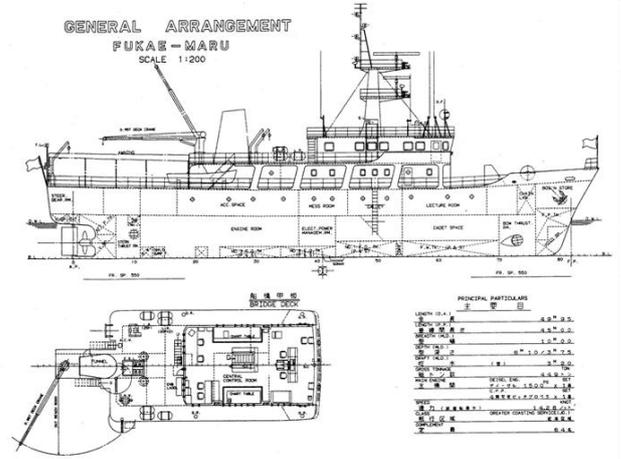


Fig. 3 Profile and plan of subject ship

4. 最適化計算と実船実験の比較

4.1 最適化計算の制約条件

最適化計算で用いた各条件の数値を Table 2 に示す. ここで注目すべき点として, 終端位置に関する制約条件は変針後の航路線上の変針点から十分遠い地点という意味で $y_0' \geq 5 \sin \chi$ とした. なお, Fig. 1 に示すように y_0' は y_0 を船長 L で除した無次元値, χ は y_0' 軸から反時計まわりに測った変針角である.

Table 2 Constraints for optimisation

Initial Conditions	Ship Velocity	$u = 5.4[\text{m/s}]$, $v = 0$
	Yaw Rate	$r = 0$
	Heading Angle	$\psi = 0$
	Position	$x_0' = y_0' = 0$
	Rudder Angle	$\delta = 0$
Termination Conditions	Heading Angle	$\psi = 30, 45, 60[\text{deg}]$ etc.
	Position	On a line and $y_0' \geq 5\sin\chi$
	Ship Velocity	Free
	Yaw Rate	$r = 0$
Other Conditions	Rudder Angle	$\delta = 0$
	Maximum Rudder Angle	$ \delta \leq 10[\text{deg}]$

4.2 実験結果と最適化結果の比較

以上のような計算手法や制約条件を用いた変針操船の最適化結果が実用面でどの程度の精度を持つのかを調べるため、深江丸を用いた実験を行った。

今回の実船実験では外乱の影響を除去するために同じケースをそれぞれ 2 回ずつ、実験開始時の船首方位をおよそ 180°反対にして行った。上記の条件のうち 30°, 45°変針の実験結果と最適化結果の比較を Fig. 4, 5 に示す。図中の矢印は計測された風向の平均値を表したものである。実験時の操舵（実線）は手動で行われたため、指令舵角は最適化結果（破線）のように滑らかではなく階段状になっているが、これらの差は操縦運動にほとんど影響しないことをシミュレーションで確認している。

その他の時系列を比較してみると、航跡、終端回頭角などで最適化計算結果と実船実験結果が比較的良好に一致しているものとそうでないものがある。Fig. 4 の 30° 変針では実験結果は計算値に近い結果となった。風の向きが他のケースと違って前後方向に近いことが要因の一つとして考えられる。また、回頭運動が小さいため数学モデルが比較的精度良く運動を推定できたのではないかと考えられる。一方、Fig. 5 では航跡と終端回頭角に大きな違いがある。Fig. 4 の場合とは違って風向が斜めまたは横方向に近く、風の影響を大きく受けたためと考えられる。

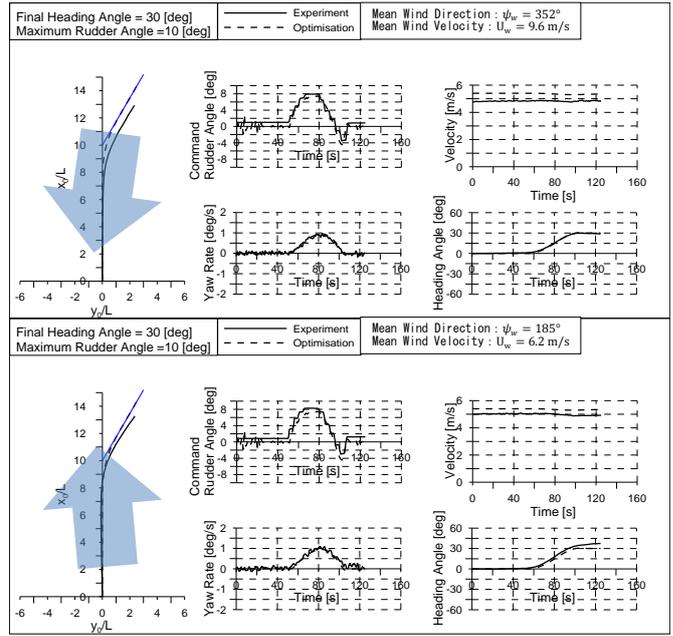


Fig. 4 Comparison of 30 degree course changing between experiment and optimisation

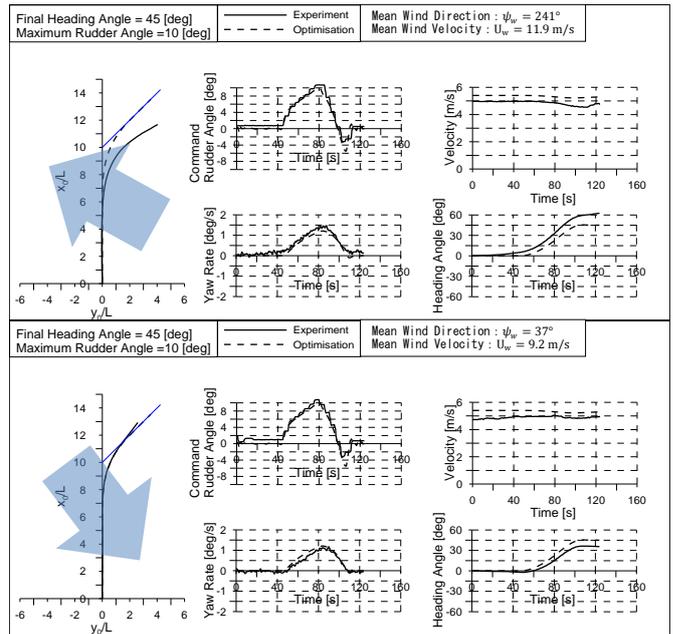


Fig. 5 Comparison of 45 degree course changing between experiment and optimisation

4.3 実験結果と風圧下のシミュレーション結果の比較

実験結果と最適化結果が場合によって大きく異なることから、風の影響を調べるために Fig. 5 の 45° 変針の実験で実際に計測された風向、風速を加えて操縦運動のシミュレーションを行った。Fig. 6 に結果を示す。シミュレーション結果は実験結果に近い傾向を示している。したがって、今回の実海域での変針運動に影響を及ぼす主な要因は風の乱れで

あると言える。

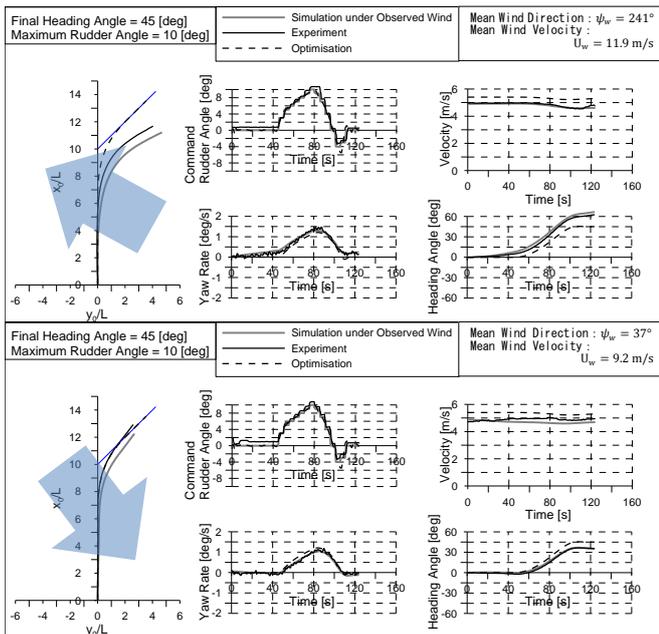


Fig. 6 Comparison of 45 degree course changing between experiment and simulation under the observed wind

5. オートパイロット

最適化した操船方法を実用化することを考える時、前章で示したように外乱の影響を考慮する必要がある。しかし、本研究で用いた最適化手法はオフラインで数値計算を行うものであり、発生した時々刻々の外乱に対して即座に最適化結果を算出して対応できるものではない。そこで、変針時の最適操舵の前後にオートパイロットを採用することで外乱によってずれた船の針路を補正することを考える。

そのオートパイロットとして、船の航路線からのずれに対してPD制御をかける。計算結果を Fig. 7 に示す。濃い実線は Fig. 5 や Fig. 6 の上図でも示した 45° 変針の実験結果である。薄い実線（カラーの場合は緑の線）は最適操舵を始める前と終了後でPD制御による保針を行ったものである。

Fig. 7 上図は最適操舵として風なしの条件での最適化結果を用いたもので、風の影響により最適操舵部分では航路線から大きく外れているが、最終的には針路を補正できていることがわかる。

一方で Fig. 7 下図は、最適操舵部分に風（一定風）を考慮した最適化結果を用いたものである。Fig. 7 上図に比べて、変針から保針操船へと航路線から外れずにスムーズに移行できていることがわかる。

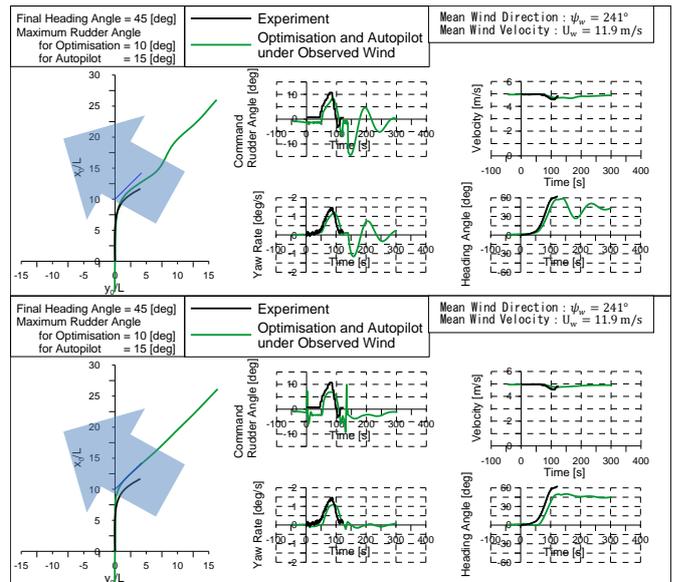


Fig. 7 Comparison of 45 degree course changing between experiment and simulation with autopilot and optimisation result under the observed wind

6. 結言

本研究では、前報で用いた非線形計画法で最短時間変針問題を解くという手法によって求めた最適な操舵方法を、実船を用いて検証した。その結果として、今回実験を行った海域で想定に近い操船を行うためには、特に風の影響を考慮する必要があることがわかった。

また実験結果を受けて、風の外乱にオンラインで対応するために航路からのずれに対するPD制御を導入した。そして、本最適化手法とこのPD制御を組み合わせる方法を提案し、外乱中の操船に対しても実用性のある結果が得られた。

参考文献

- 1) 杉田浩士, 長谷川和彦, 大津皓平: 非線形計画法による最短時間操船の変針問題への応用, 平成 23 年度秋季講演会講演論文
- 2) 大津皓平: 非線形計画法による最短時間操船の数値解法, 日本造船学会論文集, 第 196 号, pp.99-104, 2004 年.
- 3) 土屋武司, 鈴木真二: 数理計画法を用いた最適制御問題解法に関する研究(その 1) 感度微分方程式の導入, 日本航空宇宙学会誌, 第 45 巻, pp.231-237, 1997 年.
- 4) 鈴木真二: 最適制御問題の数値解法, 計測と制御, 第 36 巻, pp.784-786, 1997 年.
- 5) 前田晃治郎: 操縦運動数学モデルを用いた着岸制御に関する研究, 大阪大学卒業論文, 1992 年 3 月.
- 6) 藤原敏文, 上野道雄, 二村正: 船体に働く風圧力の推定, 日本造船学会論文集, 第 183 号, pp.77-90, 1998 年.