

可変ゲインによる航路誘導制御に関する研究

学生員 福田人意*
 正員 大津皓平**
 非会員 田崎哲夫***
 正員 岡崎忠胤****

A Study of Ship's Guidance Control by Time-Varying LQ Controller

by Hitoi Fukuda, *Student Member*
 Kohei Ohtsu, *Member*
 Tetsuo Tasaki, *Non member*
 Okazaki Tadatugi, *Member*

Summary

In this paper, a ship's tracking controller using an optimal tracking algorithm by the Bryson-Ho algorithm¹⁾ is proposed. In this system, the optimal controller by using the algorithm of time-varying linear-quadratic controller (TVLQC) steers a rudder so that the ship navigates on the desired track. When stationary disturbances like wind or current occur, a virtual track route in which the true desired track is appropriately shifted, is introduced. In the latter part of this paper, as a tracking by TVLQC in low speed a tracking using bow thruster is discussed.

The possibilities of the proposed algorithm are tested in simulations and actual ship's tracking experiments using an actual ship.

1. 緒 言

近年の急速なコンピュータの高速化、大容量化によって、一昔前は不可能であった制御が、リアルタイムで可能となった。その一つに、線型システムのターミナル問題の最適解をリアルタイムに求め、そのフィードバックゲインを用いて制御をかける Time-varying linear-quadratic controller ; TVLQC) と呼ばれる方法がある (Bryson-Ho¹⁾)。Kvam 等は、この方法を用いて保針制御、変針制御を定式化し、高速域で可変ゲインによる針路制御の有効性を実船実験で確認してきた。ただし、この際、変針時などにバンバン制御 (Bang-Bang Control) を実現するため、OSB (One Switch Bang Bang Control) と呼ばれるアルゴリズム

を導入した。

一方、オートパイロットの機能として、最近では針路制御ばかりなくトラッキング機能が重視されてきている。

すなわち、GPS などを利用して、予定した航路に沿って船を航行させる機能である。この問題の定式化は、評価関数の中に希望する航路からの偏差を導入することにより、TVLQC の枠内で実現可能である。また、この方法の応用として、スラスタなどを使った低速域でのトラッキングを精度よく行うことができれば、着桟などの港内操船でも応用できると考えられる。

この論文では、まず、高速域において、舵を使って船を与えられた直線状の希望航路に沿って航行させるトラッキング問題、ウェイポイントに沿って変針させる変針トラッキング問題、ならびに舵の効かない低速領域において、舵の代わりに Bow thruster によって針路の制御を行う直線トラッキング問題を扱う。そして、これらの方法の有効性は、シミュレーションと実船実験によって、立証することとする。

2. 船のトラッキング問題と可変ゲイン制御

* 東京商船大学大学院

** 東京商船大学

*** 石川島播磨重工業株式会社

**** 海上技術安全研究所

船舶の操縦運動は、一般に次のような線形システムで表現できる³⁾。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.1)$$

ここで、 x は船舶の操縦性能を表す状態変数、 A, B は船舶の操縦性を表す状態行列とする。 u は舵などの操作変数である。このとき、一般のターミナル問題は

$$x(t_0) = x_0, \quad e_f \equiv M_f x(t_f) - \psi \quad (2.2)$$

と表せる。ここで、 t_0 は制御開始時刻、 t_f は状態量が指定された終端状態量 ψ の近傍になるときの時刻で、指定されているものとする。 e_f は到着時刻におけるシステムの状態量と指定された終端条件との差である。また、トラッキング問題として考えるため、終端条件に達するまでの航路が $y_d(t)$ と設定され、出力が $y = Cx + Du$ と観測されると考える。そして、このトラッキングシステムの運動を評価するため、評価関数として次のような関数を考える。

$$J = \frac{1}{2} e_f^T Q_f e_f + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [(y - y_d)^T Q (y - y_d) + u^T R u] dt \quad (2.3)$$

ここで、
 $Q_f^{-1} : [e_f(t_f)]$ の許容値の対角行列
 $Q^{-1} : [x_i(t_f)]$ の許容値の対角行列
 $R^{-1} : [u_i(t_f)]$ の許容値の対角行列

最適問題は、この(2.3)を最小にする制御則 u を求めることに帰着する。ただしこの関数には e_f が設定されており、得られた制御則では、システムの状態点 x は、厳密に終端条件に一致する必要はない。従って、この最適制御をソフトターミナル制御(Soft Terminal Controller)という。また、 T_x, T_u は希望する x, u の減衰時間で、設計者が指定する。

この問題の解としては、オイラー・ラグランジェの方程式を逆時間で解くリッカティの方程式が効率的であり、次のようなフィードバック制御則とフィードフォワード制御則からなる最適解を得ることが知られている¹⁾。

$$u(t) = u_f(t) - K(t)x(t), \quad u_f(t) = -R^{-1}B^T g(t), \quad K(t) = R^{-1}[N^T + B^T S(t)] \quad (2.4)$$

ここで、 $S(t), g(t)$ は、次のリッカティ方程式から得られる解である。

$$\dot{S} = -S\bar{A} - \bar{A}^T S - \bar{Q} + S\bar{B}S, \quad S(t_f) = M_f^T Q_f M_f \equiv S_f \quad (2.5)$$

$$\dot{g} = -[A - BK(t)]g + C^T Q_f y_d, \quad g(t_f) = -M_f^T Q_f \psi \quad (2.6)$$

以上の TVLQC アルゴリズムをまとめると、次のようになる。

- ① 初期状態 x_0 、終端時間 t_f 、終端状態 x_f 、重み行列 Q, R をセットする。
- ② 終端条件 $S(t_f) = S_f = Q_f$ 、 $g(t_f) = -Q_f \psi$ をセットする。
- ③ 逆方向にリッカティ方程式(2.5)(2.6)を区間 (t_f, t_0) で解く。
- ④ 制御則 $u(t)$ を(2.4)によって求める。

このアルゴリズムを新しいデータが得られるたびに計算し、可変ゲインを設定するのがここで用いる可変ゲインの計算である。ただし、このアルゴリズムで計算すると、いわゆるバンバン制御は得られない。そこで、著者等はAppendixに示す OSB 制御則と呼ぶ新しい方法によって、当て舵付きのバンバン制御を実現した⁵⁾。

3. トラッキングのための線型操縦運動モデル

3.1. 舵を用いるトラッキングの操縦モデル

次に可変ゲインによる線形制御理論を用いた最適ルートトラッキング方法を示す。今日、MMGモデルとして詳細な非線型モデルが提案されているが、そのうち正司等²⁾のモデルは、

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{1}{m + m_y} \left\{ -m r + \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 (Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{vr}' v' r') \right. \\ &\quad \left. + Y_{vv}' v' v' + Y_{rr}' r' r' \right\} - (1 - a_H) F_N(u, v, r, \delta, \theta_P) \cos \delta \\ \dot{r} &= \frac{1}{I_{zz} + J_{zz}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 (N_v' v' + N_r' r' + N_{vr}' v' r' + N_{vv}' v' v' \right. \\ &\quad \left. + N_{rr}' r' r') - (x_R - a_H x_H) F_N(u, v, r, \delta, \theta_P) \cos \delta \right\} \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (3.1)$$

で表される。この式より、線型操縦モデルを作るため、以下の条件を加える。

- Surge については、 $u = u_0$ とする。ここで u_0 は航海速度である。
- 横方向速度は、前後方向速度に比べ非常に小さいものとする。よって、 $v = 0$ とする。
- 船体は定常状態にあるものとし、プロペラピッチ角は一定であるとする。

○舵への流速は一定であるものとする。

○2次流体微係数は小さいので、0と設定する。

この結果得られる線形化したモデルは、 v, r, ψ, y を状態変数、 δ を操作変数とすると、

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (3.2)$$

と書ける。

ここで、

$$\begin{aligned} U_{R,0}(u_0, \theta_{P,0}) &= \{(1-w_R) - (1-w_P)k_x\}u_0 + 0.7k_x\pi D_P n \tan \theta_{P,0} \\ a_{11}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_y} \left\{ -(1+\alpha_H) \frac{1}{2} A_R f_\alpha U_{R,0} \gamma_R + \frac{1}{2} \rho L_{PP} d u_0 Y'_v \right\} \\ a_{12}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_y} \left\{ -(1+\alpha_H) \frac{1}{2} A_R f_\alpha U_{R,0} \gamma_R \frac{l_r L_{PP}}{2} \right. \\ &\quad \left. - m u_0 + \frac{1}{2} \rho L_{PP}^2 \frac{d u_0 Y'_v}{0} \right\} \\ a_{21}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_R + \alpha_H x_H) \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_{R,0} \gamma_R \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \rho L_{PP}^2 \frac{d u_0 N'_v}{0} \right\} \\ a_{22}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_R + \alpha_H x_H) \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_{R,0} \gamma_R \frac{l_r L_{PP}}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \rho L_{PP}^3 \frac{d u_0 N'_v}{0} \right\} \\ a_{b11}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_y} \left\{ -(1+\alpha_H) \frac{1}{2} A_R f_\alpha U_{R,0}^2 \right\} \\ a_{b21}(u_0, \theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_R + \alpha_H x_H) \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_{R,0}^2 \right\} \end{aligned}$$

である。ここで、 v, r, ψ, δ は船体横速度、船首加速度、船首角、舵角、 $\theta_{P,0}$ は CPP のピッチ角、 m は船体質量、 m_y は横方向付加質量、 I_{zz}, J_{zz} は運動慣性モーメント、運動付加モーメント、 α_H は舵・船体相互干渉係数、 ρ は海水密度、 A_R は舵面積、 f_α は舵直圧力係数、 $U_{R,0}$ は舵への流入速度、 γ は舵整流係数、 L_{pp} は船の垂線間長、 d は船体の深さ、 u_0 は船速、 l_r は舵位置、 Y'_v, N'_v は横速度に起因する横力微係数、および回頭モーメント微係数、は Y'_v, N'_v 船首回頭速度に起因する横力微係数、および回頭

モーメント微係数である。

ここで舵直圧力 F_N は、

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha (U_{R,0}^2 \delta + U_{R,0} \gamma_R (v + l'_r r)) \quad (3.3)$$

と近似する。

3.2. Bow thruster (B/T) を用いるトラッキング操縦モデル
また、低速時、B/T によってトラッキング制御を行うことを考える。その場合の操縦モデルは、同様に

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{P,bh} \quad (3.4)$$

と設定できる。ここで

$$\begin{aligned} a_{11}(u_0) &= \frac{1}{m+m_y} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP} d Y'_v \right\} \\ a_{12}(u_0) &= \frac{1}{m+m_y} \left\{ -m u_0 + \frac{1}{2} \rho L_{PP}^2 d Y'_v \right\} \\ a_{21}(u_0) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP}^2 d N'_v \right\} \\ a_{22}(u_0) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP}^3 d N'_v \right\} \\ b_{12}(u_0) &= \frac{1}{m+m_y} T_{bh} \\ b_{21}(u_0) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} T_{bh} \cdot x_B \end{aligned}$$

$\theta_{P,bh}$ は B/T ピッチ角、 T_{bh} は出力係数、 x_B は B/T の x 軸方向の位置を表す。

4. トラッキング実験

実船実験は、東京商船大学練習船汐路丸を使って行われた。要目表を Table 4.1 に示す。

汐路丸には、実船実験を行うためのデータ収集と、LAN が備え付けられている。船体運動を制御するための、舵、CPP、バウスラスタ、スタンスラスタの制御も船内研究室のコンピュータにより制御が可能である。ただし、今

回用いた TVLQC は高速な処理が必要であるが、船内にあるコンピュータでは性能を満足できるものがなかった。そこで、船内の信号入出力部分と高速演算が可能なパソコンを接続し制御を行った。

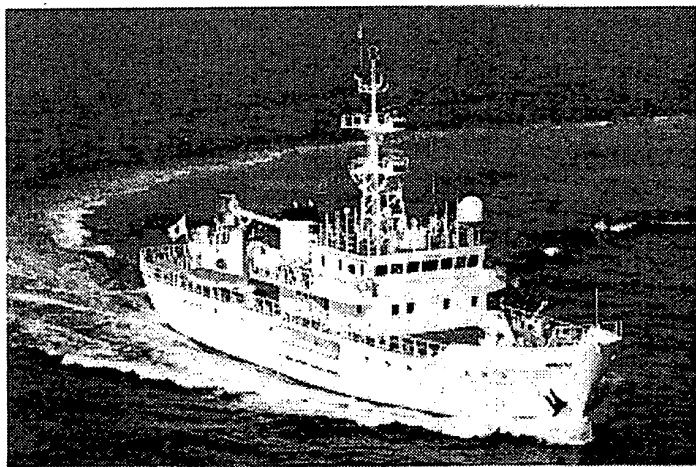


Fig.4.1 T.S. Shioji Maru

Table4.1 Principal dimensions of the Shioji Maru

Length over all	49.93 [m]
Breadth	10.00 [m]
Draft	3.80 [m]
Gross Tonnage	425 [ton]
Main Engine	1400 [PS] 700[r.p.m]
Bow Thruster	2.4 [ton]
Stern Thruster	1.8 [ton]

位置は DGPS、針路はジャイロコンパス、船速は E.M.log から得た値を使用した。

4.1. トラッキングルート

Fig.4.2 に示すようにウェイポイントを設定し、このウェイポイント間を結ぶ直線のルート上を航行するようにトラッキングを行う。

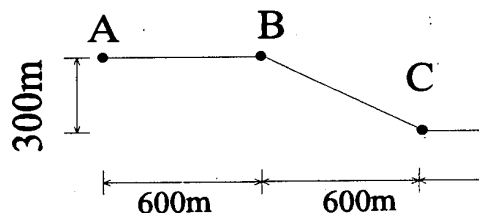


Fig.4.2 Waypoint and tracking route

ウェイポイント間を結ぶ直線に対し、トラッキングを

行うが、ウェイポイントに近づいたとき、任意の距離で目標とするルートを変え、そのルートに向けてトラッキングを行うことにする。例えば、Fig.4.2 に示したウェイポイント A-B 間の直線ルート上を航行するようにトラッキングを行った場合、船舶がウェイポイント B に近づくと目標とするルートを B-C 間のルートに変える。これをウェイポイント通過の度に繰り返し、変針を必要とするルートのトラッキングを実現させる。

4.2. シミュレーション

実船実験の前に、シミュレーションによってその有効性を評価した。直線のルートを North に設定し、外乱として、風向 90[deg] 風速 7[m/s] を加えた。Fig.4.3 はその結果を示す。破線はルートからの偏差を示している。TVLQC による制御を行った場合、18[m] 程度の定常偏差を発生しながらトラッキングを行っていることがわかる。この定常偏差をうち消す方法として、Fig.4.4 に示すように、目標とするルートを定常偏差分だけシフトさせたルート（破線）を設定し、このルートに対しトラッキングを行うこととした。

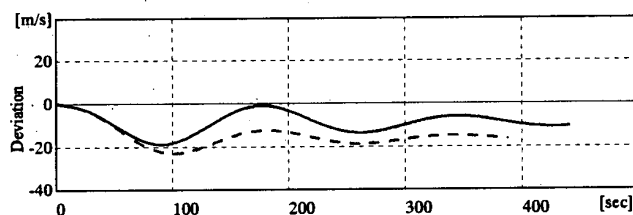


Fig.4.3 Time Histories of Deviation from the Desired Track

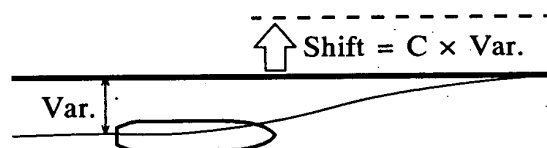


Fig.4.4 Virtual track route

Fig.4.4 の太線が設定されたルートである。定常偏差 (Var.) は、偏差の平均値とし、以下に示す式によって時々刻々求めた。

$$m(k) = m(k-1) - \frac{1}{k} (m(k-1) - x(k)) \quad (4.1)$$

ここで k は今回の観測が何回目かを表し、 $m(k)$ をその時点での $x(k)$ の平均値と定義している。また右辺の $x(k)$ は今回の観測値である。

求めた定常偏差に調整用の係数 (C) を掛けて目標とするルートをしフトさせ、トラッキングを行った結果を Fig.4.3 の実線で示している。実験開始直後は偏差に対して変化はないものの、定常偏差を計算し、シフティングの効果が現れる100[sec]以後は、シフティングを行わなかった場合に比べ、トラッキングルートに近づいていることがわかる。

4.3. 実船実験

Fig.4.5 に 2.で述べた TVLQC による実船でのトラッキングの結果を示す。15[m/s]の風を右舷 30 ~ 40[°]から受けてトラッキングを行った。縦軸は偏差の値を示し、横軸は時間を示す。偏差が負になっているのは、目標とするルートより左に流されていることを示している。95 [sec] までは、目標とするルートから10[m]程度の定常偏差を生じてトラッキングが行われていることがわかる。そこで目標ルートに乗せるために目標とするルートをしフトさせることとした。そのため実験開始後 95[sec]からは偏差の平均値を式 (4.1) によって時々刻々求め、求められた値によって目標ルートのシフティングを行いトラッキングを行った結果である。2[m]程度の偏差が残ったものの、トラッキングの精度が改善されたことがわかる。

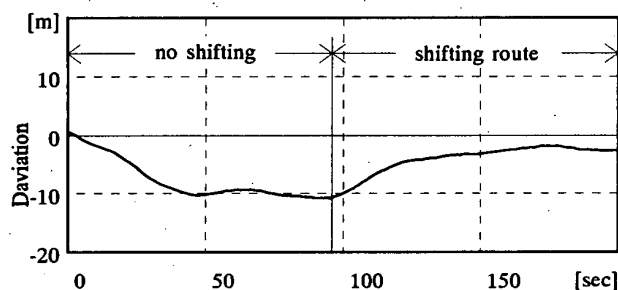


Fig.4.5 Time Histories of Deviation from the Desired Track in Actual Experiment

4.4. 変針を伴うルートのトラッキング 1

次に変針を必要とするルートのトラッキングを行った結果について報告する。

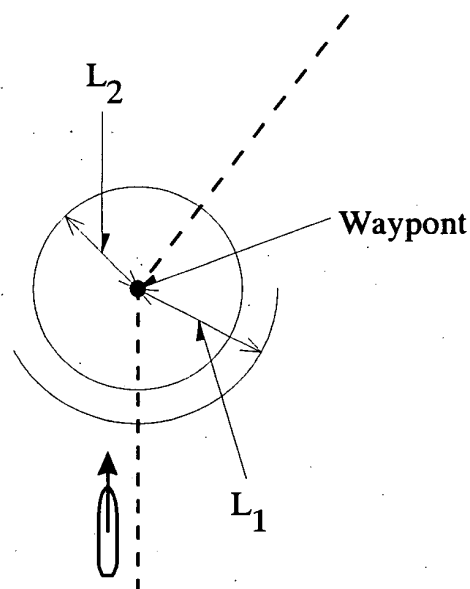


Fig.4.6 Procedure at waypoint

変針時については Fig.4.6 に示した手続きを加えた。4.1.で説明したとおり、ウェイポイントまでの距離が L_1 以下となれば目標とするルート进行切り替える。

ただし、変針時得られる偏差は定常偏差とみなせないで、ウェイポイントから L_1 以内では、この目標ルートのシフティングは行わないこととした。実船実験では、 L_1, L_2 とも 200[m]と設定した。

Fig.4.8 は目標ルートからの定常偏差が発生した場合、ルートのシフティングを行ってトラッキングを行った結果をプロットしたものである。プロット図と Fig.4.7 で示すように、シフティングを行っているにもかかわらず定常偏差が発生している。Fig.4.7 に示している舵角は、変針後、定常偏差が発生しているにもかかわらず、舵の動きは小さい。

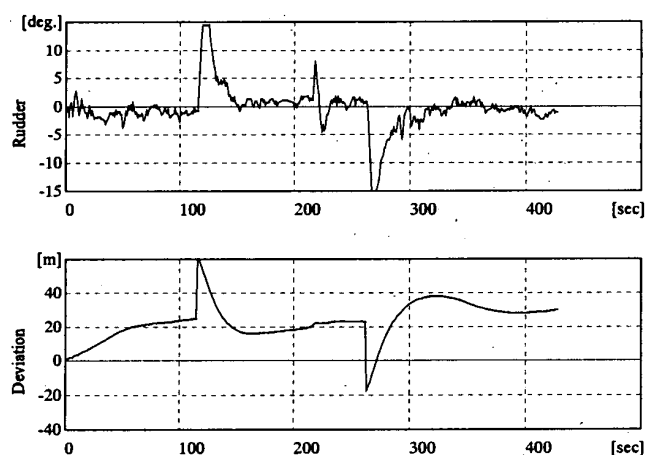


Fig.4.7 Time Histories of Rudder and Deviation from the Desired Track in Actual Experiment

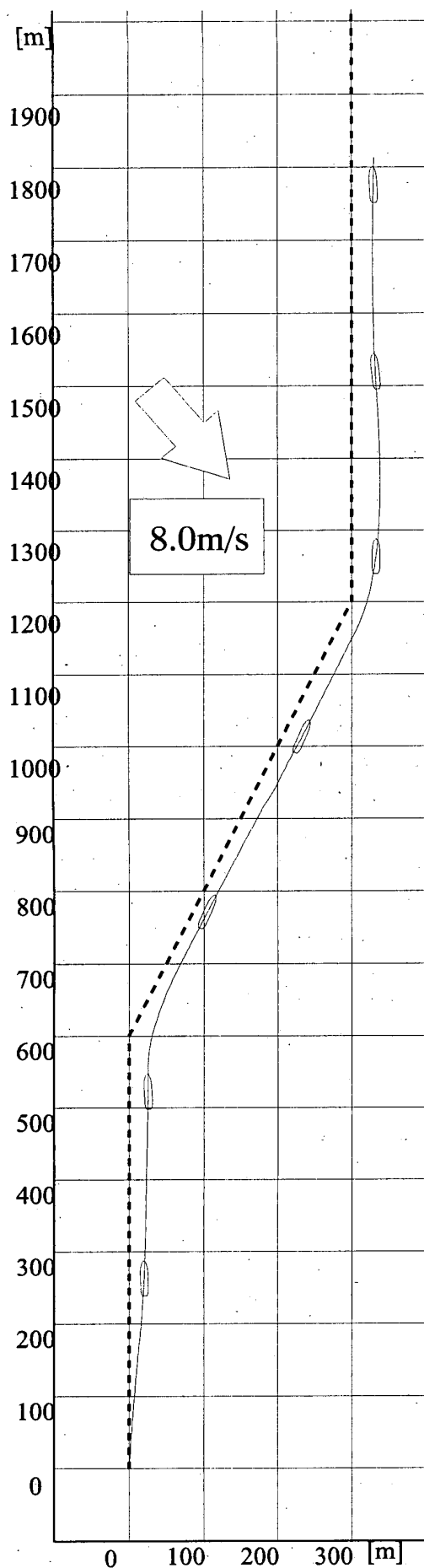


Fig.4.8 Plot of ship by TVLQC

4.5. 変針を伴うルートへのトラッキング2

そこで、舵の重み R を小さくして実験を行った。先ほどの実験より $1/10$ まで小さくしている。

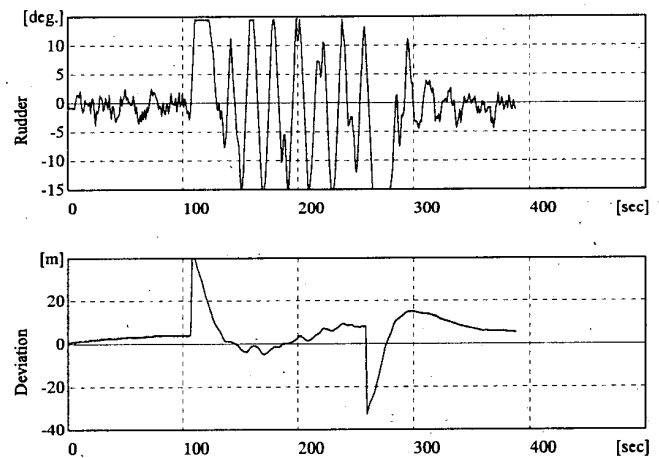


Fig.4.9 Time Histories of Rudder and Deviation from the Desired Track in Actual Experiment

実船実験の結果を Fig.4.9 と Fig.4.11 に示す。舵を取る量は多かったものの、定常偏差が小さくなり、目標ルート上をトラッキングしていることがわかる。

4.6. Bow thruster(B/T)によるトラッキング

Fig.4.10 は、3[kt]で B/T により直線のトラッキングを行った結果を示している。ほとんど無風に近い状態だったが、時系列データを見てわかるように 8[m]程度の定常偏差を生じたままトラッキングを行った。この実験では、定常偏差をうち消す処理が行われていない。しかし、TVLQC による B/T の制御でのトラッキングも可能であることがわかったので、今後の実験では、定常偏差をなくす処理と変針を必要とするルートのトラッキングが可能であると考えられる。

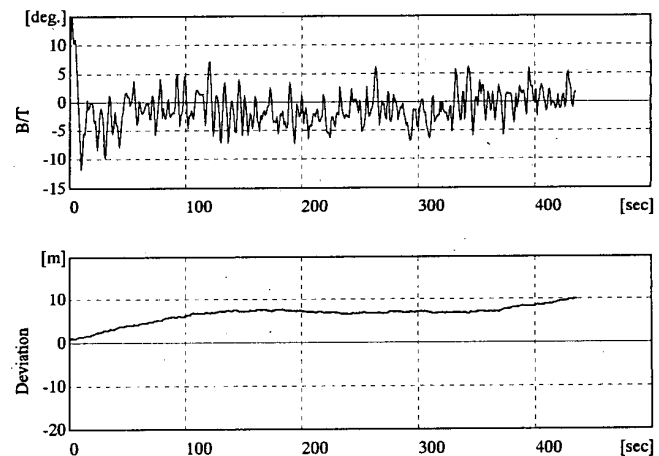


Fig.4.10 Time Histories of B/T and Deviation from the Desired Track in Actual Experiment

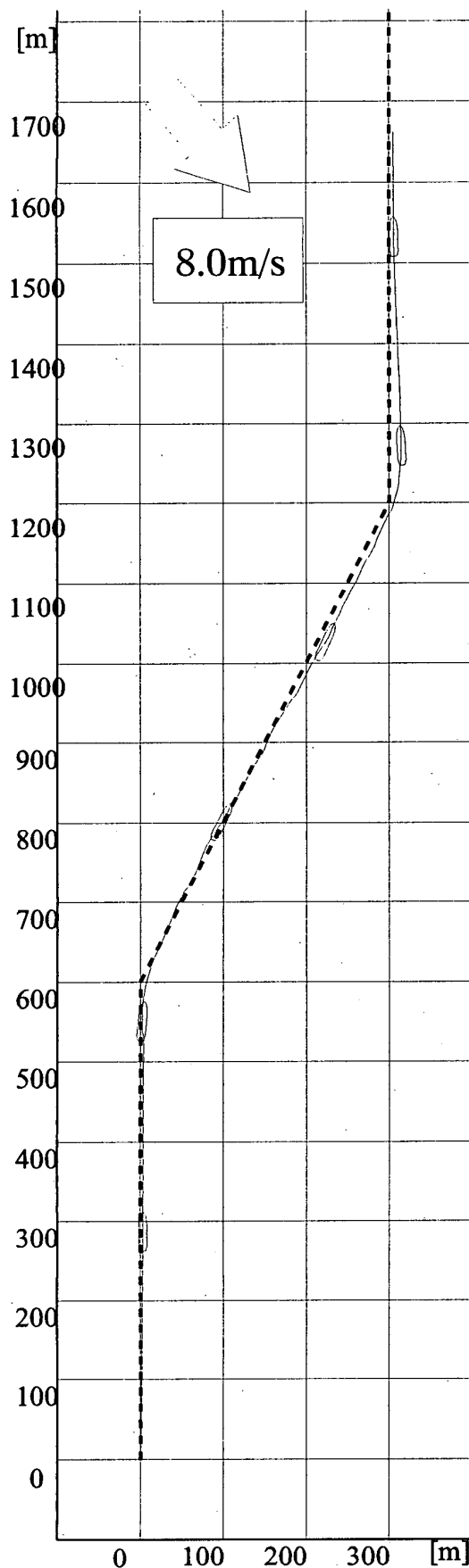


Fig.4.11 Plot of ship by TVLQC (Adjusted R)

5. 結 言

この論文では、TVLQCによるトラッキングを行った。トラッキングでは定常偏差をうち消すため、定常偏差の逐次推定平均を計算し、この量を使って、目的とするルートのシフティングを行うことにより、トラッキングの精度を向上させることが可能となった。

低速の場合でも、舵の代わりにバウスラストで針路の制御を行いながらのトラッキングが可能であることがわかった。

今後の課題として、バウスラストによるトラッキングでは、変針を含むルートのトラッキングを行うこと。モデルに、風による外力を加え、風圧力に対するフィードフォワード制御がかかるようにすることである。

謝 辞

この論文を作成するに当たり、八田船長、廣瀬機関長をはじめとする東京商船大学練習船汐路丸乗組員の方々に深く感謝の意を表します。

Appendix

OSB 制御アルゴリズム

短時間で変針制御を行うには、バンバン制御を実現しなければならない。バンバン制御ではアクチュエータの制限値（ここでの問題では舵角制限）が設定される。変針が始まると舵はまずこの舵角制限一杯までとる。しかしながら、やがて目的となる変針量に達する頃、舵は当て舵（Counter Rudder）をとる必要が生じる。

このとき、当て舵操舵が始まり、船首角速度がゼロになる時間を t_f とする。変針を開始するときこの t_f を前節で述べた問題における終端条件として設定する。このように設定すると、当然開始時からみるとこの t_f は変針するためには、きわめて短い時間が設定されていることとなる。従って、変針制御開始初期では、(2.4)に述べた制御問題から得られる命令舵角は、舵角制限一杯にとる以外に方法がない解が得られる。これらのことを毎サンプリング時間で繰り返すとやがて残された変針量が、 t_f 時間で十分な量となる。そして、この時刻以降は当て舵操舵によりできる限り変針がオーバーシュートのない制御となるように操舵される。このような制御則をここでは、One Switch Bang-Bang Control (OSB アルゴリズム) と呼ぶ

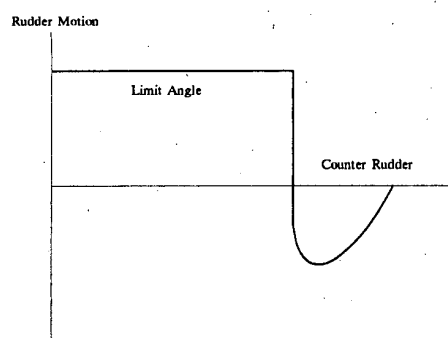


Fig.A.1 One Switch Bang Bang Control

参考文献

- 1) Arthur E. Bryson, Jr.: Dynamic Optimization. ADDISON-WESLEY
- 2) 庄司公一、大津皓平、堀田敏行：最適制御理論による操船の最適化と自動化について（第一報）.造船学会論文集 172 号.1994
- 3) T.I.Fossen: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994
- 4) H. Mizuno, T. Okawa, I. Komie: Route Tracking System by Adaptive Autopilot, Proc. of CAMS'89, 77-82, Copenhagen, Denmark
- 5) 大津皓平、K.Kvam、T.I.Fossen、福田人意：可変ゲインによる最適操舵、日本航海学会論文集 104 号. 2001