TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

可変ゲイン最適制御法による船舶の操縦に関する研 究

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2008-03-19
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 田丸, 人意
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/624

可変ゲイン最適制御法による 船舶の操縦に関する研究

平成14年度(2002)

東京商船大学大学院
商船学研究科
交通システム工学専攻
田丸人意

目次

第1章 緒言 1
1.1 運航技術の高度化の中での航路追従システムの必要性
1.2 航路追従システムの実現性と解決すべき課題
1.3 本論文の目的
1.4 理論の検証の方法と汎用化
1.5 トラッキングシステムのこれまでの研究
1.6 本論文で扱う制御理論と実現性の検討
1.7 取り扱うトラッキング問題4
1.8 本論文記述スタイルと構成4
1.9 結言
参考文献
第2章 シミュレーションモデルと実験環境 8
2.1 緒言
2.2 供試船の実験環境と制約8
2.3 汐路丸のデータ収集ネットワークシステム10
2.4 制御周期
2.5 シミュレーションに用いた操縦運動数学モデル13
2.6 カルマンフィルタによる位置推定
2.7 転心への座標変換
2.8 結言
参考文献
第3章 船体運動制御のための連続型線形ターミナル制御理論 26
3.1 緒論
3.2 Time Varying Linear Quadratic Control (TVLQC)
3.2.1 制御開始状態と終端条件のみが与えられている場合の軌道自由問題の解27
3.2.2 制御開始状態と終端条件、終端条件までの軌跡が指定されている追従問題の解
3.2.3 制御開始状態と終端条件、終端条件までの軌跡と外力が与えられている場合の追従
問題の解
3.3 One Switch Bang Bang Control 31
3.4 TVLQC 法による制御アルゴリズム
3.5 結言
参考文献
第4章 船舶の航路追従(トラッキング)制御 34
4.1 緒論
4.2 トラッキングルートの設定と追従方法
4.3 終端時間の設定 ····································

4.4	航路偏差の計算
4.5	希望針路を指示するトラッキング制御36
4.5.1	指数減衰針路法
4.5.2	指数減衰針路法による直線変針ルート追従制御シミュレーション38
4.5.3	指数減衰針路法による Simple Tracking Route 追従制御実船実験とその解析41
4.5.4	指数減衰針路法による最短時間ルート追従制御実船実験とその解析41
4.6	舵に直接命令するトラッキング制御
4.6.1	TVLQC 法によるトラッキング制御
4.6.2	線形操縦系モデル
4.6.3	TVLQC 法による直線変針ルートトラッキング制御シミュレーション48
4.6.4	TVLQC法による直線変針ルートトラッキング制御実船試験と解析
4.6.5	新針路距離の計算
4.7	TVLQC 法における定常偏差に対する修正法
4.7.1	定常外乱を除去する種々の方法
4.7.2	Virtual Track Route 法による定常偏差除去
4.7.3	Virtual Track Route 法による定常偏差除去シミュレーション
4.7.4	Virtual Track Route 法による定常偏差除去実船実験と解析60
4.7.5	積分制御法による定常偏差除去
4.8	外乱既知の場合の TVLQC 法 ···································
4.8.1	定常外乱モデル
4.8.2	風圧力を考慮した TVLQC 法による実船実験と解析
4.9	一般船舶への汎用化への考慮
4.9.1	推定した流体微係数モデルによるシミュレーション
4.9.2	推定した流体微係数モデルによる実船実験と解析
4.9.3	野本モデルによる線形操縦モデルを使用した TVLQC 法によるトラッキング制御
4.9.4	野本モデルを使った TVLQC 法によるトラッキングシミュレーション
4.9.5	野本モデルを使った TVLQC 法によるトラッキング実船実験と解析
4.10	最短時間ルートのトラッキング実船実験と解析
4.11	曲線航路指定型 TVLQC 法によるトラッキング実船実験と解析80
4.12	結言
参考	文献
第 5	章 低速航行時における TVLQC 法によるトラッキング制御 89
5.1	緒言
5.2	低速航行時のバウスラスタによる線形操縦モデル
5.3	低速航行時のバウスラスタを使った TVLQC 法によるトラッキング制御91
5.3.1	問題の設定と制御方式
5.3.2	低速航行時のバウスラスタを使った TVLQC 法によるトラッキング制御シミュレー
	ション
5.3.3	バウスラスタを使った低速航行時トラッキング実船実験と解析
	ii

5.4 バウスラスタと舵を使った TVLQC 法によるトラッキングシミュレーション	· 97
5.5 バウスラスタと舵を使った TVLQC 法によるトラッキングの実船試験と解析	· 99
5.6 結言	101
参考文献	101
第6章 着桟操船への応用への試み	102
6.1 緒言	102
6.2 着桟問題の設定	102
6.3 アプローチステージとバーシングステージ	104
 6.4 2つの操船段階における制御方式	105
6.5 速力の設定と速力制御則	106
6.6 直線航路のトラッキングと着桟操船	107
6.6.1 指数減衰方式を利用した操船	107
6.6.2 B/T のみを使う TVLQC 法による着桟操船	111
6.6.3 B/T と S/T を使う TVLQC 法による着桟操船	116
6.6.4 B/Tを使う TVLQC 法による風圧力を考慮した着桟操船シミュレーション	119
6.7 変針航路のトラッキングと着桟操船	123
6.7.1 WVDPS (Weather Vaning Dynamic Positioning System)による着桟操船	123
6.7.2 速度制御を線型モデルに含めた TVLQC による着桟操船	126
6.8 結言と展望	130
参考文献	131
第7章 結言	132
Appendix	136
Appendix A 汐路丸の操縦運動モデルの微係数	136
Appendix B 汐路丸着桟操船の一例	139
Appendix C 東京商船大学練習船汐路丸海上試験成績書抜粋	140
謝辞	152

iii

HALN.	
第1章 緒言	
第2章 シミュレーションモデルと実験環境	
Table 2.1	8
Fig. 2.1 サージとスウェイの計算	•9
Table 2.2 ARCNET 基本仕様	11
Fig. 2.2 実船実験システム構成図	12
Fig. 2.3 船体固定の運動座標系	13
Fig. 2.4 風圧力係数	19
Fig. 2.5 軌跡推定問題	20
Fig. 2.6 カルマンフィルタを使用した場合と使用しなかった場合の位置プロット図 …2	22
Fig. 2.7 アンテナ位置の補正2	23
Table 2.3 位置を求める際に利用した準拠楕円体のデータ	24
第3章 船体運動制御のための連続型線形ターミナル制御理論	
Table 3.1 ターミナル問題の組み合わせ	27
第4章 船舶の航路追従(トラッキング)制御	
Fig. 4.1 Waypoints and desired route	35
Fig. 4.2 変針点付近での偏差の計算	36
Fig. 4.3 指数関数によって目標ルートに近づける方法3	37
Table 4.1 指数減衰針路法によるトラッキングシミュレーション結果3	39
Fig. 4.4 指数減衰針路法によるトラッキング制御シミュレーション結果のプロット図	
4	10
Table 4.2 指数減衰針路法によるトラッキング実船実験結果	11
Table 4.3 Ld=50[m]の場合のトラッキング実験結果	12
Table 4.4 <i>La</i> =100[m]の場合のトラッキング実験結果4	12
Table 4.5 L _d =150[m]の場合のトラッキング実験結果	12
Fig. 4.5 指数減衰針路法によるトラッキング制御実船実験結果4	13
Fig. 4.6 指数減衰針路法による最短時間ルートのトラッキング制御実験結果4	14
Fig. 4.7 座標系 ·······4	17
Fig. 4.8 TVLQC によるトラッキングシミュレーション結果	<i>5</i> 0
Fig. 4.9 Rの重みを変更した場合のトラッキングシミュレーション結果	51
Table 4.7 舵への重みが大きい場合((4.17)を使用)	52
Table 4.8 舵への重みが小さい場合(重み(4.16)を使用)	52
Fig. 4.10 舵の重みを大きく設定した場合の TVLQC 法によるトラッキング実験結果 …5	<u>;</u> 4
Fig. 4.11 舵の重みを小さく設定した場合の TVLQC 法によるトラッキング実験結果 …5	i5
Fig. 4.12 変針点付近での制御則切り替え	6
Fig. 4.13 新針路距離の計算	57
Fig. 4.14 目標ルートのシフト	68
Fig. 4.15 シフト方式による偏差を打ち消しの効果。	;9

Table 4.9 目標ルートのシフトを行った場合の偏差の比較
Table 4.10 Virtual Track Route 法を使用しない TVLQC 法によるトラッキング実験結果 …60
Table 4.11 Virtual Track Route 法を使用した TVLQC 法によるトラッキング実験結果60
Fig. 4.16 Virtual Track Route 法を使用しない場合のトラッキング実験結果プロット図と時系
列データ
Fig. 4.17 Virtual Track Route 法を使用した場合のトラッキング実験結果プロット図と時系列
データ
Table 4.12 汐路丸の風に関する微係数 ·······························64
Fig. 4.18 定常風圧外乱を想定した場合(c11=c22=1.0)のトラッキング
Table 4.13 定常風圧外乱を想定しなかった場合。 ···············68
Table 4.14 定常風圧外乱を想定した場合((4.28)、(4.29)を使用)68
Table 4.15 定常風圧外乱を想定した場合(c11=c22=1.0)
Fig. 4.19 流体微形数を推定してモデルを作成し、シミュレーションを行った結果70
Table 4.16 推定微係数による線形操船モデルシミュレーション結果
Table 4.17 推定した流体微係数による実船実験結果
Fig. 4.20 流体微係数を推定して作成した操船モデルによるトラッキング実験結果72
Table 4.18 野本モデルによるトラッキングシミュレーション結果
Fig. 4.21 野本モデルによるトラッキングシミュレーションプロット図
Table 4.19 重み(4.33)によるトラッキング結果 ·······75
Table 4.20 (4.33)の R を 10 倍に設定してトラッキングを行った結果
Table 4.21 (4.33)の R を 0.1 倍に設定してトラッキングを行った結果
Table 4.22 (4.33)の Q,を 10 倍に設定してトラッキングを行った結果
Table 4.23 (4.33)の Qy を 0.1 倍に設定してトラッキングを行った結果
Fig. 4.22 (4.33)の重み設定値を使用した野本モデルによるトラッキング実船実験結果プロ
ット図と時系列データ
Table 4.24 最短時間ルートトラッキング実験結果
Fig. 4.23 最短時間ルートトラッキング実験プロット図
Fig. 4.24 简易曲線航路 ······81
Fig. 4.25 ヨーレート 0.5 [deg/s] 以内を目標にしたトラッキングシミュレーション結果プロ
ット図と時系列データ82
Fig. 4.26 ヨーレート 0.5 [deg/s] 以内を目標にした実船実験結果プロット図と時系列データ
Fig. 4.27 最短時間変針航路に対するトラッキングシミュレーション結果プロット図と時
系列データ
Fig. 4.28 最短時間変針航路のトラッキング実験結果プロット図と時系列データ86
第5章 低速航行時における TVLQC 法によるトラッキング制御
Fig. 5.1 座標系 ·······90
Table 5.1 汐路丸低速時の流体微係数 ····································
Table 5.2 B/T によるトラッキング制御シミュレーション結果
Fig. 5.2 低速時 B/T によるトラッキング制御シミュレーションプロット図92

Fig. 5.3	直線ルートのトラッキング ······93
Fig. 5.4	B/Tの翼角と出力の線形化
Fig. 5.5	直線ルートのトラッキング実験結果 ······94
Fig. 5.6	変針を必要とするルートのトラッキング実験結果96
Table 5.3	変針を行った場合の実船実験結果96
Table 5.4	舵と B/T を使用したシミュレーション結果
Fig. 5.7	舵と B/T を使用したトラッキングシミュレーション結果のプロット図と時系列デ
	一夕
Table 5.5	B/Tと舵を使ったトラッキング実船実験結果
Fig. 5.8	舵と B/T を使った低速トラッキング実船実験結果100
第6章	着桟操船への応用への試み
Fig. 6.1	着栈予定点と着栈予定点までの設定ルート103
Fig. 6.2	着栈予定点までの残距離の計算104
Fig. 6.3	アプローチステージとバーシングステージ
Fig. 6.4	指数減衰方式による着桟操船108
Fig. 6.5	速力変更パターン108
Fig. 6.6	指数減衰方式を利用した直線航路着桟の実船実験結果110
Fig. 6.7	停船操船のための初期条件と終端条件
Fig. 6.8	停船操船時の座標系
Fig. 6.9	B/Tによる直線航路着桟シミュレーション結果プロット図と時系列データ …114
Fig. 6.10	B/Tによる直線航路着桟実船実験結果プロット図と時系列データ115
Fig. 6.11	停船操船に B/T、S/Tを使った場合の着桟操船シミュレーション結果117
Fig. 6.12	停船操船に B/T、S/Tを使った場合の着桟操船実船実験結果118
Fig. 6.13	風を受けた場合の TVLQC 法による着桟シミュレーション結果121
Fig. 6.14	風圧力を考慮した TVLQC 法による着桟シミュレーション結果122
Fig. 6.15	WVDPS アルゴリズム
Fig. 6.16	S.P.を着栈予定点まで移動させる
Fig. 6.17	WVDPS を使用した停船操船による着桟実船実験結果
Fig. 6.18	速度制御を含めた TVLQC 法による着桟操船シミュレーション結果プロット図と
F	時系列データ
Fig. 6.19	速度制御を含めた TVLQC 法による着桟操船実船実験結果プロット図と時系列デ
	ータ
第7章	結言

第1章 緒言

第1章 緒言

1.1 運航技術の高度化の中での航路追従システムの必要性

かつて陸上を離れた船舶は、孤島であり、船長は無限責任を負わされながら運航していた。この運航形態は自立型(Self Contained)あるいは自律型(Autonomous)な形態であり、世代でいえば、第1世代であった^[11]。この時代が長く続いたが、近年のインマルサットなどの衛星通信技術や全地球測位システム GPS (Grobal Positioning System)あるいは最近義務化された自動船舶識別システム(Automatic Identification System;AIS)などの急速な発展により運航形態は漸く第2世代となり第3世代の陸上からの通信技術などを駆使して他律型に移行しつある。この時代になると船舶を安全にかつ効率的に運行する責任は船長のみでなく、船舶を運航する海運会社あるいは船舶を作った造船会社にも及んでくることとなる。しかし、第2、第3世代にいずれ移行していくとしても船舶のさらなる自動化は、運航会社が陸から船舶を管理する他律的な運航形態への移行の原動力となろう^[12]。

さて、20世紀初頭のオートパイロットの発明は、それまでの運航形態を変える画期的な ものであった。しかし、このオートパイロットの主たる目的は、保針制御にあり、針路で はなく航路を指定したい陸上の運航会社からみると満足のいくシステムとはいえず、現在 でもそれをカバーすべく航海士は定時刻毎に位置を自ら観測している。試算によると、指 定された航路からの逸脱に起因する航路の延長分による燃料損失は、オートパイロットの 評価関数の中でも大きな割合を占めることがわかっている^[13]。希望する航路との偏差を できる限り小さくする船舶の自動的な**航路追従システム(トラッキングシステム)**を開発 することは現在求められている省燃費の立場、ひいては環境負荷軽減の立場からみて、意 義のあることである。

また、上記の問題は大洋横断中の船舶に対する海運会社の要求であったが、内航船などの 船員不足が深刻さを増してきた現在では、その港内操船作業においても、一層の自動化が 求められるようになってきており、その段階では、自動避航システムに加え、舵の他、ス ラスタ、エンジンなどを使用して低速域のトラッキング機能、あるいはさらに進んで自動 着桟機能なども要求される時代となりつつある。

1.2 航路追従システムの実現性と解決すべき課題

そこで次に、船舶の航路追従システムを実現するために、

(1)インフラが整備されているか

(2)船舶の操縦性研究からみて操縦モデルは十分か

(3)制御工学的に見て実現可能か

などについて検討してみる。

(1)のインフラ整備については、追従制御を行う場合には、これまでの針路信号に加え、 制御周期毎の入力信号として船位が必要である。このためインフラ基盤として典型的な他 律型測位システムである GPS、GLONASS などの衛星測位技術の発展、整備が進んでおり、

1

制御信号としての精度、受信周期とも十分である。

(2)の船舶操縦性の推定については、我が国の造船学会に設けられた操縦性検討(MMG)^[14] グループのここ 25年の間の検討の結果、一軸船に限れば初期設計の段階で水槽試験を経 なくとも十分の精度の操縦モデルが推定可能となってきている。したがって、(3)で必要 な精度の良い制御モデルの構築が可能である状況となっている。

最後に、(3)の制御工学的見地について検討してみる。現代制御理論は、制御モデルを仮 定している。しかも、線形モデルであることが望ましい。線形モデルによる保針制御につ いては多くの数のオートパイロット開発がなされてきたが^[15]、トラッキング機能への線 形モデルの適用については実績が少ない。

このように見てくると、(3)の線形の操縦性モデルによる追従制御が果たして可能かどう かが、本論文の目指すトラッキングシステム開発における課題であることがわかる。

1.3 本論文の目的

筆者は、先に検討したような GPS などのインフラ整備、計算機の高速化、線形理論での 保針制御の実積等から考え、線形モデルを主体とするトラッキング制御が可能であり、か つ、先に述べた現在の海運会社の2つの要求、すなわち

(1)海運会社の航路追従性向上

(2)自動化による不足する船員の港内操船の作業軽減

をみたすシステムの開発は十分有意義であると判断し、本論文の目的を

- (1)任意に与えられた航路をできる限り追従できる舵を使ったトラッキングシス テムの開発
- (2) 舵に加え、エンジン、スラスタを使用した自動着桟を含む高度な港内操船シ ステムの開発

に定め、全く新しい追従制御型の自動操船システムを開発することを目標とした。

1.4 理論の検証の方法と汎用化

工学的な理論は検証されて初めて実用化される。その意味で、本論文での理論の有効性の 検証の方法として、シミュレーションと実際の船を使った実験を繰り返す方法を採用する。 本論文のシミュレーション、実船実験などに使う供試船はすべて、東京商船大学練習船汐 路丸である。シミュレーションや実験では、制御モデルとして水槽試験の結果得られた、 汐路丸の詳しい非線形モデルを線形化したモデルを使う。

ただし、本船での実験が必ずしも汎用化できないおそれがある。従って、実験結果を汎用 化するため、水槽実験ではなく、これまでの種々の船から得られたデータベースを使って 求められた実験公式による推定操縦モデルを使って実船実験を実施し、本法が他の一般船 への拡張が可能であることを立証する。

1.5 トラッキングシステムのこれまでの研究

この分野における先駆的研究としては、シミュレーションの段階を含め2つの流れがあ る。

第1は、伝統的な古典制御を含む制御理論を応用した流れである。

高井、大津^[1,6]はカルマンフィルタと古典制御理論を駆使し、世界で初めて自動着桟の実 船実験を行っている。この時使われた位置センサーは、光波式である。またカルマンフィ ルタは船位の予測に使っている。舵、スラスタの制御は古典制御則を用いている。この結 果は後のこの領域での研究に拍車を掛けたが、実験対象を1船に絞っているため汎用化が 難しい結果であった。

Holzhüter et al.^[1,7]は、操縦運動モデルを野本モデルとし、カルマンフィルタを使って定常 外乱である潮流影響を推定しつつ航路保持を Linear Quadratic Gaussian (LQG) 理論で行う航路 追従システムを実用化している。このモデルは離散モデルであり、モデル確定を行うため の何らかの試走を必要とする。Mizuno et al.^[1,8]は離散型のモデル規範型制御理論を使って、 航路追従型オートパイロットを開発している。このオートパイロットは航路追従性能に優 れているが、1入力1出力であるので着桟操船には今のところ使えない。そのほかのシス テムは、文献^[1,5]があるが、いずれにしても、航路追従、着桟操船の2つの機能を統一し た理論で扱っているシステムはまだ開発されていない。

一方、詳細な非線形操縦モデルを使って、着桟問題を正司^[1,10]等、岡崎^[1,11]等は、船舶の 位置をある位置から別の位置へ最短時間で移動する操船方法とする方法の探索を、変分法 の2点境界値問題として定式化し、その数値解を Sequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm (SCGRA)法と呼ばれる方法によって求めている。本論でも追従すべき航路モデ ルの1つとして、この方法による解を使用している。

第2は、知的工学的アプローチの流れである。Yamato^[1,12]等は、ニューラルネットワーク 理論を使った自動着桟システムを提案している。このシステムでは、入力を位置、船体方 位、その微分値、風の大きさ、方向とし、出力は、アプローチフェーズでは舵、プロペラ 回転数、バーシングフェーズでは、プロペラの回転数と船首、船尾スラスタとする3層の ニューロンを配置し、Backward Propagation 法により、ニューロンに学習させた結果を制御 に用い、シミュレーションによって検討している。しかしながらこの方法では、学習した モデル内での内挿はともかく領域外の外挿に使えるかどうかに疑問がある。

さらに、きめの細かいニューラルネットワークの構成としては、Yao^[1,13]の行った研究がある。この方法は、シミュレーションの結果から見る限りはかなり有望であるが、使う教師データの良否によってかなりの差が生じることになることが予想されている。

分散型のエキスパートシステムの概念を利用した知識ベースの自動追従、離着桟システム も提案されているが^[1,14]、推論結果を得るまでの計算量が多くなることが懸念され、リア ルタイム制御には今のところ向かない。

1.6 本論文で扱う制御理論と実現性の検討

3

本論文では、1.3 で述べた状況を鑑み、新たに現代の計算機の高速性を生かし(1) 舵のみ を扱う航路追従システム、(2) エンジン、スラスタを使う離着桟システムを含む低速域の 追従問題に対して、Y.C.Ho and Bryson^[1.14]が理論的可能、実現不可能として放棄した可変ゲ インによる最適制御理論(Time Varying Linear Quadratic Control Law; 以後 TVLQC と略する場合 がある。)を主として用いることとした。

この方法を使う利点は、

(1)得られる制御則は制御時間毎に得られる制御則がその場その場の状態に適応した Feedback Gain, Feedforward Gain であり、適応性があること。

(2)(1)に関連して、モデルをその場にあわせて変更することが可能であること。

(3) 多変数制御則が可能であること。

等である。

欠点としては、

(1)高速な計算を必要とする。

(2) 舵角制限等、制御入力への拘束条件を付すことができない。

などである。

(1)の計算機の高速性については、現代ではほとんど問題ではないであろう。

(2)の拘束条件の付加について、Kvam^[1,15]等は、この方法を用いた従来の保針制御、変針 制御を主体としたオートパイロットの設計に際し、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ている。 そして、この実験の成功が、全体を通じて可変ゲインの拡張による追従制御システムの実 現の可能性への動機にもなっている。

1.7 取り扱うトラッキング問題

ここで取り扱うトラッキング問題は、

(1) 舵を使った高速時における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
(2) 舵を使った高速時における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
(3) 舵の効かない低速域における Bow,Stern Thruster、エンジンを使った(1)(2)の問題

(4) 舵、Bow,Stern Thruster、エンジンなどを使った高速領域からの定点停止問題、

等である。ここで高速時とは、海域を安全に航行できる最高速力とし、低速域とは、舵 のみでは満足な船体運動制御を行うことができない速力域とする。

1.8 本論文記述スタイルと構成

論文の記述スタイルを、開発経過に沿って、汐路丸のシステムの改良、理論構築について 述べ、次に各問題設定に対して実船実験の前評価のためのシミュレーション、汐路丸によ る実船実験を繰り返した経過に沿って述べることとし、論文の構成を次のようにした。 第2章では、筆者が中心となって開発した、実験供試船である東京商船大学練習船汐路 丸の実験環境、ネットワークの構成について述べる。

さらに、トラッキング、着桟実験では、正確なリアルタイムの位置情報獲得が重要である ことに鑑み、筆者の開発した Differential GPS の測位精度を向上のためのカルマンフィルタ を使用した航法計算について、その方法、実験の結果などについて述べる。

第3章では、本論文で採用する Time Varying Linear Quadratic Control (TVLQC)法を使うトラッキング法の一般的定式化と制御アルゴリズムを示す。

ただし、アクチュエータに舵角制限のような拘束条件がある場合に望ましい制御は Bang-Bang 制御であるが、TVLQC 法では得られないので、その点を改良するため One Switch Bang Bang Control アルゴリズムを開発した。ここでは、この方法についても言及する。

第4章では、供試船を汐路丸とし、第3章で述べた TVLQC 法を使った高速域のトラッキ ング制御を行う。ただし、トラッキングを行う場合、制御命令を設定針路に行う方法と舵 に直接与える方法があるが、比較のため最初に前者の方法を試す。その方法として指数減 衰関数的に偏差をゼロにする方位を与える制御方式を採用し、シミュレーション・実船試 験を行う。その後、可変ゲインによる TVLQC 法によるトラッキング制御の開発、シミュ レーション・実船実験を行い、両者の比較を行い TVLOC 法の優位性を立証する。

- 次に、TVLQC 法を使って、定常外乱による定常偏差をなくするため、
- (1) 定常偏差を簡単な平均フィルタにより推定し、その結果を利用して目標ルートをシフトさせる方法
- (2)線形操縦モデルに風圧力を含め、制御モデルに風圧力効果を組み込みながら、トラッ キングを行う方法

の2つの除去方法を提案し、それらの比較実験を行う。

また、ここで得られた結果を汎用化するため、水槽試験の結果ではなく Clark の推定式と 呼ばれる流体微係数推定法によって本船の操縦性能を推定し構築した線形操縦モデルを使 用し、TVLQC 法によるトラッキング制御を行った結果を示し、その汎用性を調査する。

最後に、希望する設定出力に船首角速度を設定することにより、TVLQC法によって角速 度を制御するオートパイロットや、トラッキング制御への応用についても言及し、将来の 高度な操船に備える。

第4章では、低速域でのTVLQC法によるトラッキングシステムを開発する。この制御に は、低速域においては舵による制御は困難であるため、新たにバウスラスタ(B/T)を使っ た制御を用いる。本章においても、汐路丸を対象にシミュレーション、実船実験を繰り返 し、その有効性を確かめる。

第5章では、定点定姿勢停止操船(着桟操船)を目標に、任意の点に高速で進入してき た船を減速させつつ、希望航路に沿って停船させる操船をTVLQC法を使って行った結果 を示す。このモードは舵・エンジン操作が使えるアプローチステージと舵・エンジンの他、 バウ、スタンスラスタを使う最終操船段階であるバーシングステージに分けて制御を行う。 この際、操縦線形モデルは、船速により大きく変化するが、着桟予定点までの距離に応じ て使用する線形モデルを切り替えて用いる。アプローチ操船ではTVLQC法を使うが、着

5

桟予定点付近でのバーシング操船では、TVLQCによる方法、指数関数を利用した方法に 加えウェザーベーン型(WVDPS)制御法と呼ばれる風をうまく操船に利用した操船法を利 用した方法の、3つの方法で停船させることを試みる。

1.9 結言

本章では、本論文で取り扱う問題の必要性、実現性、本論文の目的、理論の検証法、本論 文に関連するこれまでの研究、本論文で用いる制御理論、問題設定に関して言及し、最後 に本論文記述スタイルと構成について述べた。その結果

- (1)本論文のテーマであるトラッキングシステムは、第2世代に入った船舶の運航形態 からみても、また、現在の内航船の船員不足の実情から見ても必要であることを確認 した。
- (2)本論文で取り扱うトラッキングシステムの実現性について検証した結果、GPSの 発展、計算機の高速化などの基盤技術の発展からみて、実現性が十分あることがわか った。
- (3)(1)、(2)の結果を踏まえ、本論文の目的を、
 - ①任意に与えられた航路をできる限り追従できる舵を使ったトラッキングシステムの開発
 - ②舵に加え、エンジン、スラスタを使用した自動着桟を含む高度な港内操船システムの開発

に定めた。

- (4)本論文では、本学の練習船汐路丸を対象としてシミュレーションと実船実験を繰り 返すことにより、構築したシステムの検証を行うこととした。
- (5)本論文で使う基本的理論を Y.C.Ho による Time Varying Linear Quadratic Control (TVLQC) 法に定め、その実現性を検証した。
- (6) ここで取り扱うトラッキング問題を
 - ①舵を使った高速領域における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
 - ②舵を使った高速領域における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
 - ③舵の効かない低速域における Bow, Stern Thruster、エンジンを使った(1)(2)の問題
 - ④ 舵、Bow, Stern Thruster、エンジンなどを使った高速領域からの定点停止問題等である。

に定めた。

(7)論文の記述スタイルは開発経過に沿って、汐路丸のシステムの改良、理論構築について述べ、次に各問題設定に対して実船実験の前評価のためのシミュレーション、汐路丸による実船実験を繰り返した経過に沿って述べることとした。

参考文献

- [1.1] 杉崎昭生:陸上支援システム、航法システムシンポジウム, pp.37-65, 1985
- [1.2] 藤原義則:内航船における IBS の動向、日本航海学会誌、第 116 号, pp.32-39, 1993
- [1.3] 小山健夫:外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究、造船協会論文集、第 111 号、1967
- [1.4] 日本造船学会:第3回操縦性シンポジウム、1981
- [1.5] 大津皓平、織田博行、飯田隆:船舶の運動制御システムの高度最適化への挑戦, pp.45-91, 1997
- [1.6] 高井忠夫 他: 汐路丸による自動離着桟実験について、日本航海学会論文集第 83
 号, pp.267-276, 1990
- [1.7] Holzhüter and Strauch, H. : A Commercial Adaptive Autopilot for Ships: Design and Experimental Experience, Proceed.10th TFAC World Congress, Munich, 1987
- [1.8] Mizuno, H., Okawa, T. et al : Route Tracking System by Adaptive Autopilot, Proc. of CAMS'89, Copenhagen, 1989
- [1.9] 正司公一、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, pp.365-373, 1994
- [1.10] 岡崎忠胤:最短時間自動着桟操船に関する研究、名古屋工業大学博士論文、1998
- [1.11] Yamato, H. et al : Automatic Berthing by the Neural Controller, Porc. of the Ninth Ship Control Systems Symposium, Washington D.C., 1990
- [1.12] Yao Zhang, Grant E. Hearn, and Pratyush Sen : A Neural Network Approach to Ship Track-Keeping Control, IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol.21, pp.513-527, 1996
- [1.13] 高井忠夫、大和裕幸:第4章 離着桟操船の自動化、日本造船学会運動性研究委員会・第8回シンポジウム, pp.89-111, 1991
- [1.14] A.E.Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho: Appried Optimal Control, Optimization, Estimation and Control, Hemishpere Publishing Corpolation, 1975
- [1.15] K.Kvam; Optimal Ship Maneuvering Using Bryson and Ho's Time Varying LQ Controller, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2000

第2章 シミュレーションモデルと実験環境

2.1 緒言

この論文の目的は、第1章で述べたように、船舶のトラッキング問題や着桟問題などの実際的な問題に対して線形モデルを仮定し、TVLQC法と呼ばれるひとつの制御理論でこれらの問題を実証的に解決することである。したがって開発研究手法は、対象とする船舶を定め、理論モデルと制御法を構築し、シミュレーション、実船実験を経て問題点抽出、それらの改善、シミュレーション・・・を繰り返すことになる。このようなプロセスを短期間の間に能率的に行うためには、まず対象とする船舶を知り、能率的な実験環境を整え、対象船に制御を加えた時、どのような挙動を示すかあらかじめできるだけ正確なシミュレーションによって前評価しておくことは大切なことである。

そこで、まずはじめに、供試船である東京商船大学練習船汐路丸の運動の特徴を述べ、著 者が中心となって開発した、本船を対象に構築した実船制御・計測用ネットワークなどの 構成について述べる。

次に、制御の良否の前評価のために使った、汐路丸の詳しいシミュレーションモデル (MMG モデル)について述べる。

また、本論文で重要な働きをする船位情報入力センサーとして DGPS を使用した。しか しながら DGPS の信号には時にパルス状の雑音が混入することなどから、トラッキングな どに使用するにはフィルタリングが必要であることが明らかになった。そこで、最後に著 者が開発した航法計算用測位フィルタリングについて述べる。

2.2 供試船の実験環境と制約

汐路丸は、昭和 62 年に学生の訓練、船舶の制御実験、海洋観測、海上交通の調査等の調査研究のために設計された。Table 2.1 に汐路丸要目表を示す。本船は可変ピッチプロペラ(CPP)と船体に比較して大きな舵、可変ピッチプロペラのバウスラスタとウォータジェット噴射のスタンスラスタを装備している。

Length	Over all 49.93 [m]	Lpp 46.0 [m]	
Breadth	10.00 [m]		
Depth	3.80 [m]		
Draft of Designe	3.00 [m]		
Gross Tonnage	425 [ton]		
Main Engine	1400 [PS] 700 [r.p.m]		
Service speed	12 [knots]	Crusing Range	3200 [mile]
Bow Thruster	2.4 [ton]	Stern Thruster	1.8 [ton]

Table 2.1 汐路丸要目表

汐路丸には、船舶の調査研究や実船実験のために、種々のセンサとアクチュエータ が装備されている。本論文に関連する主なシステムを以下に記述する。

- ●船首方位はジャイロコンパスによって計測され、最終的には電圧に変換され計算機 にアナログ入力ができる。
- 汐路丸の位置計測には、GPS が最も精度よく使われる。この GPS は単独測位、DGPS、 RTK-GPS の3つのシステムが使用できる。本 DGPS は±5[m]以内の誤差があるが、 東京湾全域で使用可能である。RTK-GPS は千葉県館山市坂田に設置された小電力の 基準アンテナからの補正情報を受信することにより使用可能であるが、信号受信エ リアが館山湾内の一部海域に限られている。
- ●前後速度 U は上記 GPS あるいは、電磁ログによって計測する。
- ●風向風速は、風速計によって計測され、真風向、真風速を得ることができる。
- ●スウェイ、ヒーブ、ヨーに関しては、船内研究室にある船体運動総合測定装置によって、計測可能であるが、この論文で使用しているサージ,スウェイは GPS から得られた位置情報より、Fig. 2.1 のように船首方向成分と正横方向成分に分解し、それぞれをサージ,スウェイとしている。ヨーレートはジャイロコンパスの方位変化から求める計算をする。



Fig. 2.1 サージとスウェイの計算

アクチュエータに関しては、

● 舵角信号は、転舵速度 4.6 [deg/s]で、最大舵角± 35 [deg]まで取ることが可能である。 ここでは、安全を考慮して、船速に応じて、最大舵角を次のように制限する。

		$U \ge 10$ [knots]	±	10 [deg]
10 [knots]	\rangle	$U \geq 7 [knots]$	±	15 [deg]
7 [knots]	\rangle	$U \geq 5 [knots]$	±	20 [deg]
5 [knots]	>	U	±	35 [deg]

- ●推進力は、可変ピッチプロペラ(CPP)を経由して制御可能である。CPPの変化速度は前進時は 3.4 [deg/s]、CPP 翼角制限は+15 [deg]から-5 [deg]まで設定することができる。ただし、対水速力 3 [knots]以上の時は、構造上の理由から翼角がマイナスにならないよう設定する必要がある。
- ●バウスラスタ(B/T)は可変ピッチプロペラで± 15[deg]まで指令値を出すことが可能である。
- ●スタンスラスタ(S/T)はウォータージェット方式で、-1000[r.p.m.]から+1000[r.p.m.] まで指令値を出すことが可能である。
- ●ウォータージェットポンプを使用しているスタンスラスタの左右切り替え時は、弁の損傷を防ぐため、数秒のインターバルを必要とする。
- ●バウスラスタ、スタンスラスタとも、運航上の都合から、3[knots]以下で使用しなければならない。また、発電機に過負荷が掛かるためバウスラスタとスタンスラスタを制限値一杯で、同時に長時間使用してはならない。

2.3 汐路丸のデータ収集ネットワークシステム

汐路丸で計測される上記のデータ及び出力信号は、建造時 YEWMAC システムと呼ば れる LAN が張られており、船体運動の情報の収集と操船のため舵、CPP 等の出力が 可能であった。しかし、いろいろな制御アルゴリズムを実現するには、YEWMAC の 計算機は処理速度が遅い。そこで、著者は他の実験者が汐路丸を使用した実験を行え ることなども考慮して、Fig. 2.2 のような実験データ収集用ローカルエリアネットワー クシステム(LAN)を構築した。

ここで用いた、信号入出力サーバと制演算用 PC 等を結ぶ基本 LAN システムは、 ARCNET (Attached Resource Computer Network)プロトコルによるネットワークシステムで ある。ARCNET (Table 2.2) とは、1977 年に米国 Datapoint 社によって提唱されたトーク ンパッシング・プロトコルのローカルエリアネットワークである。特徴として、ネッ トワークへのアクセス最大待ち時間が規定され、この待ち時間が算出可能である。

この LAN を使うと、実験者は、Fig. 2.2 に示すように制御演算用 PC で制御用のプロ グラムを実行することとなる。すなわち、この制御用入出力サーバシステムを使うと、 船首角等各センサーからの入力信号をシステムの LAN 内に送信するとともに、LAN で接続された PC から送信された出力信号を使って、舵等のアクチュエータを動かす ことができる。

また、著者は大学の研究室にも基本的に汐路丸と同じネットワーク環境を構築する ことによって、実船実験がスムーズに行えるようにした。

かくして、実験者が使用している計算機環境のままで、シミュレーション、実船実 験、極めて能率的を行うことが可能となった。

Table 2.2 ARCNET 基本仕様

	仕様
転送速度	2.5Mbps (1bit/400nS)
最大ノード数	255 ノード/1 ネットワーク
パケットサイズ	1~253 バイト(ショート)/257~508 バイト(ロング)
1ネットワークの最大延長	6.4km
距離	(内部タイムアウト設定により拡張可能)
伝送媒体	93 Ω同軸ケーブル
	ツイストペアケーブル
	光ファイバーケーブル

2.4 制御周期

このようにして構築した LAN における制御用入出力サーバのサンプリング間隔は、 サーバのソフトウェアにより調節することが可能であるが、位置情報として使用する DGPS (Differential GPS)受信機からの信号のサンプリング間隔は 1.0 [sec] と 0.5 [sec] の 2 通りを選択するしかない。

本論文で行った実船実験では、DGPS サンプリング間隔を 1.0 [sec]とし、制御用入出 カサーバのサンプリング間隔も 1.0 [sec]とした。



Fig. 2.2 実船実験システム構成図

2.5 シミュレーションに用いた操縦運動数学モデル

実船実験に入る前に、シミュレーションを行って効果を確かめる必要がある。ここではそのモデルとして、次のような MMG モデルを採用した。MMG モデルとは日本造船学会運動性能委員会「操縦運動の数学モデル検討グループ」(Mathematical Model Group of Maneuvering Motion: MMG)により提案された数学モデルを基にした非線形運動モデルである^[21]。 まず、用いる船体固定の運動座標系を Fig. 2.3 に示す。



Fig. 2.3 船体固定の運動座標系

そして、基本操縦モデルを $m(\dot{u} - vr) = X_H + X_P + X_R + X_w$ $m(\dot{v} + ur) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_w$ $I_{zz}\dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_T + N_w$

(2.1)

とする。ここで、 u, v:船体前後・横方向の速度 [m/s] :船体回頭角速度 [1/s] r :質量「 $kg \cdot s^2/m$] т : z 軸回りの慣性モーメント [*kg*·*s*²/*m*] I_{zz} X_{H}, X_{P}, X_{R} :船体前後方向に作用する、船体、プロペラ、舵による流体力 [kg] Y_H, Y_P, Y_R, Y_T :船体横方向に作用する船体、プロペラ、舵、スラスタによる 流体力 [kg] N_H, N_P, N_R, N_T : 旋回に作用する船体、プロペラ、舵、スラスタの流体力によ $\Delta E - X > F [kg \cdot m]$ X_w, Y_w, N_w :船体固定座標上x方向、y方向の風圧力 [kg]、風圧モーメ $> \vdash \lceil kg \cdot s^2/m \rceil$

である。

【船体流体力】

船体流体力は、水槽実験より得られた各流体微係数を利用し、以下の式で表す。

$$\begin{split} X_{H} &= -m_{X}\dot{u} - \frac{1}{2}\rho S_{w}C_{D}\left|u\right|u + \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^{2}\left(X_{|v|}'\left|v'\right| + X_{vr}'v'r' + X_{|r|}'\left|r'\right| + X_{vv}'v'v' + X_{rr}'r'r'\right) \\ Y_{H} &= -m_{y}\dot{v} + \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^{2}\left(Y_{v}'v' + Y_{v|r|}'v'\left|r'\right| + Y_{r}'r' + Y_{v|v|}'v'\left|v'\right| + Y_{r|r|}'r'\left|r'\right|\right) \\ N_{H} &= -J_{zz}\dot{r} + \frac{1}{2}\rho L_{pp}^{2}dU^{2}\left(N_{v}'v' + N_{|v|r}'\left|v'\right|r' + N_{r}'r' + N_{v|v|}'v'\left|v'\right| + N_{r|r|}'r'\left|r'\right|\right) \end{split}$$
(2.2)

但し、

$$m_{x}, m_{y}$$
 : 付加質量 [$kg \cdot s^{2}/m$]
 J_{zz} : 付加慣性モーメント [$kg \cdot s^{2}/m$]
 C_{D} : 直進時の船体抵抗係数
 S_{w} : 浸水面積 [m^{2}]
 ρ : 海水密度 [$kg \cdot s^{2}/m^{4}$]
 L_{pp} : 垂線間長 [m]

d : 喫水 [m]
U : 船速 [m/s] (
$$U = \sqrt{u^2 + v^2}$$
)
v',r' : u,v の無次元量 ($v' = v/U,r' = rL_{pp}/U$)
 $X'_{|v|}, X'_{vr}, X'_{|r|}, X'_{vv}, X'_{rr}$: 前後方向の船体流体力微係数の無次元値
 $Y'_{v}, Y'_{v|r|}, Y'_{r}, Y'_{v|v|}, Y'_{r|r|}$: 横方向の船体流体力微係数の無次元値
 $N'_{v}, N'_{|v|r}, N'_{r}, N'_{v|v|}, N'_{r|r|}$: 旋回方向に作用する船体流体力微係数の無次元値

低速航行中の船体流体力は以下の式で表す。

$$\begin{split} X_{H} &= -m_{x}\dot{u} - \frac{1}{2}\rho S_{w}C_{D}u^{2} + \frac{1}{2}\rho L_{pp}d\left(X_{|v|}|v| + X_{|r|}|r| + X_{vr}vr + X_{vv}vv + X_{rr}rr\right) \\ Y_{H} &= -m_{y}\dot{v} + \frac{1}{2}\rho L_{pp}d\left(Y_{v}v + Y_{r}r + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|r|}r|r| + Y_{|v|r}|v|r + Y_{v|r|}v|r|\right) \\ N_{H} &= -J_{ZZ}\dot{r} + \frac{1}{2}\rho L_{pp}^{2}d\left(N_{v}v + N_{r}r + N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{|v|r}|v|r + N_{v|r|}v|r|\right) \end{split}$$
(2.3)

【プロペラカ】

プロペラ推力:推力 X_Pは、広い範囲での最適制御解を求める際の扱いを簡単にするため 実験結果を多項式モデルに変形した形で表す。

$$X_{\rho} = (1 - t_{P})\rho n^{2}D^{4} \left(C_{0} + C_{1}\theta_{P}' + C_{2}J_{P} + C_{3}\theta_{P}'J_{P} + C_{4}\theta_{P}'^{2} + C_{5}J_{P}^{2} + C_{6}\theta_{P}'^{2}J_{P} + C_{7}\theta_{P}'J_{P}^{2} + C_{8}\theta_{P}'^{3} + C_{9}J_{P}^{3}\right)$$

$$(2.4)$$

但し、

$$t_P$$
 : 推力減少率
 n : プロペラ回転率 $[1/s]$
 D_P : プロペラ直径 $[m]$
 θ'_P : 補正されたプロペラピッチ角 $(\theta'_P = \theta_P - C_{T0})$
 C_{T0} : プロペラピッチ角の補正定数
 $C_0 \cdots C_9$: プロペラ推力係数の実験係数
 J_P : プロペラ前進常数 $(J_P = ((1-w_P)/nD)u)$
 w_P : プロペラ位置での有効伴流係数

第2章 シミュレーションモデルと実験環境

 $なお、<math>Y_P, N_P$ は、微小値として省略する。

【舵力】

舵により作用する流体力は、以下の形で表す。

$$X_{R} = -(1-t_{R})F_{N}\sin\delta$$

$$Y_{R} = -(1+\alpha_{H})F_{N}\cos\delta$$

$$N_{R} = -(x_{R}+\alpha_{H}x_{H})F_{N}\cos\delta$$
(2.5)

但し、

t_R	: 舵抵抗減少率
$lpha_{_H}$:船体に作用する舵の干渉力を表す係数
x_R	: 舵軸の x 座標 [<i>m</i>]
x_{H}	:船体に作用する舵の干渉率の中心 [m]
F_{N}	: 舵力 [kg]

また、舵力は、

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_R^2 \sin\left(a_R\right) \tag{2.6}$$

とする。なお、舵への有効流入速度: U_R と有効流入角: α_R は、CPP船であることから、

$$U_{R} = (\varepsilon - k_{x})(1 - w_{P})u + k_{x}(0.7\pi D_{P}n)\tan\theta_{P}$$
(2.7)

$$\alpha_R = \delta + \tan^{-1} \frac{\gamma_R \left(\nu' + l_R r' \right)}{U_R'}$$
(2.8)

とする。但し、

$$(\varepsilon = (1 - w_R) / (1 - w_P))$$

- *l_R*: 舵位置の有効流向に及ぼす旋回角度の影響を横流れ速度に換算する係
 数
- k_x : 舵位置における速度減速率

なお、アクチュエータの舵は、正司等^[21]の変化速度一定となる1次遅れ応答モデルとする。

$$\dot{\delta} = \frac{\delta^* - \delta}{\left|\delta^* - \delta\right| T_{\delta} + a} \tag{2.9}$$

但し、

また、CPP は、CPP の急激な変化により発生する機関への負担を考慮し、CPP 変化速度 に制限を設けた以下のモデルとする。

$$\ddot{\theta}_{P} = \frac{\theta_{P}^{*} - \theta_{P} - \dot{\theta}_{P} T_{lP}}{T_{lP} \left(\left| \theta_{P}^{*} - \theta_{P} - \dot{\theta}_{P} T_{lP} \right| T_{\theta P} + a \right)} - \frac{\dot{\theta}_{P}}{T_{lP}}$$

$$(2.10)$$

但し、

θ^{*}_P : 指令 CPP 角
 θ_P : CPP 角
 T_{θP} : CPP 応答の時定数 [s]
 T_{IP} : CPP 変化速度制限の係数

スラスタは実務を考慮し、船速3[knots]以下で使用しなければならない。よって、 船速によるスラスタ推力への影響は小さい。そこで、船速によるスラスタ推力の変化 は考慮せず、以下の形で表す。

$$Y_T = T_B \theta_{P,bth} + T_S \theta_{sth}$$

$$N_T = T_B x_B \theta_{P,bth} + T_S x_S \theta_{sth}$$
(2.11)

$T_{\scriptscriptstyle B}$:バウスラスタ推力[kg/deg]
T_{S}	:スタンスラスタ推力[kg/rpm]
$ heta_{P,bth}$: バウスラスタ翼角[deg]
θ_{sth}	:スタンスラスタウォータジェットポンプ回転数[r.pm]
x _B	: バウスラスタの x 座標 [m]
x _s	:スタンスラスタの x 座標[m]

Fig. 2.3 に示した運動座標系を考え、風の影響として、風圧力と風圧モーメントを船体固定座標系の相対風速 Uw と相対風向 αの関数として以下の式で表現する。

$$X_{w} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{of} U_{w}^{2} C_{X}^{\prime} \cos \alpha$$

$$Y_{w} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{os} U_{w}^{2} C_{Y}^{\prime} \sin \alpha$$

$$N_{W} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{os} L_{pp} U_{w}^{2} C_{N}^{\prime} \sin 2\alpha$$
(2.12)

ここで、

Xw,Yw,Nw	: 船体固定座標上 x 方向、y 方向の風圧力、風圧モーメント
C'_X, C'_Y, C'_N	:船体固定座標上 x 方向、y 方向の風圧力係数、風圧モーメン
	ト係数
Aof,Aos	: 正面および側面風圧投影面積
ρΑ	:空気の密度

なお、各風圧係数は、相対風向の関数としてフーリエ級数展開し、基本周波数のみにより 関数近似する。対象船舶の各風圧係数は Fig. 2.4 の丸印で示され、それらの点を実線のよ うに近似する。この図において、相対風向は船首からの風を 0 [deg]とし、反時計回りを 正とし、船尾からの風を 180 [deg]とする。

なお係数の具体的な値は、Appendix A にまとめて記述した。

18







Fig. 2.4 風圧力係数

2.6 カルマンフィルタによる位置推定

本節では、GPSによって得られた位置情報からの状態量の推定のため、著者の開発した 航法計算用フィルタについて述べる。

DGPS より得られた位置は、突然 10[m]から 15[m]程度移動したかのように計測される ことがある。そこで著者は位置の推定に次のようなカルマンフィルタを用いて、位置 の推定を行い実船実験に用いた^[24]。



Fig. 2.5 軌跡推定問題

まず、位置計測情報の推定を2次元平面内を運動する航行物体の軌跡推定問題とし て定義する。すなわち、時刻 t_kにおける航行物体の推定位置を(x (k),y (k))、推定速度 を(v_x (k),v_y (k))、推定加速度を(a_x (k),a_y (k))とし、初期条件(x (0),y (0),v_x (0),v_y (0),a_x (0),a_y (0))は既知とする。また、加速度はガウス分布 w_k (平均値ベクトル 0₂、共分散行列) によってランダムに変動するとし、GPS によってその位置がサンプリング時間 ΔT 毎 に、ガウス白色雑音 v_k (平均値ベクトル 0₂、共分散行列)を伴って観測されるものと する。だたし、{w_k} と {v_k} は確率的に独立とする。

カルマンフィルタを適用するためには、まず問題のシステムを状態空間表現で表現 しなければならない。状態ベクトルを

$$X_{k} = \left[x(k), y(k), v_{x}(k), v_{y}(k), a_{x}(k), a_{y}(k)\right]^{T}$$
(2.13)

と定義し、次の関係式

$$x(k+1) = x(k) + v_x(k)\Delta T + a_x(k)\Delta T^2 / 2$$

$$y(k+1) = y(k) + v_y(k)\Delta T + a_y(k)\Delta T^2 / 2$$
(2.14)

$$v_x(k+1) = v_x(k) + a_x(k)\Delta T$$

 $v_y(k+1) = v_y(k) + a_y(k)\Delta T$
(2.15)

とすれば、船体軌跡は次のような状態方程式と観測方程式からなる状態空間システ ムによって表現することができる^[22]。

$$X_{k+1} = FX_k + GW_k$$

$$Y_k = HX_k + V_k$$
(2.16)

ただし、

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$Y_{k} = \begin{bmatrix} x(k), & y(k) \end{bmatrix}^{T}, W_{k} = \begin{bmatrix} w_{1}(k), & w_{2}(k) \end{bmatrix}^{T}, V_{k} = \begin{bmatrix} v_{1}(k), & v_{2}(k) \end{bmatrix}^{T}$$
(2.17)

状態ベクトル Xk の最小分散推定量を求めると、次のカルマンフィルタアルゴリズムが得られる。

$$\begin{split} \widehat{X}_{k|k} &= \widehat{X}_{k|k-1} + K_{k} \left(Y_{k} - H_{k} \widehat{X}_{k|k-1} \right) \\ \widehat{X}_{k+1|k} &= F_{k} \widehat{X}_{k|k} \\ K_{k} &= \widehat{P}_{k|k-1} H_{k}^{T} \left(I_{2\times 2} + H \widehat{P}_{k|k-1} H^{T} \right)^{-1} \\ \widehat{P}_{k|k} &= \widehat{P}_{k|k-1} - K_{k} H_{k} \widehat{P}_{k|k-1} \\ \widehat{P}_{k+1|k} &= F_{k} \widehat{P}_{k|k} F_{k}^{T} + \frac{\mathcal{O}_{W}^{2}}{\mathcal{O}_{V}^{2}} \Lambda \end{split}$$

$$(2.18)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \widehat{X}_{0|-1} &= \overline{X}_{0}, \ \hat{P}_{0|-1} = \Sigma_{x0} / \sigma_{\nu}^{2} \\ \Lambda &= GG^{T} = diag \left\{ 0, \ 0, \ 0, \ 0, \ 1, \ 1 \right\}, \ I_{2\times 2} = diag \left\{ 1, \ 1 \right\} \end{aligned}$$
(2.19)
ここで、diag {*} は*を対角成分とする対角行列を示す。 $\widehat{X}_{k|k-1}, \widehat{P}_{k|k-1}$ の初期値は、 $\widehat{X}_{0|-1} =$

0₆, *P*_{0|-1} = εoI_{6×6}, εo > 0, ここで 0₆ は 6 次元の 0 ベクトル、I_{6×6} は 6 次元の単位行列を意味する。 このとき、雑音の分散値 o²₆/o² (以下分散比と呼ぶ)が最終的に未知パラメータとし て残る。

航行物体の位置推定は上式の推定結果を用いて、次のように逐次得られる。

$$\widehat{Y}_{k} = \begin{bmatrix} \widehat{x}(k) \\ \widehat{y}(k) \end{bmatrix} = H \widehat{X}_{k|k}$$
(2.20)

残された未知パラメータの決定のため、雑音の分散比(*d*_{*}/*d*^{*})の形で、適切な値を シミュレーションと、実船実験により決定し、8×10⁶が最適な値として用いた^{[23],[24],}



Fig. 2.6 カルマンフィルタを使用した場合と使用しなかった場合の位置プロット図
Fig. 2.6 は、浦安沖で行ったカルマンフィルタによる位置推定のための実験結果で、
本フィルタにより、滑らかな位置情報が得られていることがわかる。

2.7 転心への座標変換

本論文では、トラッキングの制御点として船の転心(船首先端から約 1/3L 手前)を採用 し、この点を制御よって、希望位置に一致させることを目標とした。このため船体位置を 転心とした場合、DGPSによって得られた位置を船体転心位置に補正する必要がある。 Fig. 2.7 において、船体上の転心の緯度を φ、経度を λ、とする。アンテナの緯度経度を (φ1,λ1)アンテナ位置と転心との船首尾線方向距離を x1、正横方向距離を y1 とする。この とき、転心位置(φλ)は式(2.21)から求められる。

$$\phi = \phi_1 - (x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta) / R_m (\phi_1)$$

$$\lambda = \lambda_1 - (x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta) / R_p (\phi_1)$$
(2.21)



Fig. 2.7 アンテナ位置の補正

ここで、 θ は船の針路、 $R_m(\phi_l)$ は緯度 ϕ_l における地球の子午線半径、 $R_p(\phi_l)$ は緯度 ϕ_l における地球の距等圏半径である。

子午線半径と距等圏半径は次の式で求める。

$$Rm(\phi_{1}) = a(1-e^{2})(1-e^{2}\sin^{2}(\phi_{1}))^{-\frac{3}{2}}$$

$$Rp(\phi_{1}) = a\cos(\phi_{1})(1-e^{2}\sin^{2}(\phi_{1}))^{-\frac{1}{2}}$$
(2.22)

ここで、aは地球準拠楕円体長半径、eは離心率である。

制御プログラム中では、地球を Bessel 楕円体として計算する。長半径と離心率を下の表 に示す。 Table 2.3 位置を求める際に利用した準拠楕円体のデータ

	長半径 a [m]	短半径 b [m]	離心率 e
Bessel	6377397	6356079	0.081697

2.8 結言

本論文では、トラッキング制御、着桟制御などへの実証試験に対して、東京商船大学付属 練習船汐路丸を実験供試船に定め、シミュレーション、実験を繰り返すため、まず供試船 の実験設備のネットワークによる実験の効率化、詳しい汐路丸モデルを使ったシミュレー ションによる実験の前評価を実施し、理論の検証を効率的に行う方針を建てた。

本章ではまず、著者がこれらの実験などの効率化のために開発した汐路丸のデータ入出力 システムネットワーク化、シミュレーションモデル、位置推定フィルタなどについて述べ た。

この結果、

- (1)これまでの汐路丸のデータ入出力システムの欠陥であったプログラミング言語の制約、制御遅延などの問題を、入出力サーバが入出力信号を一括に管理することによって、実験者の信号入出力に対する労力を軽減し、Windows環境で実行可能な全ての言語を使用可能とするとともに、計算速度を飛躍的に高め、実験環境の効率化が図れた。
- (2)陸上の研究室での実験環境を整えるため、汐路丸の実験環境と同じ環境を陸上の研 究室に構築した。
- (3)上記システムのネットワーク環境により、本論文で用いる制御理論の制御周期を DGPSの最高受信周期と同期させ、1.0[sec]での間隔で実施することを可能とした。
- (4) 汐路丸の詳細な非線形操縦運動モデルを作り、作成した制御理論の実船実験の確実 性をできる限り保証する前評価法を確立した。
- (5) DGPS から得られた位置情報を利用して、船位推定を行うためのカルマンフィル タを用いた位置推定アルゴリズムを開発し、DGPS 信号に現れる位置情報の平滑 化に成功した。

などの結果を得た。

参考文献

- [2.1] 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, pp.365-373, 1994
- [2.2] 中野道雄、西山清、"パソコンで解くカルマンフィルタ"、丸善株式会社、1993
- [2.3] 西周次 "カルマンフィルタの航法への応用 -線形フィルタの原理と応用-"、日本航海学会 誌 52 号, pp.31-39, 1977
- [2.4] 福田人意、金城智仁、大津皓平、小山健夫、"船位偏差推定フィルタ-ディファレンシャル GPS を用いた推定方法の開発-"、電子情報通信学会, pp.2220-2226, 2001
- [2.5] 今村智之、"船舶の自動着桟システム構築に関する研究"、東京商船大学修士論文、1999

第3章 船体運動制御のための連続型線形ターミナル制御理論

3.1 緒論

本章においては、本論文で用いる制御理論について述べる。本論文では、与えられた問題 を連続型線形状態空間表現によって定式化し、Y.C.Hoの提唱した可変ゲイン型制御法に よって制御を実行した。この方法は、有名な Bryson and Hoの'Applied Optimal Control'^[31]にお いて述べられたものの、当時は計算機の速度の関係で「理論上可能、実行上不可能」とし て使われなかったもので、Ho博士の引退記念論文集の中で、Brysonが実行可能とし蘇ら せた理論である。

多くの線形制御理論の中から本法を選択する理由は、

(1)計算機の高速化が進み、制御周期毎のゲイン計算が可能となったこと^[32]

- (2) 制御則に Feedback Gain と Feedforward Gain が現れ、制御の確実性が予想されること
- (3)終端条件が指定できること
- (4) 可変ゲインであるので、終端時間を短くすることによりモデルの途中の切り替えが 可能であること

などである。

しかしながら欠点として、制御アクチェータに制約条件が課せられないことから、

- (1)制御器に過剰負荷をかけること
- (2) Bang-Bang 制御則が得られないこと

などがある。Kvam^[33],大津・Kvam^[34]はこの点を改良し、One Switch Bang Bang アルゴリズム を開発している。

本章では、これらの理論を述べる。なお、記述は後の定式化に柔軟に対応するため、操縦 運動を一般的な線形システム理論として記述し、具体的な操縦運動モデルの設定は、次章 以下で行う。

3.2 Time Varying Linear Quadratic Control (TVLQC)

船舶の連続型線形制御モデルは、一般に状態空間表現

 $\dot{x} = Ax + Bu$

が可能であることはよく知られている(Fossen^[35],大津他^[34])。ここで、*A,B*は状態行列と する。ここでは、まずこのことを仮定し、Ho博士による可変ゲイン型制御理論について 述べる。

本方法では、このシステムのターミナルにおける条件を

 $x(t_0) = x_0, \ e_f \cong M_f x(t_f) - \Psi$

と表現する時、Table 3.1 に示す最適制御問題を解く問題が扱える。ここで、to は初期時間、tf

は状態量 x が指定された終端状態量 Ψの近傍になるときの時間で指定されているものと する。ef は時間 tf におけるシステムの状態量と指定された終端状態量の誤差である。Ψとx (tf)の要素が異なる場合、Mf によって調整する。

この場合、

(1) この解法を定値問題に応用すれば、操縦系の保針問題を解くことができる。

(2) この解法を追従問題に応用すれば、操縦系の軌道追跡(トラッキング)問題を解 くことができる。

ことは明らかである。

可変ゲイン型と呼ばれる由縁は、以下に述べる計算を制御時間毎に繰り返して用いる時に Feedback Gain と Feedforward Gain が同時に得られるからである。

初期条件	終端条件	初期時間	終端時間
固定			固定
自由	—	_	固定
固定		-	自由
自由	_	_	自由
_	固定	固定	_
_	自由	固定	—
	固定	自由	
_	自由	自由	

Table 3.1 ターミナル問題の組み合わせ

3.2.1 制御開始状態と終端条件のみが与えられている場合の軌道自由問題の解

まず、線形ターミナル制御モデルを、

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.1}$$

$$x(t_0) = x_0, \ e_f \cong M_f x(t_f) - \Psi$$
(3.2)

のように表し、このシステムの軌道自由、初期条件・終端条件・終端時間固定問題を考え る。

ここでは上記システムの制御を評価するため、評価関数として次のような関数を考える。

$$J = \frac{1}{2} e_f^T Q_f e_f + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[x^T Q x + u^T R u \right] dt$$
(3.3)

ここで

$$Q_{f}^{-1}$$
: $\left[e_{fi}(t_{f})\right]^{2}$ の許容値の対角行列
 Q^{-1} : $T_{xi}\left[x_{i}(t)\right]^{2}$ の許容値の対角行列

$$R^{-1}$$
: $T_{ui}[u_i(t)]^2$ の許容値の対角行列

とする。

但し、T_{xi},T_{ui}は希望する減衰時間で、設計者が指定する。

この問題(Bolza 問題)を変分法で解くため、次のようなハミルトン関数

$$H = \frac{1}{2} \left(x^T Q x + u^T R u \right) + \lambda^T \left(A x + B u \right)$$
(3.4)

を考える。λはラグランジェ乗数である。上記問題をこのハミルトン関数の最小問題とし て考えるとき、その問題はオイラー・ラグランジェ方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix}$$
(3.5)

を2点境界条件

$$x(t_0) = x_0 , \quad \lambda(t_f) = M_f^T Q_f \left[M_f x(t_f) - \Psi \right]$$
(3.6)

のもとで解く、2点境界値問題に帰結する。 この時、得られる解は、制御則

$$u = -R^{-1}B^T\lambda$$

である。この問題の解法としては

1. 遷移マトリクス法

2. リッカチ方程式を後進方向に解く方法

の2つがある。計算機制御を考えるとき、後者が有利である。従って、ここではリッカチ 法を用いる。

この方法では、λを拘束条件式(3.6)を考慮して、

$$\lambda(t) = S(t)x(t) + g(t) \tag{3.7}$$

の形で求める。ここで、 $S(t_f) = M_f^T Q_f M_f$, $g(t_f) = -M_f Q_f \Psi$ である。S(t), g(t) を求める方程式を得るため、式を時間に関して微分すると、

$$\dot{\lambda} = \dot{S}x + S\dot{x} + \dot{g} \tag{3.8}$$

を得る。この式に式 (3.5)を代入し、式 (3.7)を使ってλを消去すると、

$$-Qx - A^{T}(Sx + g) = \dot{S}x + S(Ax - BR^{-1}B^{T}(Sx + g)) + \dot{g}$$
(3.9)

を得る。ここで、 $x(t) \neq 0$ であるから、S(t), g(t)に関する方程式

$$\dot{S}x + \dot{g} = -Qx - SAx - A^T Sx + SBR^{-1}B^T Sx + SBR^{-1}B^T g - A^T g$$
(3.10)
$$\dot{S} = -SA - A^T S - Q + SBR^{-1}B^T S, \quad S(t_f) = M_f^T Q_f M_f = S_f$$
(3.11)

$$\dot{g} = -\left[A - BR^{-1}B^TS\right]^T g, \quad g(t_f) = -M_f^T Q_f \psi$$
(3.12)

を後進方向に解くことができる。*S*f とリッカチ方程式(3.11)は対称であるから、*S*(*t*)も対称行列である。

この方程式を後進方向に、オイラー法等で時間 to まで解くと、λ(to)が求まる。初期値が 得られたので、その値を初期値として、前進方向にオイラー・ラグランジェ方程式(E.L.) を解けば、次のような Feedback 制御則と Feedforward 制御則からなる最適解を得る。

$$u = -R^{-1}B^{T} (Sx + g) = -R^{-1}B^{T} Sx - R^{-1}B^{T} g = -Kx + u_{f}$$
(3.13)
$$u_{f} = -R^{-1}B^{T} g, \quad K = R^{-1}B^{T} S$$

3.2.2 制御開始状態と終端条件、終端条件までの軌跡が指定されている追従問題の 解

著者は 3.2.1 で述べた方法を拡張し、モデル (3.1) で与えられるシステムが、終端条件に達するまでの軌跡(トラジェクトリ)が $y_d(t)$ と設定され、出力が y = Cx と観測 される場合の最適ターミナル制御解を考えた。すなわち、このシステムの運動を評価 するため、評価関数として

$$J = \frac{1}{2} e_f^T Q_f e_f + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[\left(y - y_d \right)^T Q_y \left(y - y_d \right) + u^T R u \right] dt$$
(3.14)

を採用した。この問題解くため、次のようなハミルトン関数

$$H = \frac{1}{2} \left(\left(y - y_d \right)^T Q_y \left(y - y_d \right) + u^T R u \right) + \lambda^T \left(A x + B u \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\left(C x - y_d \right)^T Q_y \left(C x - y_d \right) + u^T R u \right) + \lambda^T \left(A x + B u \right)$$
(3.15)

を考えるとき、この問題の解は、オイラー・ラグランジェ(E.L.)の方程式、

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x}$$

$$= -C^{T}Q_{y}Cx - A^{T}\lambda + C^{T}Q_{y}y_{d}$$
(3.16)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -C^T Q_y C & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C^T Q_y y_d \end{bmatrix}$$
(3.17)

を2点境界条件(3.6)のもとで解く2点境界値問題に帰結する。

この問題を、リッカチ方程式を後進方向へ解く方法によって解く。(3.8)に式(3.17)を代入し、式(3.7)を使って *λ*を消去すると、

$$-C^{T}Q_{y}Cx - A^{T}(Sx + g) + C^{T}Q_{y}y_{d}$$

= $\dot{S}x + S(Ax - BR^{-1}B^{T}(Sx + g)) + \dot{g}$ (3.18)

 $x(t) \neq 0$ であるから、S(t), g(t) に関する方程式

$$\dot{S} = -SA - A^T S - C^T Q_y C + SBR^{-1}B^T S, \ S\left(t_f\right) = M_f^T Q_f M_f \cong S_f$$
(3.19)

$$\dot{g} = -\left[A - BR^{-1}B^TS\right]^T g + C^T Q_y y_d, \ g\left(t_f\right) = -M_f^T Q_f \psi$$
(3.20)

が得られる。この方程式を後進方向に、オイラー法等で時間 t_0 まで解くと、 $\lambda(t_0)$ が求まる。初期値が得られたので、その値を初期値として、前進方向にオイラー・ラグランジェ 方程式を解けば、(3.13)に示した Feedback 制御則と Feedforward 制御則からなる最適解を得る。

3.2.3 制御開始状態と終端条件、終端条件までの軌跡と外力が与えられている場合の追従問題の解

次に、著者は外乱を考慮した場合の線形システムのターミナル制御問題を解くために、こ の方法を拡張した。

外乱が既知の場合の船舶の操縦運動を、次のような線形システム表現とする。

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma\omega \tag{3.21}$$

と表現できる。

このシステムの評価を行うための評価関数は(3.14)であるとする。ここでωは既知の定 常外乱である。

この問題を解くため、次のようなハミルトン関数を考える。

$$H = \frac{1}{2} \left(\left(Cx - y_d \right)^T Q_y \left(Cx - y_d \right) + u^T R u \right) + \lambda^T \left(Ax + Bu + \Gamma \omega \right)$$
(3.22)

この時、問題は、前と同様にオイラー・ラグランジェ方程式

$$\dot{\lambda} = -C^T Q_y C x - A^T \lambda + C^T Q_y y_d \tag{3.23}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -C^T Q_y C & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \omega \\ C^T Q_y y_d \end{bmatrix}$$
(3.24)

を2点境界条件(3.6)のもとで解く2点境界値問題に帰結する。

この問題を解くため、前のように、リッカチ方程式を後進方向へ解くことを考える。(3.8) に式(3.17)を代入し、式(3.7)を使って λ を消去すると、

$$-C^{T}Q_{y}Cx - A^{T}\lambda + C^{T}Q_{y}y_{d}$$

$$= \dot{S}x + S\left(Ax - BR^{-1}B^{T}\lambda + \Gamma\omega\right) + \dot{g}$$
(3.25)

$$-A^{T}\left(Sx+g\right)-C^{T}Q_{y}Cx+C^{T}Q_{y}y_{d}=\dot{S}x+S\left[Ax-BR^{-1}B^{T}\left(Sx+g\right)+\Gamma\omega\right]+\dot{g}$$
(3.26)

$$\dot{S}x + \dot{g} = -A^T \left(Sx + g\right) - C^T Q_y Cx + C^T Q_y y_d - SAx + SBR^{-1}B^T \left(Sx + g\right) + S\Gamma\omega$$
(3.27)

前と同様に、リッカチ方程式を後進方向に解く方法により、最適解を求めることができる。

ここで、S(t)、g(t)に関する方程式は

$$\dot{S} = -SA - A^T S - C^T Q_y C + SBR^{-1}B^T S, \ S\left(t_f\right) = M_f^T Q_f M_f \cong S_f$$
(3.28)

$$\dot{g} = -\left[A - BR^{-1}B^TS\right]^T g + C^T Q_y y_d + S\Gamma\omega, \ g\left(t_f\right) = -M_f^T Q_f \psi$$
(3.29)

この方程式を後進方向に、オイラー法等で時間 to まで解くと、λ(to)が求まる。初期値が 得られたので、その値を初期値として、前進方向にオイラー・ラグランジェ方程式を解け ば、(3.13)に示した Feedback 制御則と Feedforward 制御則からなる最適解を得る。

3.3 One Switch Bang Bang Control

これまで述べてきたことで明らかであるように、TVLQC法による計算では、制御量 に制約条件を加えることができない。Kvam等^{[33],[34]}は、変針時などにバンバン制御を 実現するため OSB (One Switch Bang Bang Control)制御則を開発した。この方法は2点境 界値問題を、次のような多点境界値問題に置き換えて使う方法である。

Fig. 3.1 は、その概念を示す。図において t_f-to は十分に短い時間であるとする。また アクチュエータの制限値(ここでの問題では舵角制限)が設定されているとする。①の変 針初期においては終端時間 t_f-to が十分短いことから、目標に達するまで大角度をとること となり、制限舵角一杯となる。②に至っても、t_f-to が短すぎているので舵角は維持された ままである。

これらのことを毎サンプリング時間で繰り返すと、③に至り、残された変針量が時間 tr-to で十分な量となり、結果的に当て舵をとって目的を実現しようとする。そして、この時刻 以降は、当て舵操舵により、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)と呼ぶこ ととする。



Fig. 3.1 One Switch Bang-Bang Control (OSB アルゴリズム)

3.4 TVLQC法による制御アルゴリズム

OSB アルゴリズムをまとめると以下のようになる。

- 1. 終端時間 t_fを定める。そして、to=0、xo=[000]、ψ=[00y_p]と置く。
- 2. *i*ステップ目において、*n=tf*/Δ*t*ステップ先までの最適制御則 δ*を先に述べたアルゴリズムで計算する。
- 3. 最適舵角 δ^* を発令する。ただし、もし δ δ_{max} であれば $\delta^* = sign(\delta^*) \delta_{max}$ とする。

のようになる。

3.5 結言

本章では、本論文で使う制御法である、Y.C.Hoの可変ゲイン線形制御法(Time Varying Linear Quadratic Control;TVLQC法)について、その利点、欠点、欠点の克服法、著者の問題への拡張法などについて述べた。

得られた結果は

- (1)これから扱う船舶の操縦モデルを、線形連続状態空間モデルに変換したのち、船舶の保針問題や、ここで扱う航路追従問題をTVLQC法によって解くため、一般線形システムの線形ターミナル最適制御問題として定式化した。
- (2) TVLQC 法によって、船舶の保針問題を解くため、制御開始状態と終端条件のみが 与えられている場合の軌道自由問題の最適解を求めた。
- (3) TVLQC 法によって、航路追従問題を解くため、(2)を拡張し制御開始状態と終端条件、終端条件までの軌跡が指定されている追従問題の最適解を求めた。
- (4)(3)を定常外乱がある場合に拡張し、制御開始状態と終端条件、終端条件までの 定常外乱が与えられている場合の追従問題の制御解を求めた。

- (5) 制御量に制約ある場合に適用できない TVLQC 法の欠点を補うため、One Switch Bang Bang Control と呼ぶ制御アルゴリズムを示した。
- (6) 最後に TVLQC 法をリアルタイムに適用する手続きをアルゴリズム形式でまとめた。 等である。

参考文献

- [3.1] A.E.Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho: Applied Optimal Control, Optimization, Estimation and Control, Hemishpere Publishing Corpolation, 1975
- [3.2] A.E.Bryson : Time Varying Linear Quadratic Control, Journal of Optimaization Theory and Application, Vol 100, No.3, pp.515-525, 1999
- [3.3] K.Kvam; Optimal Ship Maneuvering Using Bryson and Ho's Time Varying LQ Controller, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2000
- [3.4] 大津皓平、K,Kvam, T.I.Fossen : 可変ゲインによる最適操舵, 日本航海学会論文集第 104 号, pp.89-94, 2001
- [3.5] T.I.Fossen: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994

第4章 船舶の航路追従(トラッキング)制御

4.1 緒論

本章では、速度一定で与えられた航路へのトラッキング問題をあつかう。ここで与える 基本的な問題は、変針しつつ直線状航路をトラッキングさせる問題である。

ところで、このようなトラッキングの方法には2つの方法がある。1つはトラッキング を忠実に行うための針路を与える方法、もう一つは、最適制御により得た解から出力を求 める方法である。ここでは、これら2つの方法を使った変針付き直線トラッキング制御の シミュレーションと実船実験の結果について述べる。

すなわち、前者の制御法では、設定ルートに近づくように、指令針路を設定し、指令針 路に対し従来のオートパイロットによる制御によって、設定ルートに近づける。この制御 の利点として、操船に関する流体微係数を必要としないことが上げられる。本論文では、 与えられた航路に積極的に近づく制御法を採用する。

後者の制御法では、問題を制御工学における、トラッキング問題として扱い、直接舵に 制御命令を送る。この方法では、指令針路が与えられるのではなく、設定ルート上を航行 するように、直接に舵を動かす。この制御には船体運動に関する微係数を知る必要がある。 制御法としては、前章で述べた計算機の高速性を生かし Ho 博士^[4,1]の TVLQC 法を採用す る。ただし、汐路丸は、Full ahead (CPP Blade angle 15 [deg])で 12.3 [knots]で航行可能である が (Appendix C参照)、海面の状態によっては、速力維持が不可能となることもある。こ の論文における高速とは、ほとんどの海象条件で維持可能な速力(10 [knots]程度)とする。

以下の章では、単純な方法から複雑な方法へ、シミュレーション、実験を繰り返してい った過程を追って記述する。

4.2 トラッキングルートの設定と追従方法

本節では、本章の目指す航路追従問題を具体的に設定する。

Fig. 4.1 の上の図は、この章におけるトラッキング制御のため設定したルートである。本 論文で使用するトラッキング航路の多くは、このように希望航路をウェイポイントで分割 し、その間は直線とし、この直線を追跡する方法を採用している。ここで、ウェイポイン トとは、設定ルートを設定するための座標を示す。すなわち、ウェイポイント間(A,B,C etc) を結ぶ直線を設定し、その直線を目標にトラッキングを行う。白色の点 A が実験開始時 の位置である。船が次のウェイポイントに近づき、ウェイポイントとの距離が任意の距離 以内となったとき、目標ルートは次のウェイポイント間を結んだ直線に切り替わる。この 論文では、この距離をウェイポイント切り替え距離と呼ぶ。例えば、A,B を通る直線に対 しトラッキングを行っている場合、船とウェイポイント B までの距離がウェイポイント 切り替え距離以内となったときに、目標ルートを B,C を結ぶ直線に切り替える。この処理 をウェイポイント毎に繰り返す。このルートを**直線変針ルート (Simple Tracking Route)** と 呼ぶことにする。

Fig. 4.1 の下の図のウェイポイントは、岡崎^[42]等によって求められた最短時間操船法によ る解を基本に設定したウェイポイントである。破線で示したルートが、船速 9.8 [knots] 舵 角制限 7 [deg] で 300 [m]の幅寄せを行う場合の最短時間操船法^[42]によって得られたルート である。この中から、1分ごとに船位データを抜き出し、ウェイポイントを設定し、これ らのウェイポイントを直線で結び、目標ルートとする。トラッキングは、このウェイポイ ントを結んだ直線上を通過するように制御を行い、ウェイポイントまで任意の距離以内と なった場合、次のウェイポイントを結んだ直線に対する幅寄せを行うことでトラッキング を行う。このルートをこの論文では、最短時間ルート (Minimum Time Route)と呼ぶ。



Fig. 4.1 Waypoints and desired route

4.3 終端時間の設定

第3章で与えた TVLQC アルゴリズムでは、終端時間を適切に選択することが重要である。 ここでは、Kvam^[48]が推奨した供試船の野本モデルから推定する方法に従い、以下の TVLQC 法においては全て、

$$t_{f} = 10 [sec]$$

に固定した。

4.4 航路偏差の計算

トラッキング制御を行う場合、制御の結果を評価するために目標とするルートからの偏 差を求めることが必要である。ここではこの偏差の計算法を述べる。

Fig. 4.2 に示すように、ウェイポイントが A,B,C と設定された場合、これらウェイポイン

トを結ぶ直線 A-B-C が目標とするルートである。船舶のトラッキング制御の目的は、直線 A-B-C からの偏差をできる限り小さくする制御を行うことである。この場合、偏差を次の ように定義する。

例えば、Fig. 4.2 において、船が①に位置する場合、ウェイポイント A,B を通る直線に対し垂直であり、船体転心位置を通る直線を求める。この線の船体転心位置からウェイポイント A,B を通る直線との交点までを偏差とする。船の位置が Fig. 4.2 の④に位置する場合、ウェイポイント B,C を通る直線に対し垂直な線を求め、その距離を偏差と定める。

変針点より内側にいる場合(②の場合)は、目標ルートに対し、2つの垂線が設定できる。この場合、短い方の距離を偏差と定義する。変針点より外側にあり、目標ルートに垂線を設定することができない場合(③の場合)は、ウェイポイント B からの距離を偏差と定義する。



Fig. 4.2 変針点付近での偏差の計算

4.5 希望針路を指示するトラッキング制御

4.5.1 指数减衰針路法

この節では、まず緒論で述べたトラッキングの第1の方法すなわち、次の命令針路として、目標とする航路に近づく適当な命令を与える方式でトラッキング制御を行った結果を 述べる。ここで採用した方式は、航路への減衰関数により指数的に近づく方式である。こ の方法を今後、**指数減衰針路法**と呼ぶ。

この制御においては、速力一定とし、目標ルートからの偏差が発生した場合、偏差が指数減衰するように、目標針路を求め、この目標針路に対し船首の制御を行う。この場合、次の制御時間までの保針制御は、指定された針路を維持するため、制御則として古典的 PID フィードバック制御を使う。この時のコントローラの制御ゲイン決定法としては、簡単で安全なリレー制御を使う自動ゲイン調整法を使う^{[43],[44]}。

設定ルートが直線で与えられている場合(Fig. 4.3の点線が設定ルートを示す。)命令 針路(♠)は、設定ルートの方向(♠)と、設定ルートの方向に対する修正角度(ಱ)の 和によって求める(Fig. 4.3 参照)。



Fig. 4.3 指数関数によって目標ルートに近づける方法

この方式では設定ルートの方位は入力値として与えるので、修正角度を先に述べた方法 で計算する必要がある。ここでは、設定ルートからの偏差(*d*)を指数的に減少させるた め、次式に従って減衰させる。

$$d = D \times \exp\left(-\frac{l}{L_d}\right) \tag{4.2}$$

ここで、

D:計算基点での変位

1:計算基点からの進出距離

Ld:減衰距離係数

修正角度は、上式を1で微分し、次式で決定する。

$$\frac{dd}{dl} = -\frac{D}{L_d} \times \exp\left(-\frac{l}{L_d}\right)$$

$$\theta_d = Tan^{-1} \left(\frac{dd}{dl}\right)$$
(4.3)
(4.3)

このようにして修正角度を定めることで、命令針路が時間とともに設定ルートに近づく ことを可能とする。

針路制御には、次に示すデジタル PID 制御を採用する^[45]。

$$\dot{\delta} = K_P \left\{ r - r_1 + \frac{1}{T_I} \int r dt + \frac{T_D}{\Delta t} \left(r - 2r_1 + r_2 \right) \right\}$$

$$\tag{4.5}$$

ただし、

Δt	: サンプリング間隔
r	:船首方位と設定針路の差
<i>r</i> 1	:1ステップ前の船首方位と命令針路の差
<i>r</i> ₂	: 2 ステップ前の船首方位と命令針路の差
K_{P}, T_{D}, T_{I}	:PID ゲイン

4.5.2 指数減衰針路法による直線変針ルート追従制御シミュレーション

本節では、指数減衰針路法による直線状航路のトラッキング性能のシミュレーション結 果を示す。供試船は第2章で述べた汐路丸で、用いた操縦モデルは 2.5 に示した MMG モ デルである。但し外乱は考慮していない。シミュレーションでは、(4.3)で示した減衰距 離係数 *La*=200 [m]とし、*D*を 10 [sec]毎に求めて制御を行った。CPP 翼角は 10 [knots] 程度 の速力を保持するよう PD 制御を実施した。ウェイポイント切り替え距離は 300 [m]とした。 シミュレーション結果を Fig. 4.4 に示す。

38

Table 4.1 指数減衰針路法によるトラッキングシミュレーション結果

	Mean	S.D.	Maximun	Minimun
Surge [m/s]	5.08	0.27	5.16	0.00
Sway [m/s]	0.00	0.16	0.40	-0.39
Yaw rate [deg/s	0.004	0.24	0.600	-0.600
Deviation [m]	0.0	9.72	25.7	-28.9
Rudder [deg]	0.0	2.42	6.8	-9.2

偏差は最大で 2.9B となった。これは変針時、ショートカットしたために発生した偏差で ある。偏差の平均値は小さいものの標準偏差が大きい。Fig. 4.4 を見てもわかるとおり、 蛇行していることがわかる。

この現象を改善するための解決策は、舵の制御則(4.5)のゲインを調整するか、命令針路 を決定する場合(4.3)のLaを調整することである。

蛇行を抑えるためには、緩やかに目標ルートに近づけるため、修正角度 θa を小さくなる ように La を長く設定する必要がある。また変針点でのショートカットを少なくするには、 修正角度 θa が大きくなるように La を短くするか、ウェイポイント切り替え距離を短くす ればよいことがわかる。



Fig. 4.4 指数減衰針路法によるトラッキング制御シミュレーション結果のプロット図

4.5.3 指数減衰針路法による Simple Tracking Route 追従制御実船実験とその解析

本方式の実船実験は、シミュレーションを行った条件に合わせるため、La は 200[m]、ウ ェイポイントまで 300[m]以内となった時に、次のルートへ切り替える方式で行う。

CPP 翼角については、実験開始時に操船者によって与えられた対水速力 10[knot]程度の 速力になるよう設定し、実験中の翼角は変更しないこととした。変針点付近では、ウェイ ポイントまで 300[m]以内となったとき、次のルートの切り替えを行った。実船実験の結 果の平均値、標準偏差は Table 4.2 に、前後速度、左右速度、ヨーレート、船首方位(実験 開始時の初期設定針路を 0[deg])と舵の時系列データとプロット図は Fig. 4.5 に示す。 初期設定針路は 10[deg]、平均風向 350.4[deg]、平均風速 4.7[m/s]であった。

	Mean	S.D.	Maximun	Minimum
Surge [m/s]	4.51	0.24	5.17	2.42
Sway [m/s]	-0.03	0.14	0.40	-0.46
Yaw rate [deg/s]	0.000	0.35	1.200	-0.900
Deviation [m]	-1.2	14.08	36.1	-36.5
Rudder [deg]	-0.2	3.64	10.1	-10.5
Wind direction [deg	350.4	30.99	110.7	233.3
wind speed [deg]	4.7	1.61	13.2	1.2

Table 4.2 指数減衰針路法によるトラッキング実船実験結果

偏差の最大値は 3.7B で変針点付近で起きている。直線部では、偏差は、0.5B(5[m])以内 に入っている。この結果、目標ルートからの偏差とヨーレートについては、実船実験では、 変針点付近を除き、安定した制御が得られることが確認できた。La を小さく設定し、目 標ルートの切り替えをする距離を小さくすることで、よりルートに近づけてトラッキング を行うことも可能であるが、船体運動と、風や波によっては、大きくオーバーシュートを 起こすことも別の実験で明らかになった。

4.5.4 指数減衰針路法による最短時間ルート追従制御実船実験とその解析

次に、トラッキングすべき航路を最短時間操船法で得られたルート(4.2参照)とし、定数 La や変針切り替え距離を変化させ、指数減衰方式によりトラッキング実験を行い、パラメータ La の効果を調べた。

まず、定数 La を実船実験で変化させ指数関数によってトラッキングを行う実験を行った。 Fig. 4.6は La を50[m]、100[m]、150[m]の3通り設定し、トラッキングを行った結果で ある。

L_d = 150 [m] ウェイポイント切り替え距離 150 [m]
 L_d = 100 [m] ウェイポイント切り替え距離 100 [m]
 L_d = 50 [m] ウェイポイント切り替え距離 100 [m]

①の設定では、設定ルートに対する指令針路を緩く設定することになる。そのため、ウ

ェイポイントに対するトラッキングは、滑らかに行うことができたが、ウェイポイントと の距離は、ほかの2通りに比べて、比較的離れている。

②の設定では、設定針路に対する命令針路の設定を①の場合よりも厳しく設定し、設定 ルートの切り替える距離も 100[m]とした。①の設定に比べ、ウェイポイントに近づいて トラッキングを行ったことがわかる。直線のトラッキングに入ったときは船首の触れ回り が起こっていることもわかる。

③の設定では、②の設定より命令針路の設定をさらに厳しくした。そのため、3通りの 設定のなかで、最もウェイポイントに近づいてトラッキングを行うことができた。しかし、 直線部分のトラッキングでは、ルートに対する設定針路が厳しく設定されるため船首の触 れ回りが大きい。

Table 4.3 *L*_d=50[m]の場合のトラッキング実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	5.33	0.27	5.81	4.62
Sway [m/s]	0.02	0.05	0.10	-0.07
Yaw rate [deg/s]	0.018	0.933	2.292	-2.292
Deviation [m]	-1.4	19.2	31.5	-50.6

Table 4.4 L_d=100[m]の場合のトラッキング実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	5.50	0.27	5.93	4.84
Sway [m/s]	0.02	0.04	0.10	-0.06
Yaw rate [deg/s]	-0.046	1.443	2.292	-22.345
Deviation [m]	-2.7	10.8	10.6	-29.9

Table 4.5 *L*_d=150[m]の場合のトラッキング実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	5.53	0.25	5.97	4.91
Sway [m/s]	0.02	0.03	0.10	-0.06
Yaw rate [deg/s]	-0.005	0.611	2.292	-1.719
Deviation [m]	-3.1	7.2	10.0	-24.2

この実験では、La を小さくすることにより修正角度がルートに対し大きくなるため、振れ回りを起こしやすいことがわかる。大きくした場合には、ルートに対する修正角度が小さいため緩やかに近づくことになるが、変針点付近ではルートからのずれが大きくなる。 以上の結果、これら3つの実験では、La=100[m]が良いことがわかった。



Fig. 4.5 指数減衰針路法によるトラッキング制御実船実験結果

43



Fig. 4.6 指数減衰針路法による最短時間ルートのトラッキング制御実験結果

4.6 舵に直接命令するトラッキング制御

4.6.1 TVLQC 法によるトラッキング制御

この節では、TVLQC 法によるトラッキングアルゴリズム、シミュレーションと実船実験 の結果を述べる。前節で述べた指数減衰針路法と比べるため、直線に対するトラッキング を、TVLQC 法により行いウェイポイント毎に切り替えていく。外乱を加味し、また一般 船舶でも使用できることを考え、線形操縦モデルの係数を Clark の推定式により推定し、 TVLQC 法により制御する実験も行った。後半では、設定ルートをより細かく設定してト ラッキングを行った。

前章において、船舶の操縦運動等を、一般に次のような線形システムで表現できる^[47]ことを示した。

 $\dot{x} = Ax + Bu \tag{4.6}$

ここで、*A*,*B* は状態行列である。また、このとき上に述べたトラッキング問題は、一般にターミナル条件を指定し、

$$x(t_0) = x_0, \ e_f \cong M_f x(t_f) - \Psi$$

$$\tag{4.7}$$

と表せることも示した(式(3.1)、(3.2)参照)。ここで、toは制御開始時刻、tf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。efは時 刻tfにおけるシステムの状態量と指定された終端条件 Ψ との差である。ここで考えている トラッキング問題では、出力がy = Cxと観測される場合、この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れば実現できることがわかる(式(3.14)参照)。

$$J = \frac{1}{2} e_{f}^{T} Q_{f} e_{f} + \frac{1}{2} \int_{t_{0}}^{t_{f}} \left[(y - y_{d})^{T} Q_{y} (y - y_{d}) + u^{T} R_{y} u \right] dt$$

ここで、 y_d は設定ルートである。この関数を最小にする制御則では、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(Soft Terminal Controller)。この問題の解は、オイ ラー・ラグランジェの方程式を逆時間で解き、(3.28)、(3.29)によって与えられる。

ここで用いた可変ゲイン制御の特徴は、この制御則を毎制御時刻毎に繰り返すことである。すなわち、初期時刻 to は現在の制御時間に一致するように移動する。現代の計算機の高速性は十分このような制御を可能にすると考えられる。

4.6.2 線形操縦系モデル

ここでは、前節において述べた操縦モデルの具体的な線形状態空間表現を定める。ここで使うモデルは、2.5 に示した MMG モデルの線形近似モデルである(Kvam^[33])。 まず、汐路丸の MMG モデルは

$$\dot{v} = \frac{1}{m + m_{v}} \{-mur + \frac{1}{2}\rho L_{pp}dU^{2}(Y_{v}'v' + Y_{r}'r' + Y_{vr}'v'|r'| + Y_{vr}'v'|r'| + Y_{vr}'r'|r'|) - (1 - a_{H})F_{N}(u,v,r,\delta,\theta_{P})\cos\delta\}$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \{\frac{1}{2}\rho L_{pp}^{2}dU^{2}(N_{v}'v' + N_{r}'r' + N_{vr}'|v'|r' + N_{vv}'v'|v'| + N_{vr}'r'|r'|) - (x_{R} - a_{H}x_{H})F_{N}(u,v,r,\delta,\theta_{P})\cos\delta\}$$

$$\psi = r$$
(4.8)

で表される。この式より、線形操縦モデルを作るため、以下の条件を加える。

●サージについては、u=u₀とする。ここでu₀は航海速力である。
●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、U=u₀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。θP=θP,0
●舵への流速は一定であるものとする。すなわち UR (u, θP)=UR (u₀, θP,₀)=UR₀ が成り立つ。
● 2 次流体微係数は小さいので、0 と設定する。すなわち Ywr=..=Nrr..=0.0 が成り立つ。
●舵力 FN の線形近似として、

$$F_{N} \approx \frac{1}{2} \rho A_{R} f_{\alpha} \left(U_{R}^{2} \delta + U_{R} \gamma_{R} \left(v + l' L_{PP} r \right) \right)$$

$$\tag{4.9}$$

を採用する。

●地球固定座標を Fig. 4.7 のように設定し、船固定座標からの座標変換に際し、線形近似 を行う。ただし、この図で X 方向は原針路の方向とする。

舵のみによるトラッキング制御では、ルートからの偏差を0とすることを目標とする。 したがって、状態ベクトル xo,にはスウェイ、ヨーレート、Yaw、偏差を設定する。

 $x_0 = \begin{bmatrix} v & r & \psi & y \end{bmatrix}^T$

制御入力 u は、舵角 δ すなわち

$$u = \left[\delta\right]$$

.

である。また、(4.7)における M₅ ψ は終端条件として(4.10)で表される。

従って、efは船舶が終端条件に達したときの誤差を示すこととなる。v_f, r_f, ψ_f, y_f, は終端条件のスウェイ、ヨーレート、Yaw、偏差である。

$$M_{f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} v_{f} \\ r_{f} \\ \psi_{f} \\ y_{f} \end{bmatrix}$$
(4.10)



Fig. 4.7 座標系

このような仮定から、線形化された操縦モデルは、

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$
(4.11)

となる。ここで

$$\begin{aligned} U_{R,0}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \left\{ (1-w_{R}) - (1-w_{P})k_{x} \right\} u_{0} + 0.7k_{x}\pi D_{P}n \tan\theta_{P,0} \\ a_{41}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_{y}} \left\{ -(1+\alpha_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}\gamma_{R} + \frac{1}{2}\rho L_{PP}du_{0}Y_{v}' \right\} \\ a_{12}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_{y}} \left\{ -(1+\alpha_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}\gamma_{R}lrL_{PP} - mu_{0} + \frac{1}{2}\rho L_{PP}^{2}du_{0}Y_{r}' \right\} \\ a_{21}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_{R} + \alpha_{H}x_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}\gamma_{R} + \frac{1}{2}\rho L_{PP}^{2}du_{0}N_{v}' \right\} \\ a_{22}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_{R} + \alpha_{H}x_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}\gamma_{R}l_{r}L_{PP} + \frac{1}{2}\rho L_{PP}^{3}du_{0}N_{r}' \right\} \\ b_{11}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{m+m_{y}} \left\{ -(1+\alpha_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}^{2} \right\} \\ b_{21}(u_{0},\theta_{P,0}) &= \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ -(x_{R} + \alpha_{H}x_{H})\frac{1}{2}\rho A_{R}f_{\alpha}U_{R,0}^{2} \right\} \end{aligned}$$

である。ここで、文献^[4,7]と文献^[4,8]において座標変換のための線形化が述べられている。

$$\dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi)$$

$$\dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi)$$
(4.12)

船首方位角が0[deg]に近い場合、線形化を行うためsinψ~ψ, cosψ~1 とする。ψ が 20[deg] でも、これらの値は、

$$\frac{\sin(\psi)}{\psi} = 0.9798 \tag{4.13}$$

$$\cos(\psi) = 0.9397$$

である。船首方位が 20[deg]以内であれば、この近似は問題が無いと考えられる。よって 本論文でも座標変換式を、

$$\dot{x} = u$$

$$\dot{y} = u\psi + v \tag{4.14}$$

とする。

ここで、*v*,*r*,*ψ*,δ は船体横速度、船首加速度、船首角、舵角、*m* は船体質量、*m_y*,は横方 向付加質量、*Izz*,*Jzz* は船首揺慣性モーメント、船首揺付加慣性モーメント、*a*_H は舵・船 体相互干渉係数、ρ は海水密度、*A*_R は舵面積、*f_a* は舵直圧力係数、*U*_{R,0} は舵への流入速度、*Y* 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である。

観測方程式としては、トラッキング問題であることから、航路偏差のみ観測できるとし、

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = 0 \tag{4.15}$$

4.6.3 TVLQC法による直線変針ルートトラッキング制御シミュレーション

本項では TVLQC 方式による直線状航路のトラッキング性能の前評価シミュレーション結果を示す。供試船は第2章で述べた汐路丸で、用いる詳細操縦モデルは、2.5 に示した MMG モデルである。但し外乱は考慮していない。

シミュレーションで使用した重みを、(4.16)に示す。シミュレーション結果を Fig. 4.8 に 示す。この図において、実験開始時の位置を目標ルート上から開始したシミュレーション の時系列データを図の左側に示す。プロット図には実験開始時の位置を目標ルート上、目 標ルートから 100[m]右からスタートした場合、目標ルートから 200[m]右からスタートし た場合、目標ルートから 300[m]右からスタートした場合の航跡を示す。

$$Q_f = diag \left\{ \frac{1}{1.0^2}, \frac{1}{0.017^2}, \frac{1}{0.17^2}, \frac{1}{1.0^2} \right\}, \ Q_y = \left[\frac{100}{1.0^2} \right], \ R = \left[\frac{1000}{10^2} \right]$$
(4.16)

シミュレーション開始位置を目標ルート上に設定した場合、トラッキングは良好な結果 となった。ルートを設定航路からずらした場合でも、オーバーシュートをほとんど起こさ ずに目標ルートへ近づき、トラッキングすることが可能であった。

次に、Rの設定を(4.17)に示すように大きく設定し、シミュレーションを行った結果を Fig. 4.9 に示す。

$$Q_{f} = diag \left\{ \frac{1}{1.0^{2}}, \frac{1}{0.017^{2}}, \frac{1}{0.17^{2}}, \frac{1}{1.0^{2}} \right\}, \ Q_{y} = \left[\frac{100}{1.0^{2}} \right], \ R = \left[\frac{10000}{10^{2}} \right]$$
(4.17)

*R*に対する重みを大きく設定することは、アクチュエータの動きを抑えることを意味する。この場合、操舵量が抑えられるが、偏差が発生しやすくなるため、トラッキングの精度が Fig. 4.8 より悪くなった。

Table 4.6 TVLQC 法による直線変針ルートトラッキングシミュレーション結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.53	1.14	4.64	-19.68
Sway [m/s]	0.00	0.12	0.29	-0.29
Yawrate [deg/s]	0.000	0.215	0.600	-0.600
Deviation [m]	0.4	4.5	17.5	-15.9
Rudder [deg]	0.0	2.0	7.8	-7.6



Fig. 4.8 TVLQC によるトラッキングシミュレーション結果



Fig. 4.9 Rの重みを変更した場合のトラッキングシミュレーション結果

4.6.4 TVLQC法による直線変針ルートトラッキング制御実船試験と解析

シミュレーションの結果をもとにした実船実験では、Fig. 4.1 で示した変針を必要とする 直線変針ルートを仮定し、このルート上を目標ルートとして制御を行った。

CPP は操船者により速力 10 [knots] 程度に設定し、制御用コンピュータからの指令値は舵 に対して信号を送った。重みは、R の値を変えた2種類(式(4.16)と(4.17))を設定し、 実験を行った。

Table 4.7 舵への重みが大きい場合((4.17)を使用)

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
surge [m/s]	4.59	0.33	5.99	2.67
sway [m/s]	-0.09	0.20	0.41	-0.73
yawrate[rad/s]	0.003	0.403	1.600	-1.200
deviation [m]	-5.2	4.2	3.8	-18.4
Rudder [deg]	-0.1	4.9	15.1	-15.6
Wind direction [deg]	315.1	59.6	358.6	1.2
Wind speed [deg]	6.7	1.7	12.7	3.2

Table 4.8 舵への重みが小さい場合(重み(4.16)を使用)

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
surge [m/s]	4.52	0.20	4.83	2.54
sway [m/s]	0.00	0.23	0.63	-0.73
yawrate[rad/s]	-0.004	0.457	1.300	-1.400
deviation [m]	-0.2	6.4	17.8	-19.8
Rudder [deg]	-0.3	5.4	12.1	-10.5
Wind direction [deg]	275.6	28.3	346.7	147.6
Wind speed [deg]	4.3	1.3	9.5	1.6

舵への重みの設定値が小さい場合のトラッキング実験結果の前後速度、正横方向速度、 ヨーレート、偏差、舵角の平均値、標準偏差を Table 4.7 に、舵への重みが小さい場合を Table 4.8 に示す。時系列データとプロット図を Fig. 4.10、Fig. 4.11 に示す。船首方位につい ては、実験開始時の船首方位を 0 [deg] としている。

航路偏差への重みに比べ、舵に対する重みを小さくすると、シミュレーションで示した ように舵の動きが活発となり、目標ルート上を航行しやすくなる。逆に、舵に対する重み を大きくすると、目標ルートから偏位が発生しても舵の動きが少なくなる。上の2つの表 を見比べると、舵に対する重みが小さい場合、舵の標準偏差が大きく、航路偏差を修正す るため舵を左右に取っていることがわかる。これは Fig. 4.10の舵の時系列データを見比べ ても明らかである。これに対して、偏差の平均値は、舵の重みが小さい場合、偏差の平均 値が小さく、目標ルートに近いトラッキングを行っていることがわかる。

この結果は、操船者は、海域に応じて、例えば、狭水路、輻輳海域など正確にルート上 を航行したい場合には、舵の重みを小さくし、精度のよいトラッキングを行うことができ ることを示している。広い海域で、目標ルート上を正確に航行する必要がない場合、舵の 重みを大きくして、舵の動きを抑えたトラッキングを行うことも可能である。

さらに Table 4.1 に示した指数減衰針路法によるシミュレーション結果と Table 4.6 に示した TVLQC 法によるシミュレーション結果を比べると、TVLQC 法を使用した場合の偏差と 舵角の標準偏差は指数減衰針路法の値より小さくなっている。TVLQC 法を使用すること により、指数減衰法と同程度の精度でトラッキングを行いつつ、操舵量が減少できること を示している。

ただし、変針点では、TVLQC 法では舵角を大きくとるため、ルートに近づきつつ変針を 行うことができたが、指数減衰針路法では、変針を行う場合でも、緩やかに次のウェイポ イントへ近づいている。この点は TVLQC 法でもゲインを調整することによって可能であ る。これらを総合すると、船舶の特性が明らかでない場合、指数減衰針路法が有効であり、 明らかである場合には、TVLQC 法の方がフレキシブルである点で優れていると結論する ことができる。



Fig. 4.10 舵の重みを大きく設定した場合の TVLQC 法によるトラッキング実験結果



Fig. 4.11 舵の重みを小さく設定した場合の TVLQC 法によるトラッキング実験結果

4.6.5 新針路距離の計算

TVLQC法でトラッキングを行った際(Fig. 4.10、Fig. 4.11参照)、1回目の変針点付近で は、右変針にもかかわらず、左へ舵を取り、右へ取り直すという制御を行っている。2回 目の変針点付近では、左変針にもかかわらず、右へ舵を取り、左へ取り直すという制御を 行っている。これは、目標ルートの切り替え方に原因がある。これまでの実験においては、 Fig. 4.12の左に示すように、変針点に近づくとき目標ルートは、直線Aとして与えられる。 船が変針点に近づくと目標ルートの切り替えを行い、直線 B を目標ルートとした。その 後、制御器はこの直線 B 上を航行するようトラッキングを行うため、まず左に舵を取り、 直線 B に近づけた後で、舵を右にとりルートのトラッキングを行う。このような操船は 操船者に不安を与えるばかりではなく、トラッキング制御全体としてみた場合、非常に効 率が悪い。

この問題の解決策として、アルゴリズムの中に、変針点付近においてルートデータを入れる方法と、この海域で、制御自体を別にする方法がある。この後の実験では、後者の方法を採用し、変針点付近では、変針の制御を、次のように 3.2.1 の制御法すなわち制御開始状態と、終端条件のみが与えられている場合の軌道自由問題として行うこととした^[4,13]。



Fig. 4.12 変針点付近での制御則切り替え

まず、変針する場合、ウェイポイント近傍で舵を取ったのでは、船の応答の遅れがある ため、船を変針後のルートにうまく乗せることはできない。ウェイポイントから応答の遅 れを見込んだ手前から舵をとらなければならない。このように原針路上における変針点と 転舵位置の船体重心点との縦距離を新進路距離といい、 第4章 船舶の航路追従(トラッキング)制御

$$AC = V\left(T + \frac{t_1}{2}\right) + \frac{V}{K \cdot \delta_0} \cdot \tan\frac{\psi_0}{2}$$
(4.18)

で略算できる^[4,13]。ここでは、この域内に入ったとき変針点に対する操舵を開始すること とする。



Fig. 4.13 新針路距離の計算

ここで、ACは Fig. 4.13 に示す点 A、点 C間の距離である。*T,K* は船の操縦性指数、旋回 性指数、*V* は船速、t₁ は舵角 δ となるまでに要する時間、ψ は変針角である。

変針モードに入ったとき、トラッキングモデル(4.11)を使った制御則から、次のような 変針制御モデルに切り替え、TVLQC 法を利用した制御をおこなう。そこで線形操縦モデ ルを次のように設定する。

 $\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \delta$ (4.19)

係数は (4.11)に示した。 また、 好としては新針路を設定する。ここでも、 tf はシミュレ ーションから 10 [sec]とした。

この制御は変針点までの距離が新針路距離以内となった場合に行う。実船実験の結果は 次節の Fig. 4.16 に示す。結果を見ると舵角はこれまでのように変針方向と反対側にとるこ とが解消できているが、外乱によって、定常偏差が発生している。次節では、この定常偏 差を打ち消す方法について述べる。

4.7 TVLQC法における定常偏差に対する修正法

4.7.1 定常外乱を除去する種々の方法

大洋を航行する船舶、沿岸を航行する船舶、制限水域を航行する船舶は、風や波等の外 乱を受ける。このような外乱の内、定常外乱によって発生する力は、船舶を制御する場合 にも定常偏差を発生させる。そこでここでは、TVLQC 法を使って制御中、外乱によって 発生した定常偏差を打ち消す簡単な方法と、外乱の中でも、計測可能な風に関する外力を 打ち消す制御の方法を提示し、実船実験を行った結果を示す。

さて定常外乱をうけ、TVLQC 法によるトラッキング制御を行った場合、定常偏差が発生 したままトラッキングを行うことになる (Fig. 4.16 参照)。この現象を改善する一つの方 法は、*y-ya* に対する重み *Q*,の重みを大きくすることで、ルートに近づくようにし、*Q*f に おける *r*,ψに対する時間減衰を小さくすることである。しかしこの傾向を強くしすぎると、 航路偏差を小さくすることができても、船首が振れまわり、発散してしまう可能性がある。 さらに、*ya* に ψ の項を入れ、ルートの方向から風向に対して、ある角度を持った目標 ψ を入れておく方法も考えられる。

ところで別の考えとして、航路設定をわざと平均偏差をずらして設定する Virtual Track Route 法がある。この方式では、なんらかの方法で平均定常偏差を推定する必要がある。 さらに、通常の PID 制御のように積分制御を入れる方法もある。ここでは後の2つの方 法を示す。

4.7.2 Virtual Track Route 法による定常偏差除去

定常偏差が発生している場合、目標ルート上を航行させる最も簡単な方法は、発生した 定常偏差分だけ目標ルートを定常偏差が発生した逆方向にシフトさせることであろう (Fig. 4.14)。ここでは、このシフトさせたルートに沿ったトラッキングを行う方法を Virtual Track Route 法とよび、このルートに対し制御を行うことを試みる^{[44],[4.10]}。



Fig. 4.14 目標ルートのシフト

Fig. 4.14の太線が設定されたルートである。この方法では、定常偏差(Var.)を、偏差の 平均値とし、偏差の平均値をオンラインで求める方法として、以下に示す式によって時々 刻々求める。

$$m(k) = m(k-1) - \frac{1}{k}(m(k-1) - x(k))$$
(4.20)

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)は最新の観測値である。

4.7.3 Virtual Track Route 法による定常偏差除去シミュレーション

外乱として、ルートに対して正横から 10[m/s]の風を想定して、TVLQC 法のみを行った 場合と、上で述べた修正を行った場合のシミュレーションを実施した。外乱修正を行う場 合は、求めた定常偏差にゲイン調整係数(C)を掛けて、目標とするルートをシフトさせ、 トラッキングを行った。その結果を Fig. 4.15の実線で示している。破線は、目標とするル ートのシフトを行わなかった場合のシミュレーション結果である。このシミュレーション では、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、100[sec]以後 は Virtual Track Route 法を使用した効果が現れていることがわかる。



Table 4.9 目標ルートのシフトを行った場合の偏差の比較

	Deviation		Rudder	
	Mean	<u>S.D.</u>	Maen	S.D.
Only TVLQC	-15.18	5.18	-4.6	0.7
Using Virtual Track Route	-9.05	4.83	-4.6	0.8

シミュレーション結果では、どちらも開始時、風圧力により偏差が発生するが、実験開始から 100 [sec]後に、Virtual Track Route 法を設定した制御を行った場合が、目標ルートに

近づけることができることがわかった。特に、後者の方式は、何らかの理由で、TVLQC 法のゲインを高くできない場合に有効となる。

4.7.4 Virtual Track Route 法による定常偏差除去実船実験と解析

操船者により、速力 10[knots]程度になるよう CPP 翼角を設定し、実船実験を行った結果 を Fig. 4.17 に示す。ここで偏差の平均値は、変針点でリセットしている。 Fig. 4.16 は、ほぼ同時刻に行ったシフトを行わなかった場合の実船実験結果である。

Table 4.10 Virtual Track Route 法を使用しない TVLOC 法によるトラッキング実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.48	0.17	5.17	2.88
Sway [m/s]	-0.22	0.18	0.45	-0.84
Yawrate [m/s]	0.005	0.315	1.100	-1.200
Deviation [m]	-16.4	6.8	-0.2	-29.9
Rudder [deg]	0.1	3.3	15.9	-15.3
Wind direction [deg]	143.4	71.1	230.7	58.0
Wind speed [m/s]	8.9	0.6	10.4	7.6

Table 4.11 Virtual Track Route 法を使用した TVLQC 法によるトラッキング実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.47	0.21	4.81	2.28
Sway [m/s]	0.10	0.16	0.63	-0.47
Yawrate [deg/s]	-0.001	0.309	1.200	-1.000
Deviation [m]	3.8	6.3	18.2	-11.1
Rudder [deg]	0.0	3.0	12.9	-10.1
Wind direction [deg	133.7	16.8	152.9	98.9
Wind speed [m/s]	8.4	0.9	10.4	6.2

2つの実験では風を受けた方向は異なるものの、風速 8.4 ~ 8.9[m/s]の風を受けトラッキングを行った。Virtual Track Route 法を使用しない TVLQC 法によるトラッキング実験では、 偏差の平均は 16[m]となった。

これに対し、Virtual Track Route 法を使用した TVLQC 法によるトラッキング実験では、3.7 [m] 程度であり Virtual Track Route 法の効果が実証された。



Fig. 4.16 Virtual Track Route 法を使用しない場合のトラッキング実験結果プロット図と時 系列データ



Fig. 4.17 Virtual Track Route 法を使用した場合のトラッキング実験結果プロット図と時系 列データ

4.7.5 積分制御法による定常偏差除去

定常偏差を打ち消す場合、目標ルートのシフトを行うほかに、舵角に積分値を加える方 法も考えられる。

$$\delta^* = \delta + C \int_{t_0}^{t_f} y(t) dt \tag{4.21}$$

ここで、

δ : 指令舵角
 δ : TVLQC 法により求められた舵角

y(t) :時刻 t の時のルートからの偏差

この方法でも実船実験を行ったが、Virtual Track Route 法を使用し、定常偏差を打ち消したトラッキング実験ほどの改善はされなかった。

4.8 外乱既知の場合の TVLOC 法

前節で、定常偏差を打ち消す2つの方法について述べたが、外乱が急に変化しないと仮 定できる場合、または、外乱の予想ができる場合、3.2.3 で示した既知の外乱に対する TVLQC 法を使っても、最適解を求める方法を応用することができる。汐路丸で、直接計測できる 外乱は、風向風速なので、ここでは、風による外乱を含んだシステムを考える。

4.8.1 定常外乱モデル

ターミナル制御問題において、予測される外乱がある場合に、その力を表現するモデル を考える。

外乱を含む操縦運動方程式を

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma w \tag{4.22}$$

とする。船体にかかる外乱を風圧力のみと考えた場合、発生する風圧力と風圧モーメントは船体固定座標系の相対風速 U_Wと相対風向 αの関数として、

$$X_{w} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{of} U_{w}^{2} C_{X}^{\prime} \cos \alpha$$

$$Y_{w} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{os} U_{w}^{2} C_{Y}^{\prime} \sin \alpha$$

$$N_{W} = \frac{1}{2} \rho_{A} A_{os} L_{pp} U_{w}^{2} C_{N}^{\prime} \sin 2\alpha$$
(4.23)

と近似できる。ここで、汐路丸の風に関する項の微係数を Table 4.12 に示す。

Table 4.12 汐路丸の風に関する微係数

	数值	数值	単位
正面風圧投影面積	Aof	58.10	[m ²]
側面風圧投影面積	Aos	275.0	[m ²]
風圧力係数 Cx を1次近似したときの係数	C'_X	-0.322453	[-]
風圧力係数 Cr を1次近似したときの係数	C'Y	0.951717	[-]
風圧力係数 C _N を1次近似したときの係数	C'_N	0.108088	[-]
空気密度	ρ _Α	0.125	[kg • s ² /m ⁴]

この結果(4.22)は、次のように表すことにする。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_w \\ \dot{r}_w \end{bmatrix}$$
(4.24)
ここで、^{*v*}_w,*r*_w は次の風圧力と船体質量、付加質量、慣性モーメントから求めることとする。

$$\dot{v}_{w} = \frac{Y_{W}}{\left(M + M_{y}\right)}$$

$$\dot{r}_{w} = \frac{N_{W}}{\left(I_{ZZ} + J_{ZZ}\right)}$$
(4.25)

+分に短い時間内では、風圧力に大きな変化はない、すなわち、U_w,αは変化しないとした場合、その時の最適解は、(3.28)~(3.29)によって与えられる。ただし、(3.29)は既知となった外乱項を含め、次の式を用いる。

$$\dot{g} = -\left[A - BR^{-1}B^TS\right]^T g + C^T Q_y y_d - S\Gamma w$$
(4.26)

すなわち本式と式(3.20)の違いは、Γの項だけである。

変針時の風圧力を考慮した線形モデルを示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \Gamma \begin{bmatrix} \dot{v}_w \\ \dot{r}_w \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4.27)

ここで、係数は、(4.11)に示した値である。

4.8.2 風圧力を考慮した TVLQC 法による実船実験と解析

実船実験では、風圧力線形化による誤差を緩和するため、Γを次のように設定した実験 も行った。

トラッキング制御の場合、

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$
(4.28)

変針制御の場合

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}^T$$
(4.29)

操船者により速力 10 [knots]程度になるように CPP 翼角を設定し、実験可能海域の他、風

向も考慮しながら、初期ルートを設定し、実船実験を行った結果を Fig. 4.18 に示す。この ときの平均風速は、8.8 [m/s]で右前方より風を受けながら航行していた。直線トラッキン グ時は(4.24)、変針時には(4.27)の線形操縦モデルを使用した。この実験のサージ,スウェ イ,ヨーレート,偏差の平均値、標準偏差を Table 4.15 に示す。

また、この制御方法の有効性を確認するため、風圧力による項を考慮しない場合のトラッキング実験のサージ,スウェイ,ヨーレート,偏差の平均値、標準偏差を Table 4.13 に示す。 直線トラッキング時のΓを(4.28)、変針時のΓを(4.29)と設定した場合のトラッキング結 果を Table 4.14 に示す。

定常風圧外乱を加える場合、Γを調整して、外力に対する調整を行った。モデルに使用 した近似値による風圧力では、大きすぎる場合があったが、平均的に見ると航路偏差は定 常偏差を考慮した方が小さくなっていることがわかる。

このように、風の影響を軽減できることから、この方法は、定常外乱を予想できる場合、 有効であることがわかった。特に Virual Track Route 法を使用する場合と異なる点は、偏差 が発生する前に、外乱を想定した操船を行うことが可能となっていることであり、着桟な どの操船において有効であることが予想される。



Fig. 4.18 定常風圧外乱を想定した場合(c11=c22=1.0)のトラッキング

Table 4.13 定常風圧外乱を想定しなかった場合。

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.23	0.18	6.00	2.53
Sway [m/s]	-0.19	0.13	0.92	-1.13
Yawrate [deg/s]	0.012	0.425	2.400	-1.700
Deviation [m]	-5.6	4.8	5.1	-18.8
Rudder [deg]	0.0	5.9	15.0	-16.0
Wind direction [deg]	198.9	3.6	208.3	188.5
Wind speed [m/s]	8.7	0.4	10.0	7.5

Table 4.14 定常風圧外乱を想定した場合((4.28)、(4.29)を使用)

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.34	0.17	5.21	3.02
Sway [m/s]	-0.21	0.12	0.17	-0.61
Yawrate [deg/s]	0.008	0.390	2.000	-1.400
Deviation [m]	-4.7	2.9	7.3	-13.3
Rudder [deg]	0.0	5.9	15.0	-16.1
Wind direction [deg]	196.0	3.0	205.7	188.5
Wind speed [m/s]	8.5	0.4	9.5	7.5

Table 4.15 定常風圧外乱を想定した場合(c11=c22=1.0)

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.45	0.17	5.95	3.53
Sway [m/s]	-0.23	0.16	0.52	-0.65
Yawrate [deg/s]	0.007	0.476	1.600	-1.900
Deviation [m]	-2.7	3.9	7.5	-13.3
Rudder [deg]	-0.1	7.3	15.0	-16.4
Wind direction [deg]	196.1	2.9	205.7	188.5
Wind speed [m/s]	8.8	0.4	10.0	7.5

4.9 一般船舶への汎用化への考慮

4.6.2で述べた線形モデルでは、あらかじめ流体力微係数 Y, N, Y, N, が得られていなけれ ばならない。一般の船舶では、これら流体微係数を得られていない場合が多い。そこで、 ここで得られた結果の汎用化に備え、これまで得られている主要寸法のみが知られている 初期設計時の微係数推定法を利用したモデルを使った TVLQC 法によるトラッキング試験 結果を示す。

もう一つ汎用化の例として、野本モデルを利用した線型操縦モデルを使用した TVLQC 法 によるトラッキング試験結果を 4.9.3 から示す。

4.9.1 推定した流体微係数モデルによるシミュレーション

ここで流体微係数の推定は、次のような Clark の推定式である^[411]。 Clark の推定式

$$m'_{y} = \frac{\pi}{2} k \left\{ 1 + 0.16C_{B} \frac{B}{d} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^{2} \right\}$$

$$J'_{zz} = \frac{\pi}{2} k \left\{ \frac{1}{12} + 0.017C_{B} \frac{B}{d} - 0.33 \frac{B}{L} \right\}$$

$$-Y'_{v} = \frac{\pi}{2} k \left\{ 1 + 0.40C_{B} \frac{B}{d} \right\}$$

$$-Y'_{r} = \frac{\pi}{2} k \left\{ -\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.080 \frac{B}{d} \right\}$$

$$-N'_{v} = \frac{\pi}{2} k \left\{ \frac{1}{2} + 2.4 \frac{d}{L} \right\}$$

$$-N'_{r} = \frac{\pi}{2} k \left\{ \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{d} - 0.56 \frac{B}{L} \right\}$$

$$k = \frac{2d}{L}$$

(4.30)

ここで Jzz = Izz とする。舵については、(4.11)で述べた値(b11, b21)を使用した。理由 は、(4.11)で示した舵の微係数は、元来 MMG 法による推定式であるからである。ここで、L は垂線間長、B は船幅、d は喫水、C⁸ は方形係数である。

(4.30)によって求めた汐路丸の推定流体微係数を使って線形操縦モデル(4.11)と(4.19)を構築した。速力を 10[knots]とし、直線変針ルートに対するシミュレーション結果の平均値と標準偏差を Table 4.16 に、時系列データとプロット図を Fig. 4.19 に示す。



Fig. 4.19 流体微形数を推定してモデルを作成し、シミュレーションを行った結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.54	0.09	4.64	4.34
Sway [m/s]	0.00	0.19	0.57	-0.56
Yawrate [deg/s]	0.000	0.369	1.200	-1.200
Deviation [m]	0.1	5.1	16.5	-15.5
Rudder [deg]	0.0	5.9	15.0	-15.0

Table 4.16 推定微係数による線形操船モデルシミュレーション結果

4.9.2 推定した流体微係数モデルによる実船実験と解析

操船者により速力 10 [knots] 程度になるように CPP 翼角を設定し、実船実験を行った結果の平均値と標準偏差を Table 4.17 に、プロット図と時系列データを Fig. 4.20 に示す。

Fig. 4.20 から、航路偏差は 10[m] 程度に収まっていることがわかる。Fig. 4.20 の左に示した時系列データをみると、変針のため大きく舵を取り、変針後はルート上を 5[deg] 程度の操舵でトラッキングを行うことができた。

これらの結果、推定モデルによっても制御が可能であることがわかり、他の一般船舶への汎用化の可能性が開けた。

Table 4.17 推定した流体微係数による実船実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	5.55	0.50	9.62	0.89
Sway [m/s]	0.04	0.28	1.56	-1.98
Yawrate [rad/s]	-0.004	0.483	1.400	-1.500
Deviation [m]	1.2	5.8	10.1	-12.0
Rudder [deg]	-0.2	6.8	14.9	-10.8
Wind direction [deg]	242.4	10.4	267.6	205.7
Wind speed [m/s]	3.5	0.3	4.2	2.8



Fig. 4.20 流体微係数を推定して作成した操船モデルによるトラッキング実験結果

4.9.3 野本モデルによる線形操縦モデルを使用した TVLQC 法によるトラッキング 制御

有名な野本モデルは、建造後の実船実験で使われることが多い。そこで、一般船舶によるトラッキングに応用するため、さらに野本モデルによる次のような線形操縦モデルを作り、TVLQC法によりトラッキングを行った。

野本モデルを用いる変針用の線形操縦モデルは

$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}$	$-\frac{1}{T}$	$\binom{0}{0} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} +$	$\begin{bmatrix} \frac{K}{T} \\ 0 \end{bmatrix}$	δ	(4.31)
---	----------------	--	--	---	--------

とする。またトラッキング用のモデルは

[r]	[-1/T	0	0][<i>r</i>	1	$\left\lceil K/T \right\rceil$]
$ \psi$	=	1	0	0ψ	· +	0	δ (4.32
ý		0	и	0][y		0	

とする。ここで、Tは野本の追従性指数、Kは旋回性指数である。

4.9.4 野本モデルを使った TVLOC 法によるトラッキングシミュレーション

船速を 10 [knots] とし、外乱を考慮しない。シミュレーション結果のサージ,スウェイ,ヨーレート、偏差、舵角の平均値、標準偏差を Table 4.18 に、プロット図と時系列データを Fig. 4.21 に示す。

Table 4.18 野本モデルによるトラッキングシミュレーション結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.53	0.10	4.64	4.30
Sway [m/s]	0.00	0.19	0.64	-0.61
Yawrate [deg/s]	0.000	0.371	1.300	-1.300
Deviation [m]	0.1	4.7	13.7	-16.0
Rudder [deg]	0.0	6.8	15.0	-15.0



Fig. 4.21 野本モデルによるトラッキングシミュレーションプロット図

4.9.5 野本モデルを使った TVLQC 法によるトラッキング実船実験と解析

操船者により速力 10[knots]程度になるように CPP 翼角を設定し、野本モデルによる線形 操縦モデルを使った TVLQC 法による実船実験を行った。

このときの重みを(4.33)に示す。この値を基準に、各重みを調整したトラッキングも行った。

実船実験結果を、Fig. 4.22 に示す。サージ、スウェイ、 ヨーレート、偏差、舵角の平均 値、標準偏差を Table 4.19 に示す。

Table 4.20 は、(4.33)の重み R を大きく(10 倍)してトラッキング実験を行った結果の平均値、標準偏差を示す。Table 4.21 は(4.33)の重み R を小さく(0.1 倍)して、トラッキング実験を行った結果の平均値、標準偏差を示す。

Table 4.22 は(4.33)の重み *Q*, を大きく(10倍)してトラッキング実験を行った結果の平均 値、標準偏差を示す。Table 4.23 は(4.33)の重み *Q*, を小さく(0.1倍)してトラッキング実 験を行った結果の平均値、標準偏差を示す。

$$Q_{f} = diag \left\{ \frac{0.001}{r_{\max}^{2}}, \frac{0.01}{\psi_{\max}^{2}}, \frac{1000}{y_{\max}^{2}} \right\}$$
(4.33)
$$Q_{y} = \left[\frac{1000}{y_{\max}^{2}} \right], \quad R = \left[\frac{10000}{\delta_{\max}^{2}} \right]$$

Table 4.19 重み(4.33)によるトラッキング結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.64	1.49	9.52	0.00
Sway [m/s]	0.09	0.82	12.82	-10.09
Yawrate [deg/s]	0.001	0.428	1.600	-1.800
Deviation [m]	3.1	2.9	15.8	-1.7
Rudder [deg]	-1.5	5.3	14.8	-16.3
Wind direction [deg]	245.1	4.1	255.8	232.0
Wind speed [m/s]	11.2	2.0	15.1	7.8

Table 4.20 (4.33)の R を 10 倍に設定してトラッキングを行った結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.56	1.85	17.32	-13.39
Sway [m/s]	0.83	0.81	6.29	-4.56
Yawrate [deg/s]	0.002	0.358	1.300	-1.200
Deviation [m]	2.0	6.9	22.3	-14.1
Rudder [deg]	-1.0	3.4	9.7	-13.7
Wind direction [deg]	247.6	5.6	261.0	232.0
Wind speed [m/s]	12.1	1.4	16.3	9.2

Table 4.21 (4.33)の R を 0.1 倍に設定してトラッキングを行った結果

	Mean	<u>S</u> .D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.32	0.97	8.94	-1.69
Sway [m/s]	-0.04	0.28	2.41	-1.91
Yawrate [deg/s]	0.033	0.487	2.600	-2.500
Deviation [m]	15.0	19.3	80.4	-8.2
Rudder [deg]	-1.6	6.0	14.8	-16.5
Wind direction [deg]	240.9	5.8	255.8	222.8
Wind speed [m/s]	12.3	1.1	15.8	8.2

Table 4.22 (4.33)の Qy を 10 倍に設定してトラッキングを行った結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.13	1.04	16.16	-8.17
Sway [m/s]	-0.23	0.27	2.91	-2.09
Yawrate [deg/s]	0.000	0.350	1.500	-1.400
Deviation [m]	-3.7	2.2	0.5	-9.7
Rudder [deg]	-2.1	4.7	14.7	-16.4
Wind direction [deg]	230.6	4.8	242.6	218.8
Wind speed [m/s]	12.8	1.2	16.1	10.1

Table 4.23 (4.33)の Qy を 0.1 倍に設定してトラッキングを行った結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.59	0.77	9.36	0.00
Sway [m/s]	0.06	0.23	0.83	-0.68
Yawrate [deg/s]	-0.005	0.509	1.700	-1.700
Deviation [m]	3.0	3.4	10.5	-7.7
Rudder [deg]	-2.2	5.8	14.8	-16.5
Wind direction [deg]	236.2	6.4	254.4	220.2
Wind speed [m/s]	13.4	1.0	16.0	10.3

Table 4.20 の舵角の標準偏差と Table 4.19 の舵角の標準偏差を比べると、舵に対する重み R を大きくした Table 4.20 の舵角の標準偏差が小さい。また、Table 4.21 の舵角の標準偏差と Table 4.19 の舵角の標準偏差を比べると、舵に対する重み R を小さくした Table 4.21 の舵角の標準偏差が大きい。このことにより、舵に対する重み R を調節することにより、舵の動きを調節することが可能であることがわかった。

偏差に対する重み Q, を変えた Table 4.22 と Table 4.23 は、大きい値を設定した Table 4.22 の 偏差の標準偏差は小さくなり、小さい値を設定した Table 4.23 の偏差の標準偏差は大きく なった。このことから Q, の設定によりトラッキングの精度を調節することも可能である こともわかった。



Fig. 4.22 (4.33)の重み設定値を使用した野本モデルによるトラッキング実船実験結果プロ ット図と時系列データ

4.10 最短時間ルートのトラッキング実船実験と解析

これまでの実験の問題設定は、**直線変針ルート(Simple Tracking Route)**であった。本節では、正司、岡崎^[42]等によって計算された最短時間ルートに対するトラッキング実験を行う。

ルートの設定方法は、4.2 に示した通りである。実験はまず、次の方法で行った。

- (1) TVLQC 法で用いるモデルは、水槽実験時のモデルとする。
- (2) 直進時は、これまで述べた TVLQC 法によるトラッキング法を使う。
- (3)変針点近傍すなわち、(4.18)によって求める新針路距離以内となった時、変針モデル(4.19)を使用した変針制御を行う。

操船者により速力 10[knots]程度になるように CPP 翼角を設定し、実船実験を行った結果の時系列データとプロット図を Fig. 4.23 に、平均値と標準偏差を Table 4.24 に示す。

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	4.60	0.33	5.30	0.00
Sway [m/s]	-0.26	0.20	0.25	-0.74
Yawrate [deg/s]	0.003	0.723	1.900	-1.500
Deviation [m]	-4.2	8.6	15.4	-17.7
Rudder [deg]	-0.1	8.6	15.2	-15.7
Wind direction [deg]	229.3	13.7	_271.6	179.3
Wind speed [m/s]	4.2	0.6	6.7	3.1

Table 4.24 最短時間ルートトラッキング実験結果

Fig. 4.23 のプロット図を見てわかるように、振れ回りが大きい。これは航路偏差を少な くなるように、*y-ya* にたいする減衰時間を長くしていること、*Q*, は偏差のみを取っている ためである。*Q_y,Q_f* の調整により、トラッキングを変えることが、可能と考えられるが、 このように船の操縦性能を一杯まで使う最短時間操船法に対するトラッキングは、重みの 調整によっては、発散することがある。

また、ウェイポイント毎にルートの切り替えを行い、ウェイポイント間の直線ルートに 対するトラッキングを行うため、目標ルートに対し Yawing が起こりやすい原因の1つと 考えられる。そこで次節では出力(Output)を希望する値にしながら、トラッキングの精 度を改善する方法について述べる。



Fig. 4.23 最短時間ルートトラッキング実験プロット図

4.11 曲線航路指定型 TVLOC 法によるトラッキング実船実験と解析

これまでの TVLQC 法において、望ましい ya としては、適当な間隔でウェイポイントを 設定し、その間を直線で結んだ航路を採用した。ここでは、予め望ましい曲線を与え、そ の曲線を航路としてトラッキングする、曲線航路指定型 TVLQC 法について検討する。

ここでは、望ましい航路として、次のような2つの曲線航路をとりあえず作成した。ひ とつは、望ましい舵角制限 & (たとえば常用舵角15度)を与えた時の応答を、野本の 1次系近似式

 $T\dot{r} + r = K\delta_{A}$

 $\delta_d = r_d / K$

(4.34)

(4.35)

で解き、その曲線状の航跡を求める。そして、次の直線予定航路に至ったときは、次の 直線航路を希望航路に設定する方式である。この方式では、切り返しの当て舵を与えてい ないので、次の直線航路に移行する時に、少し不自然が起きるが、簡単な方法であるので、 まずこの曲線航路をひとつの希望航路として設定する。このとき、ヨーレートを制限した いならば、

と設定すればよい。ここで、ra は希望するヨーレートの値である。この航路を今後、簡 易曲線航路と呼ぶ。Fig. 4.24 は、ヨーレートを 0.5 [deg/sec]に制限したときの簡易曲線航路 である。



Fig. 4.24 簡易曲線航路

Fig. 4.24 中に表示した2重丸は、OSB アルゴリズムを適用する場合、開始時間 to から終端時間 tf までは、この2重丸の航路を希望曲線航路として採用することを示している。したがって次の制御時刻では、2重丸はひとつづつ上方に移行することになる。

Fig. 4.25 は本法によるシミュレーション結果を示す。この節では、(4.32)に示した野本モ デルによる線形操縦モデルを使用する。この時の評価関数の重みは、船首角速度の制限を 0.5 [deg/sec]、舵角制限を±10 [deg]、船速を5 [m/s]とした。

$$Q_{f} = diag \left\{ \frac{10}{r_{\max}^{2}}, \frac{100}{\psi_{\max}^{2}}, \frac{100}{y_{\max}^{2}} \right\},$$

$$Q_{y} = diag \left\{ \frac{10000}{r_{\max}^{2}}, \frac{1000}{\psi_{\max}^{2}}, \frac{10000}{y_{\max}^{2}} \right\}, \quad R = \left[\frac{1500}{\delta_{\max}^{2}} \right], \quad y_{\max} = 3.0$$
(4.36)

この結果の特徴は、直線状航路と曲線状航路を連結する部分で、トリガー状のバンバン 操舵が現れることである。ヨーレートは、0.5[deg/s]以内でトラッキング制御が可能とな ることがわかる。

Fig. 4.26 は、簡易曲線航路による変針を行った時の実船試験の結果を示す。この結果を 見ると無理なく与えた曲線を追従していることがわかる。



Fig. 4.25 ヨーレート 0.5 [deg/s]以内を目標にしたトラッキングシミュレーション結果プ ロット図と時系列データ



Fig. 4.26 ヨーレート 0.5 [deg/s] 以内を目標にした実船実験結果プロット図と時系列デー タ

もうひとつは、岡崎等^[42]が与えた最短時間変針曲線を希望航路として設定する方法である。この航路を最短時間変針航路と呼ぶ。

Fig. 4.27 は、最短時間変針航路のトラッキングシミュレーション結果を示す。これまでのように、最短時間操船法の解から任意の間隔でウェイポイントを取りだし、そのウェイポイントを結ぶ直線に対するトラッキング制御ではなく、得られた最短時間操船法の解から、Fig. 4.24 に示した方法により目標とする出力データを与える。

図によると、曲線状航路において、若干の追従不能域があるが、Yawing を抑制したトラッキングが可能であることがわかる。この追従不能の理由は、最短時間解が非線形操縦運動モデルによる最適解であるのに対して、TVLQC 法は線形制御であることに起因している。

なおシミュレーションにおいては、重みは

$$Q_{f} = diag \left\{ \frac{1}{r_{\max}^{2}}, \frac{1}{\psi_{\max}^{2}}, \frac{20}{y_{\max}^{2}} \right\},$$

$$Q_{y} = diag \left\{ \frac{1}{r_{\max}^{2}}, \frac{1}{\psi_{\max}^{2}}, \frac{20}{y_{\max}^{2}} \right\}, \quad R = \left[\frac{1500}{\delta_{\max}^{2}} \right], \quad y_{\max} = 3.0$$
(4.37)

と設定した。

Fig. 4.28 は、最短時間変針航路に対するトラッキングの実船試験の結果であるが、変針部において若干の偏差が見られる。曲線航路部でシミュレーション通り若干の航路偏差が 生じている。



系列データ



Fig. 4.28 最短時間変針航路のトラッキング実験結果プロット図と時系列データ

4.12 結言

本章では、問題を高速航行時のトラッキング問題とし、舵のみによる航路追従制御問題 を取り扱った。

設定した問題は、2つのウェイポイントを設定した単純な航路(Simple Tracking Route)と 最短時間幅寄解にウェイポイントを設定した航路(最短時間ルート)とした。

制御方式としては、まず命令針路に次の針路を指示し、航路偏差が指数減衰関数によっ て減少するトラッキングシステムを検討した。

次に舵に直接信号を与える方式として、TVLQC 法を使ったシステムを開発し、以後全て この方法を検討した。

供試船は全て東京商船大学「汐路丸」としてシミュレーション、実験を繰り返した。

これらのシミュレーションと実船実験の結果から、以下の結論を得た。

- (1)命令針路に指数減衰関数によって決定された針路を与える針路指定法による変針・ 幅寄せトラッキングの実船実験の結果、減衰距離係数 La の調整により、容易にトラ ッキングを行うことが可能であることがわかった。
- (2) 舵に直接命令舵角を指令する TVLQC 法によるトラッキングでは、目標ルートからの偏差が大きくても、少ないオーバーシュートで目標ルート上をトラッキングすることが可能であることが、設定した2つの問題に対する実船実験から明らかになった。 さらにトラッキングの精度を許容範囲に抑えつつ、操舵量を抑えることも可能であることがわかった。
- (3) トラッキング中の定常偏差に対する処理として、発生した定常偏差を計算し、目標 ルートを発生した定常偏差の方向と反対側に設定することで解消する Virtual Ttrack Route 法が有効なことわかった。
- (4) 風圧力を考慮した線形操縦モデルを使用した TVLQC 法によって、予め外乱を打ち 消した操船が可能であることがわかった。
- (5)流体微係数を船体要目から推定し、その推定した微係数から線形モデルを構築し、 TVLQC 法によってトラッキング制御を行う方法も有効であった。また、野本モデル を使用した場合も TVLQC 法によるトラッキングが可能であった。このことによって、 本方法が汐路丸以外にも汎用性を持っていることがわかった。
- (6)設定出力の設定項目を偏差だけでなく船首方位、ヨーレートを設定することによって、ヨーレート、船首方位をも希望する値に設定して制御するトラッキング制御が可能となった。

以上のことから、提案した TVLQC 法によるトラッキングは、比較的高速領域の舵のみに よる港内操船の諸局面において、有効なことがわかった。

参考文献

- [4.1] Arthur E. Bryson, Jr.: Dynamic Optimization. ADDISON-WESLEY
- [4.2] 岡崎忠胤:最短時間自動着桟操船に関する研究、名古屋工業大学博士論文、1998
- [4.3] H. Mizuno, T. Okawa, I. Komie: Route Tracking System by Adaptive Autopilot, Proc. of CAMS'89, Copenhagen, Denmark, pp.77-82, 1989
- [4.4] H. Fukuda, K.Ohtsu: The Development of a Ship's Guidance System with Optimal Control, Methods and Models in Automation and Robotics, pp.217-222, 2001
- [4.5] 今村智之:船舶の自動着桟システム構築に関する研究、東京商船大学修士論文、1999
- [4.6] 福田人意、大津皓平、岡崎忠胤、田崎哲夫、福井寛明:トラッキング制御を利用 した簡易型船舶誘導システム開発、日本航海学会論文集 103 号、pp.41-49, 2000
- [4.7] T.I.Fossen: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994
- [4.8] K.Kvam; Optimal Ship Maneuvering Using Bryson and Ho's Time Varying LQ Controller, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2000
- [4.9] 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. pp.89-94, 2001
- [4.10] 福田人意、大津皓平、田崎哲夫、岡崎忠胤:可変ゲインによる航路誘導制御に関 する研究、日本造船学会論文集第 190 号, pp715-722, 2001
- [4.11] 福田人意、大津皓平:可変ゲインによる航路誘導について、誘導制御シンポジウム, pp.111-118, 2001
- [4.12] H.Fukuda, K.Ohtsu: Recent Development of Ship's Tracking Problems, 7th Academic Symposium between Japan and China Institute of Navigation, pp.13-20, 2001
- [4.13] 本田啓之輔:操船通論、成山堂書店

第5章 低速航行時における TVLQC 法によるトラッキング 制御

5.1 緒言

船舶が低速航行中は、舵へのプロペラ流入速度はが減少し、これに伴い舵力が減少するため制御が困難となる。この章では、低速航行中に舵を使わず、Bow Thruster (B/T)を使った TVLQC 法による低速航行時のトラッキングのシミュレーション、実船実験結果について 述べる。

ただし、汐路丸は3[knots]程度の速力を維持している状態では、舵による変針が可能で ある。そこで、この速度領域における B/T と舵との併用によるトラッキングシミュレーシ ョンと実船実験を行った結果についても述べる。

低速時の操縦モデルについては、これまであまり研究がなかった。したがって現代制御論 を利用した制御法に関する研究も、ダイナミックポシショニング(Dynamic Positioning)で使 われる方法以外は皆無に等しい。またスラスタ応答モデルにしても、詳細な検討がなされ たことはあまり無い。そのような状況の中で TVLQC 法を使った実験により、この TVLQC 法の有効性が確かめられれば、自動着桟システム開発に大きな進展が期待できる。

5.2 低速航行時のバウスラスタによる線形操縦モデル

初めに、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。高速時と同様に、 状態ベクトルにはスウェイ、ヨーレート、Yaw、偏差をとり、アクチュエータは B/T のみ とする。

ここでのトラッキング制御時、線形操縦モデルは、MMG モデルを使って、以下のように 構築する^{[52],[53],[54],[56]}。Fig. 5.1 は、ここで使う船体固定の座標系を示す。



$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{P,bth}$$

(5.1)

ここで

$$a_{11}(u_{0}) = \frac{1}{m + m_{y}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP} dY_{v} \right\}$$

$$a_{12}(u_{0}) = \frac{1}{m + m_{y}} \left\{ -mu_{0} + \frac{1}{2} \rho L_{PP} dY_{r} \right\}$$

$$a_{21}(u_{0}) = \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP}^{2} dN_{v} \right\}$$

$$a_{22}(u_{0}) = \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \left\{ \frac{1}{2} \rho L_{PP}^{2} dN_{r} \right\}$$

$$b_{11}(u_{0}) = \frac{1}{m + m_{y}} T_{B}$$

$$b_{21}(u_{0}) = \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} T_{B} \cdot x_{B}$$

ここで、 $\theta_{P,bh}$ は B/T ピッチ角、 T_B は出力係数で、汐路丸の場合 66.184 [kg/deg]、 x_B は B/T の x 軸方向の位置で 17.5 [m]とする。低速時の流体力微係数は Table 5.1 に示す。各微係数は速度に応じた線形補間を行う。

変針時の線形モデルも MMG の考え方に準拠し、次のようにする。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{P,bih}$$
(5.2)

Table 5.1 汐路丸低速時の流体微係数

Speed [knots]	u [m/s]	Yv	Yr	Nv	Nr
-1.4	-0.72022	-0.03557	-0.17913	0.013795	-0.28094
0	0	0	0.179128	0	-0.28094
1.4	0.720222	-0.03557	0.179128	-0.0138	-0.28094
3	1.543333	-0.33491	0.036669	-0.1299	-0.05751

5.3 低速航行時のバウスラスタを使った TVLQC 法によるトラッキング制御

5.3.1 問題の設定と制御方式

本章における問題のウェイポイントの設定は、高速時と同様に2回変針を必要とするルート(Simple Tracking Route)とする。3[knots]程度の速力を想定するので、ウェイポイント間の 距離を短く設定する。ここでも、ウェイポイントに近づいたとき、ウェイポイント間を結 ぶ直線を切り替え、この直線に対する偏差を少なくするように変針制御に切り替える。そ のためのウェイポイントの切り替え距離は50[m]と設定する。ウェイポイントまで50[m] 以内となったとき、変針制御を行い、新針路と船首の差が10[deg]以内となったとき、再 びトラッキング制御に切り替える。

5.3.2 低速航行時のバウスラスタを使った TVLQC 法によるトラッキング制御シミ ュレーション

	Mean	S.D.	Maxmum	Minimum
Surge [m/s]	1.71	0.54	4.53	1.44
Sway [m/s]	0.01	0.00	0.02	0.00
Yawrate [deg/s	-0.003	0.132	0.500	-0.500
Deviation [m]	0.1	2.9	4.3	-7.3
B/T [deg]	0.1	5.3	_15.0	-15.0

Table 5.2 B/T によるトラッキング制御シミュレーション結果

Table 5.2 は、シミュレーションの各値の平均値、標準偏差を示す。Fig. 5.2 は時系列デー タとプロット図を示す。 シミュレーションの結果を見ると、B/Tの翼角制限値± 15[deg]まで使用することで、0.7B 程度の偏差でトラッキングが可能であることがわかる。



Fig. 5.2 低速時 B/T によるトラッキング制御シミュレーションプロット図

92

5.3.3 バウスラスタを使った低速航行時トラッキング実船実験と解析

実船実験では、操船者によって、速力 3 [knots] 程度を保持できるよう、CPP 翼角を調整 し、実験中は、CPP 翼角を固定した。直線ルートの実験結果を Fig. 5.3 に示す。 シミュレーションを参考に重みの設定は、

$$Q_{f} = diag \begin{bmatrix} \frac{1}{1.0^{2}} & \frac{1}{0.017^{2}} & \frac{1}{0.17^{2}} & \frac{1}{1.0^{2}} \end{bmatrix}, \ Q_{y} = \begin{bmatrix} \frac{100}{1.0^{2}} \end{bmatrix}, \ R = \begin{bmatrix} \frac{1000}{0.262^{2}} \end{bmatrix}$$
(5.3)

と設定した。

船首方位と偏差から、外乱によってルートより左へ流されており、かつ、B/T 翼角は2[deg] 程度のまま変化しない。



Fig. 5.3 直線ルートのトラッキング

この原因として、B/Tの応答特性の線形化が不適切であることが考えられる。 そこで、B/Tの応答特性を調べる。これまでの実船実験から汐路丸の B/T 応答特性は、 Fig. 5.4 から

$$T_B(\theta_{bth}) = 26.651\theta_{bth} + 0.157\theta_{bth}^3$$
(5.4)

の関係があることがわかっている。先の実験でも使用した低速航行時のトラッキング制御では、B/Tの線形応答特性として Fig. 5.4 の Approximated line A を採用した。

$$T_B\left(\theta_{bth}\right) = T_{\theta_{bth}}\theta_{bth}, \quad T_{\theta_{bth}} = \frac{850}{15} \tag{5.5}$$

しかし、先の実験において、発生した偏差に対する B/T の翼角は 0 ~ 10 [deg]程度である。 グラフからわかるように、この翼角範囲では、計算上 Approximated line A による値は実際 より大きく発生していることになるが、実際の出力曲線から求めた値はもっと低く、必要 とする推力が足りていないことがわかる。

そこで、 $T_{\theta_{bht}}$ に 2/3 を乗じた値で設定した近似直線が Approximated line B である。B/T 翼角 0 ~ 10 [deg] では、Approximated line A より実際の出力曲線に近づいている。この応答関数を使って線形モデルを構築し、実験を行った結果を Fig. 5.5 に示す。







Fig. 5.5 直線ルートのトラッキング実験結果

実験開始時、制御用 PC へ切り替える時にスムーズにいかなかったため、船首を風に落

とされているものの、B/T により修正されていることがわかる。最大偏差が 0.8B(8[m])程度であるが、ゆっくりとルートに近づいていく様子がわかる。

次に Fig. 5.6 に B/T による変針を含むトラッキング実験結果を示す。速力は 3 [knots] 程度 とし、B/T のみを使用してトラッキング制御をおこなう。実験開始点から前方 300 [m] の位 置、実験開始点から 600 [m] 前方、100 [m] 右方にウェイポイントを設置し、ウェイポイン トを結んだ直線をトラッキングルートとする。ルートは Fig. 5.6 に点線で示している。た だしウェイポイント 50 [m] では、変針モードとし、新しいウェイポイント間のルート方位 と船首方位の差が 10 [deg.] 以内で再び幅寄せの制御を行う制御を行った。 変針時の線形操縦モデルは、

 $\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{P,bih}$ (5.6)

とし、各係数は、(5.1)で使用した値を採用した。

ただし、このような変針実験では、直線航路誘導とは反対に翼角 10 ~ 15 [deg] で行われ ることが想像される。したがってこの場合、直線トラッキング時に採用した Approximated line B では、システムの出力は、解より大きい値が発生することが予想される。このため、 変針中の近似直線は Approximated line A を採用した。

実船実験を行った位置のプロット図 Fig. 5.6 を、船速、船首方位、B/T 翼角とルートからの偏差の時系列とともに示す。初期設定ルート 260 [deg.]、平均風向 47.7 [deg.]、平均風速 2.8 [m/s]であった。偏差平均値は 10.4 [m] (約 1B)であった。

また、このときの幅寄せトラッキングの各重みは、シミュレーションにより

$$Q_{f} = diag \left\{ 1.0/v_{\max}^{2}, 1.0/r_{\max}^{2}, 1.0/\psi_{\max}^{2}, 1/y_{\max}^{2} \right\},$$

$$Q_{y} = \left[10^{-4}/y_{\max}^{2} \right], R_{y} = \left[0.5/\theta_{P,bih\max} \right]$$
(5.7)
変針を行う場合、

$$Q_{f} = diag \left\{ 0.1/v_{\max}^{2}, 10.0/r_{\max}^{2}, 10.0^{3}/\psi_{\max}^{2} \right\}, Q_{y} = \left[1.0/y_{\max}^{2} \right], R = \left[1.0/\theta_{P,bth\,\max} \right]$$
(5.8)

と設定した。

この結果からみると、TVLQC法を用いる B/T のみを使用した低速航行時の直進トラッキング、変針制御などは有効であることがわかる。

また、4.7 に述べた外乱を除去する方法を加えることで、さらに精度の高いトラッキング が可能と考えられる。



Fig. 5.6 変針を必要とするルートのトラッキング実験結果

Table 5.3 変針を行った場合の実船実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	1.68	0.26	2.53	-3.19
Sway [m/s]	-0.09	0.08	0.18	-0.34
Yawrate [rad/s]	0.011	0.222	0.700	-0.800
Deviation [m]	-10.4	6.5	0.0	-20.1
B/T [deg]	-2.0	8.2	16.8	-15.5
Wind direction [deg]	47.7	27.0	359.9	1.2
Wind speed [m/s]	2.8	0.4	3.5	1.8

5.4 パウスラスタと舵を使った TVLQC 法によるトラッキングシミュレーション

本章の緒論で述べたように、汐路丸は、3[knots]程度の速力を維持している場合、大舵角 を取ることによって、操船が可能である。そこで、B/Tと舵を併用し、トラッキングを行 う実験を試みた。アクチュエータに舵と B/Tを使用した線形操縦モデルを、次に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{P,bth} \end{bmatrix}$$
(5.9)

ウェイポイントから 50[m]以内では TVLQC 法による変針制御を行う。この場合、変針用 線形モデルは以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{P,bth} \end{bmatrix}$$
(5.10)

シミュレーション結果を、Table 5.4、Fig. 5.7 に示す。B/T のみを使用したトラッキングシ ミュレーションと比べると偏差の平均値、標準偏差を減少させることができていることが わかる。

Table 5.4 舵と B/Tを使用したシミュレーション結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	1.72	0.55	4.53	0.00
Sway [m/s]	0.01	0.04	0.12	-0.07
Yawrate [deg/s]	-0.002	0.166	0.600	-0.600
Deviation [m]	0.0	1.5	4.1	-3.8
Rudder [deg]	0.2	22.7	35.0	-35.0
B/T	0.4	6.1	24.6	-15.0



Fig. 5.7 舵と B/T を使用したトラッキングシミュレーション結果のプロット図と時 系列データ

5.5 バウスラスタと舵を使った TVLQC 法によるトラッキングの実船試験と 解析

操船者により3[knots]程度に船速を保持し、制御コンピュータによりB/Tと舵を制御し ながら、TVLQC法によってトラッキング制御の実船実験を行った。

その結果を、Table 5.5 と Fig. 5.8 に示す。

この時の、重み設定値は、直線トラッキングの場合、

$$\begin{aligned} Q_{f} &= diag \left\{ 0.01/v_{\max}^{2}, 1.0/r_{\max}^{2}, 1.0/\psi_{\max}^{2}, 10.0/y_{\max}^{2} \right\}, \\ Q_{y} &= \left[10^{-4}/y_{\max}^{2} \right], R = diag \left\{ 1.0/\delta_{\max}^{2}, 1.0/\theta_{P,bth\,\max} \right\} \end{aligned}$$
(5.11)

$$\bigotimes \oplus \& \forall T \supset \& \Leftrightarrow \\ Q_{f} &= diag \left\{ 0.1/v_{\max}^{2}, 10.0/r_{\max}^{2}, 10.0^{3}/\psi_{\max}^{2} \right\}, \\ Q_{y} &= \left[1.0/y_{\max}^{2} \right], R = diag \left\{ 100.0/\delta_{\max}^{2}, 1.0/\theta_{P,bth\,\max} \right\} \end{aligned}$$
(5.12)

とした。

Table 5.5 B/Tと舵を使ったトラッキング実船実験結果

	Mean	S.D.	Maximum	Minimum
Surge [m/s]	1.48	0.35	4.38	0.00
Sway [m/s]	-0.02	0.08	0.24	-0.24
Yawrate [deg/s]	0.000	0.200	0.800	-0.900
Deviation [m]	-2.9	6.4	7.9	-12.7
Rudder [deg]	-0.8	8.4	34.0	-35.9
B/T [deg]	-1.5	8.2	13.5	-13.9
Wind direction [deg]	328.5	6.6	344.1	312.5
Wind speed [m/s]	5.0	0.3	5.9	4.2



Fig. 5.8 舵と B/Tを使った低速トラッキング実船実験結果

図からわかるように、B/T に加え舵も併用することによりトラッキング性能は向上していることがわかる。
5.6 結言

本章では、低速航行時のトラッキング制御を可能にするため、TVLQC法による低速域でのトラッキング制御の有効性を確認した。

まず、汐路丸では3[knots]以下では、舵による制御が困難となるため、バウスラスタ(B/T) をアクチユエータとする制御でトラッキングを行った。

次に、汐路丸は3[knots]程度の船速を保持している状態では、舵による制御も多少は可能であるので、あわせて B/T と舵を併用したトラッキングも行った。

設定した問題は全て、Simple Tracking Route への追従問題とした。

シミュレーションと実船実験から、次のことがわかった。

- (1) TVLQC法による B/Tを使用したトラッキングでは、シミュレーションと実船実験の両方において、TVLQC法の有効性を確認することができた。低速航行時では、外乱の影響も大きくなるので、第4章で示した定常外乱を打ち消す制御を加えることにより、さらに高精度の制御が可能であると考えられる。
- (2) 舵がまだわずかに効く、3[knots]付近を維持したまま、B/T と舵を併用してトラッ キング実験を、TVLQC 法によって行った。この結果、2つのアクチュエータを使用 することにより、船首の制御と偏差を、B/T のみの制御より減少させることが可能 であった。

これら結果は、本方法の低速時における有効性を示しており、自動着桟システム開発に大 きな進展が期待できるものである。

参考文献

- [5.1] Arthur E. Bryson, Jr.: Dynamic Optimization. ADDISON-WESLEY
- [5.2] T.I.Fossen: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994
- [5.3] H.Fukuda、K.Ohtsu: Recent Development of Ship's Tracking Problems, 7th Academic Symposium between Japan and China Institute of Navigation, pp.13-20, 2001
- [5.4] 福田人意、大津皓平、田崎哲夫、岡崎忠胤:可変ゲインによる航路誘導制御に関 する研究、日本造船学会論文集第 190 号, pp.715-722, 2001
- [5.5] K.Kvam; Optimal Ship Maneuvering Using Bryson and Ho's Time Varying LQ Controller, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2000
- [5.6] 正司公一、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, pp.365-373, 1994

第6章 着桟操船への応用への試み

6.1 緒言

本章では、第4章、第5章で述べた TVLQC 法のトラッキング制御の結果を拡張し、着桟 操船システムの開発を試みた結果について述べる。

ところで、着桟操船の自動システムによる実船実験は試みられた例は少ない。そのうち高 井・大津^[61]による汐路丸による実験では、日本の着桟操船でよく見られる一旦岸壁沖合 に適当な距離を離して岸壁に平行に停船させ、その後、曳船で平行に横移動させる方法を 採用している。当時は GPS が無かった関係上、光波式距離計が開発され、それを用いて 実験が行われた。制御則は PID 制御則を基本としている。

Pinkster · 萩原^[6,13]などは GPS を使って位置を測定しながら、風に逆らわない Weather Vane 型操船法を開発し実船実験を試みている。制御則は、風の影響を Feedforward する PID 制御 則であった。

第5章までの流れから、当然、著者の関心は、TVLQC法のトラッキング法をできるだけ 応用した自動着桟システムができないか、ということである。本章では、この目的で行っ た種々の試みを示す。

本章のはじめに、これまでの汐路丸の実際の操船を参考に、本章で目標とする2つの操船 段階を設定する。

次に、これら2つの問題に対して、本論文では、操船パターンを、着桟問題を舵とエンジ ンのみによるトラッキングを行っている高速航行時から中速航行状態のアプローチステー ジとそれ以降着桟停止までの、舵が効かないためエンジンとスラスタを使う低速航行状態 のバーシングステージに分けることを提案する。

そして、アプローチステージでは、これまで検討してきた舵による TVLQC 法によるトラ ッキング法が、このステージの速度領域である高速、中速領域でも応用できるものとして、 全て TVLQC 法を使ったトラッキング制御法を使う。

また、バーシングステージの操船法では、TVLQC法に拘泥せず、まずそれぞれのケース に適切と思われる制御法によって停船までの制御を行い、その後、TVLQC法がそれぞれ のケースにおいて有効であるかを調べることとする。

ただし、実船試験ではパラメータの設定に時間がかかり、ひとつの操船法を系統的に行う ことは困難である。したがってここでは、TVLQC法の可能性を探ることとし、ゲインの 最適化まで踏み込んだ議論は行わない。

6.2 着**桟**問題の設定

これまでの章で検討してきた方法から推理すると、停船までの速度変化の少ない場合、例 えば4[knots]付近での速度で定速航行している船舶を、あらかじめ定めた地点に定められ た方向を向いて停船させる制御は、バーシング制御がうまく行けばある程度の精度で実現 できるであろう。なぜならば、舵・バウスラスタ(B/T)併用の低速域での低速トラッキ ング制御は、ほぼ満足行く精度で実現しているからである(第5章参照)。

問題は 10 [knots] 程度の高速域から進入してきた船舶を与えられた地点で与えられた方向 に停船させることが可能かどうかである。

そこで、本章で設定する着桟予定点と着桟予定点までのルートを下図のように設定する。 これらの操船パターンは、現在汐路丸で行っている操船例(Appendix B)を参考に設定した ものである。ただし、速力変化はここでの設定より、実際はやや緩やかではないかと思わ れる。

Fig. 6.1 において、白い船体輪郭が実験開始時の位置と方位、灰色の船体輪郭が停船予定 位置と方位である。



[1] 直線航路着栈

Fig. 6.1 の左のルートは、変針を必要としない着桟予定点と着桟予定点までのルートである。ここではこの着桟計画を直線航路着桟と称する。

着桟予定点での船首方位は、Fig. 6.1 の左に示したルートと着桟予定点を考慮し、ルート から 25 [deg] 左に向けて設定する。B/T,スタンスラスタ(S/T)によるトラッキング制御へ の切り替えは、着桟予定点まで 300 [m] 以内となった時に切り替える。この数値(300 [m]) は、沙路丸の通常使われる減速パターンによるとほぼ 300 [m] 手前で 3 [knots] に達するこ とから採用した。着桟予定点に近づくと、すなわちバーシング最終段階では、着桟予定点 で停船させるための方位制御を加えた制御アルゴリズムに切り替える。バーシング最終段 階に切り替える距離については、後述する。

[2] 変針航路着栈

Fig. 6.1 の右に示したルートは、1回の変針を必要とするルートである。変針点は実験開始位置から 600[m]前方に、着桟予定点は、実験開始位置から 1200[m]前方、300[m]右方へ設定されている。ここでは、この着桟計画を変針航路着桟と称する。

実験開始時の船速を10[knots]、変針点での船速を5[knots]、着桟予定点付近では3[knots] と目標船速を設定し、その間は距離による指数減衰関数によって、減速を行う。ただし変 針制御中は、舵まわりの流速減少による舵圧力の減少を防ぐため船速を一定値(ここでは5 [knots])に保持する。

B/T, S/T によるトラッキング制御への切り替えは、着桟予定点まで 300[m]以内となった時に切り替える。着桟予定点に近づくと、着桟予定点で停船させるための制御アルゴリズムに切り替える。着桟予定点では、船首方位を実験開始時の船首方位と同じ方位を向くように設定する。バーシング最終段階に切り替える距離については、後述する。



Fig. 6.2 着桟予定点までの残距離の計算

実験並び、シミュレーションの実験終了は、着桟予定点までの残距離を表示し、その残距 離によって判断し、X方向の表示速力が0となった点で実験を終了する。

6.3 アプローチステージとバーシングステージ

小瀬^[62]、岡崎^[63]を始め多くのこの種の着桟問題における制御問題に対して、Fig. 6.3 に示 すように2つに操船段階に分けて考えている。ここでも、この方法を踏襲し、制御段階を 分類する。

まず、第1の段階は、操船のアプローチステージ(Approach Stage)と呼ばれる段階である。 この段階は進入点から舵と速力制御のみを行って着桟点にアプローチする段階で、汐路丸 で言えば、およそ3[knots]までの段階である。 第2の段階は、着桟点手前の舵が効かなくなったバーシングステージ(Berthing Stage)と呼ばれる段階である。この段階では舵が効かないので、バウスラスタやスタンスラスタなどを併用して、変針しつつ着桟点に船を向かわせ、停船させる。汐路丸でいえば3[knots]以下、停船までの段階である。



Fig. 6.3 アプローチステージとバーシングステージ

6.4 2つの操船段階における制御方式

ここでは、6.2 で設定した問題における、アプローチ、バーシングの2つの段階での制御 方式について考える。すなわち、これまで検討してきた TVLQC 法を中心とした方法をこ の問題に適用する場合、どのような組み合わせで臨めば良いかという問題である。

ところで、ここで述べた着桟問題において、これまで検討していない問題は、速力変更特 に舵効きの悪くなる減速中のトラッキング法の検討である。

ここでは、アプローチ操船は、速力変化がある場合でもその速度領域は高速、中速領域で あるとして、全て舵による TVLQC 法を使うこととした。

これに対して、バーシング操船では、直線航路着枝に関しては、まず比較的簡単な、指数 減衰関数による岸壁接近方法を試した後、TVLQC法によるバーシング着枝方法を試す。

一方、変針航路着桟に関しては、まず経験のある Pinkster^{[6,12],[6,13]}などの WVDPS (Weather Vaning Dynamic Positioning System)による方法を試した後、TVLQC 法によるバーシング着枝 方法を試す。

ただし、これら2つの着桟ケースにおける速力制御には、次節で述べる PID 制御と、 TVLQC 法に含める用法を用いる。

さらにバーシング操船において、速力制御に TVLQC 法を使う方法および外乱の影響を考慮した方法も試す。

第6章 着桟操船への応用への試み

Table 6.1 は、本章で行う実験のマトリクスである。

Table 6.1 着桟実験の一覧

		位置制御	速度制御	バーシング	舵	CPP	B/T	S/T	節番号
				制御					
直線航路着栈	シミュレーション	_	-	_	-	-	-	-	
	実船実験	TVLQC	PID	指数減衰	0	0	0	×	6.6.1
直線航路着栈	シミュレーション	TVLQC	PID	TVLQC	0	0	0	×	6.6.2
	実船実験	TVLQC	PID	TVLQC	0	0	0	×	6.6.2
直線航路着栈	シミュレーション	TVLQC	PID	TVLQC	0	0	0	0	6.6.3
	実船実験	TVLQC	PID	TVLQC	0	0	0	0	6.6.3
直線航路着栈	シミュレーション	TVLQC	PID	TVLQC	0	0	0	×	6.6.4
風圧力を考慮	実船実験	-	_		_	_	_	-	
変針航路着桟	νεί-νεί		-	-	-	_	—		
	実船実験	TVLQC	PID	WVDPS	0	0	0	0	6.7.1
変針航路着栈	シミュレーション	TVLQC	TVLQC	TVLQC	0	0	0	×	6.7.2
	実船実験	TVLQC	TVLQC	TVLQC	0	0	0	×	6.7.2

6.5 速力の設定と速力制御則

ここでは、6.6節の初めの3つの実験で使う速力制御則について述べる。

6.2 で設定した速力変更パターンでは、実験開始位置から直線 600[m]の位置に停止点を 設定し、着桟予定点まで 300[m]となった時点で 3[knots]以内にし、B/T によるトラッキン グモードに切り換え、600「m]の停止点で速力をゼロとする必要がある。

そこで、船速の制御は、目標とする船速を設定し、着桟予定点までの残り距離により指数 的に減速させるように、次式の可変ピッチプロペラ(CPP)の翼角を制御する方法を採用 する[6.4]。

$$V_{set} = \left(V_h - V_l\right)e^{\left(-l/L_d\right)} + V_l$$

ここで、

(6.1)

:目標船速

 V_{set} V_h, V_l :減速前の船速と減速後の船速

:減速開始位置からの距離 l

 L_d :減速係数(実船実験では50[m]と設定)

である。そしてこのような制御を実現するため、次式のような PID 制御則によって CPP 翼角を制御する。

$\dot{\theta} = K_P \left\{ V_1 - V_2 + \frac{\Delta t}{T_I} V_1 - V_2 + \frac{\Delta t}{T_I} V_1 \right\}$	$\left\{1 + \frac{T_D}{\Delta t} \left(V_1 + 2V_2 + V_3\right)\right\}$	(6.2)
ここで,		
Δt	: サンプリング間隔	
V_1	: 目標船速と現在の船速と	の差
V_2	:1ステップ前の目標船速	と現在の船速との差
V3	:2ステップ前の目標船速	と現在の船速との差
K_P, T_I, T_D	: PID ゲイン(K _P = 0.5, T	$T = 25, T_D = 0.1$

である。

6.6 直線航路のトラッキングと着桟操船

本節では、まず直線航路着桟について述べる。

6.6.1 指数減衰方式を利用した操船

まず、バーシングステージに指数減衰方式で岸壁に接近する操船方法による着桟を行った 結果を示す^[610]。操船方法は着桟予定点から 100 [m] 以内となった場合、バーシングステー ジへ切り替える。

[アプローチ時の操船法]

TVLQC 法とする。

[バーシング時の制御則]

指数減衰方式とする。この制御法は 4.5.1 ですでに述べたとおりである。

ただし、ここで船首制御は B/T のみを使用することとする。B/T の制御則は以下に示す 通りである。

まずアプローチ操船に切り替わった時点でDを設定する。着桟予定点へ近づくと、目標 針路を修正していく。着桟予定点に接近するため、指数的に着桟予定点に収束させる針路 を刻々と計算する。命令針路(ゅ)を、着桟予定点での船首方位(ゅ)に対する修正角度 (θu)の和によって求める。



Fig. 6.4 指数減衰方式による着桟操船

$$\theta_{bth} = K_P \left\{ r + T_d \left(r - r_1 \right) / \Delta t \right\}$$

ここで

 Δt

: サンプリング間隔

r

: 現在の船首と目標針路の差

 r_1

: 1ステップ前の現在の船首と目標針路の差

 K_P, T_I

: PD ゲイン ($K_P = 29, T_I = 10$)

(6.3)

船速の制御は Fig. 6.5 に示すように、着桟予定点までの距離に応じた速度をあらかじめ設 定する。CPP 翼角は(6.4)によって求める^[611]。



$$\theta_{P} = K_{P} \left\{ Dev + T_{D} (Dev - Dev_{1}) / \Delta t \right\}$$
 (6.4)
ここで
 Δt : サンプリング間隔
 Dev : 船体重心位置から着桟予定点までの距離
 Dev_{I} : 1ステップ前の船体重心位置から着桟予定点までの距離.
 K_{P}, T_{I} : PD ゲイン ($K_{P} = 29, T_{I} = 10$)

[実船実験と評価]

実船実験の結果を Fig. 6.6 に示す。初期針路 300 [deg]、風を右後方から受けて実験を行ったが、着桟予定点と停船位置との距離は、X 方向へ 0.8B、Y 方向へ 0.64B で、ほぼ指定した点に停船できた。

ただし、この方法では外乱の影響を考慮できない欠点がある。





6.6.2 B/T のみを使う TVLQC 法による着桟操船

次に、バーシングステージに TVLQC 法を使った実験を2種類示す。

[アプローチ操船における制御方式]

舵による TVLQC 法によるトラッキングを行う。速度制御は PID 制御とする。バーシング ステージへ切り替えは、着桟予定点から 50[m]以内となったときにおこう。

[バーシング操船における速度制御と位置制御方式」

B/T によるトラッキング制御則は、2点境界値問題を TVLQC 法で解きながら制御する方法とする。この場合、B/T を利用した位置制御の他、CPP を使用した速度制御も含む TVLQC アルゴリズムを使う。ただし、外乱は考慮しない。具体的なアルゴリズムを、次に述べる。



Fig. 6.7 停船操船のための初期条件と終端条件

[2点境界値問題に対する TVLQC アルゴリズム]

この段階での問題を、Fig. 6.7 に示すように2点境界値問題とし、途中のルート設定は行わない。制御変数として、CPPと B/Tを使うことから、次のような線形操縦モデルを仮定する^{[68],[69]}。

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \\ x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{\theta P} & 0 \\ 0 & T_B \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_P \\ \theta_{bdh} \end{bmatrix}$$
(6.5)

ここで、a11 ~ a22 は第5章の低速トラッキング制御で述べた値を用い、Tu、TeP につい

ては、以下のように近似した。

$$\tilde{\theta}_{P} = \theta_{P} + \frac{C_{0} - C_{1}C_{T0} + C_{4}C_{T0}^{2} - C_{8}C_{T0}^{3}}{\left(C_{1} - 2C_{4}C_{T0} + 3C_{8}C_{T0}^{2}\right)}$$
(6.6)

$$T_{u} = \frac{1}{m + m_{x}} \left\{ \left(1 - t_{P} \right) \rho n D_{P}^{3} \left(C_{2} - C_{3} C_{T0} + C_{6} C_{T0}^{2} \right) \left(1 - W_{P} \right) \right\}$$
(6.7)

$$T_{\tilde{\theta}_{P}} = \frac{1}{m + m_{x}} \left\{ \left(1 - t_{P} \right) \rho n^{2} D_{P}^{4} \left(C_{1} - 2C_{4}C_{T0} + 3C_{8}C_{T0}^{2} \right) \right\}$$
(6.8)



Fig. 6.8 停船操船時の座標系

この場合、評価関数及びリッカチ方程式は [評価関数]

$$J = \frac{1}{2} e_f^T Q_f e_f + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[x^T Q x + u^T R u \right] dt$$

$$e_f = M_f x \left(t_f \right) - \Psi$$
(6.9)

[リッカチ方程式]

$$\dot{S} = -SA - A^T S - Q + SBR^{-1}B^T S, \quad S(t_f) = M_f^T Q_f M_f = S_f$$
(6.10)

$$\dot{g} = -\left[A - BR^{-1}B^{T}S\right]^{T}g, \quad g\left(t_{f}\right) = -M_{f}Q_{f}\Psi$$
(6.11)

となる。ここで、Ψは着桟予定点での本船の状態を表す。着桟予定点の座標(*xBerth*,*yBerth*) と船首方位(*ψBerth*)を設定し、速度(*u*,*v*)とヨーレート(*r*)を0とする。そこでΨと*Mf* は次 のように設定する。

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \psi_{Berth} & x_{Berth} & y_{Berth} \end{bmatrix}^{T}$$

$$M_{f} = diag \{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$$
(6.12)

シミュレーションの評価関数の重みの設定を以下に示す。着桟予定点では停船できること を目標とし、Yawへの重みは、比較的小さく設定し、かわりにX方向、Y方向に対する項 を大きく設定した。

$$Q_{f} = diag \left\{ 5.0/u_{\max}^{2}, 0.1/v_{\max}^{2}, 1.0/r_{\max}^{2}, 5.0/\psi_{\max}^{2}, 5000.0/x_{\max}^{2}, 500.0/y_{\max}^{2} \right\},\$$

$$Q = diag \left\{ 1.0/u_{\max}^{2}, 0.01/v_{\max}^{2}, 1.0/r_{\max}^{2}, 1.0/\psi_{\max}^{2}, 100.0/x_{\max}^{2}, 50.0/y_{\max}^{2} \right\},\$$

$$R = diag \left\{ 0.01/\theta_{\max}^{2}, 0.05/\theta_{P,bth\,\max}^{2} \right\}$$
(6.13)

[実船実験結果]

実船実験結果を Fig. 6.10 に示す。

初期針路 240 [deg]、平均風向 233.9 [deg]、平均風速 4.3 [m/s]であった。船速 0 [knots]となった時の着桟予定点までの距離は、着桟予定点から右へ 0.6B(5.67 [m])、前方へ 1.1B(10.95 [m])離れていた。

[評価]

停船点は、ほぼ予定通りであったが、最終方位が B/T のみの方位制御では困難と思われた。





Fig. 6.10 B/T による直線航路着桟実船実験結果プロット図と時系列データ

6.6.3 B/T と S/T を使う TVLQC 法による着桟操船

6.6.2 の実船実験の評価において述べたように、最終段階における方位制御が B/T のみで は困難であった。そこで次に、2 点境界値問題としての TVLQC アルゴリズムはそのまま とし、主として方位制御に S/T を使用する着桟操船を試みた。バーシングステージへの切 り替えは、着桟予定点から 50[m]以内となったときとする。

[線形操縦モデル]

CPP、B/T、S/Tによる停船操船のための線形モデルは以下に示す通りとした。

[評価関数]

評価関数における重み *Q_f*, *Q_y*の設定値は、(6.13)と等しいが、*R*については、次の値を 使用した。

$$R = diag \left\{ 0.01/\theta_{\max}^2, 0.05/\theta_{P,bth\,\max}^2, 10^4/\theta_{sth\,\max}^2 \right\}$$
(6.15)

[実船実験結果]

実験結果を Fig. 6.12 に示す。初期針路 105 [deg.]、平均風向 218.9 [deg.]、平均風速 5.0 [m/s] 船速 0 [knots] となった場合、着桟予定点から右へ 8.6 [m]、6.4 [m]の位置で停船した。 「評価」

停船操船では、B/Tによる船首制御とS/Tによる右へ移動させる推力を出しており方位制 御も改善されている、しかし、CPPによる前進速力が不足していたため停止点に近づくこ とができなかったと考えられる。



Fig. 6.11 停船操船に B/T、S/Tを使った場合の着桟操船シミュレーション結果



Fig. 6.12 停船操船に B/T、S/Tを使った場合の着桟操船実船実験結果

6.6.4 B/Tを使う TVLQC 法による風圧力を考慮した着桟操船シミュレーション

これまでの実験では、風外乱は考慮されていなかった。ここでは、5[m/s]の風を想定し、 風圧力を考慮していない TVLQC 法についてシミュレーションで検討した結果を示す。制 御器は B/T のみを使った。

風外乱が 5 [m/sec] あるが、それを考慮しない TVLQC による着桟制御のシミュレーション 結果を Fig. 6.13 に示す。この図に示すように、風圧力により流されている。そこで、線形 モデルに外乱を考慮しトラッキング着桟操船を行うことにした。

[風圧力を考慮した線形操縦運動モデル]

風圧力による加速度を

$$\dot{u}_{w} = \frac{X_{W}}{\left(M + M_{x}\right)}$$

$$\dot{v}_{w} = \frac{Y_{W}}{\left(M + M_{y}\right)}$$

$$\dot{r}_{w} = \frac{N_{W}}{\left(I_{ZZ} + J_{ZZ}\right)}$$
(6.16)

のように仮定した場合、B/Tによるトラッキング制御の線形操縦運動モデルを、次のように設定できる。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{15} \\ a_{25} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \theta_{P,bth} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_w \\ \dot{r}_w \end{bmatrix}$$
(6.17)

停船操船における操船モデルは、次のように定義される。

[<i>ü</i>]		T_u	0	0	0	0	0]	[<i>u</i>]	$T_{\theta P}$	0]		[1	0	0]
v		0	<i>a</i> ₁₁	<i>a</i> ₁₂	0	0	0	v	0	T_{B}		0	1	0
ŕ		0	<i>a</i> ₂₁	a ₂₂	0	0	0	r	0	$T_B x_B$	$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_P \end{bmatrix}$	0	0	$1 \begin{vmatrix} u_w \\ \vdots \end{vmatrix}$
$\dot{\psi}$	=	0	0	1	0	0	0	$ \psi ^+$	0	0	$\left \theta_{P,bth} \right ^+$	0	0	$0 \begin{vmatrix} v_w \\ \vdots \end{vmatrix}$
ż		1	0	0	0	0	0	x	0	0		0	0	$0 \begin{bmatrix} r_w \end{bmatrix}$
ý		0	1	0	u_0	0	0	[y]	0	0		0	0	o

(6.18)

[制御アルゴリズム]

制御アルゴリズムは、3.2.3 で示したものを使う。

[シミュレーション結果と評価]

風圧力を考慮した TVLQC 法による着桟操船シミュレーション結果を示す。外乱を考慮し、 舵はトラッキング時、5[deg]程度取り、B/T トラッキングに切り替わってから、B/T 翼角 を大きく右へ取る。停船操船では、右へ向けるように出力を出しその後船首方位を保持している。結果は、トラッキング時は 0.5B 程度の偏差となり、着桟予定点から左 1.5 [m]、 着桟予定まで 3.9 [m]の位置で停船できた。









6.7 変針航路のトラッキングと着桟操船

本節以下では変針航路のトラッキングと着桟操船について述べる。

6.7.1 WVDPS (Weather Vaning Dynamic Positioning System) による着桟操船

まず、TVLQC 法の参考にするために行ったバーシング操船に Weather Vaning Dynamic Positioning System (WVDPS)を用い、トラッキングを行った結果について述べる。 本システムはもともと、Dynamic Positioning System のために開発されたものであるが、そ の考え方を停止点付近で使えば、定められた点に停止させることが可能であるとの考え方 から、バーシングモードに応用したものである^{[6,12],[6,13]}。

[バーシング操船での制御アルゴリズム]

WVDPS 法では、Fig. 6.15 に示すように、地球上に設置された指定点 (Specified Point (S.P)) に船体上の制御点 (Reference Point)を一致させるべく、船首尾船方向距離 Δx、正横方向距離 Δy から (6.19) により CPP 推力 Fx と B/T 推力 Fy を求める。



Fig. 6.15 WVDPS アルゴリズム

$$F_x = a_x \Delta x + b_x V_x + c_x \int_0^T \Delta x dt - R_x$$

$$F_y = a_y \Delta y + b_y V_y + c_y \int_0^T \Delta y dt - R_y$$

(6.19)

ここで、 $V_x = d\Delta x/dt$, $V_y = d\Delta y/dt$ 、 R_{x,R_y} は船首尾船方向と正横方向の風圧力である。 バーシングモードでは S.P.を着桟予定点まで移動させることで、船体を着桟予定点まで移動させ停船させる。さらに船首方位を着桟予定点での方位に合わせるため、S/T により船 首制御を行う。

S/Tの出力は、次式により求める。

$$F_s = a_s \Delta \theta + b_s \left(d\Delta \theta / dt \right) \tag{6.20}$$

ここで

 $\Delta \theta$:予定船首方位からの偏差、 a_s :比例フィードバックゲイン、 b_s :微分フィードバックゲインである。



Fig. 6.16 S.P.を着栈予定点まで移動させる

ここで使用するゲインは、次の通りである。

 $a_x = 120.0, \quad b_y = -3000.0, \quad c_x = 0.0$ $a_y = 120.0, \quad b_y = -1000.0, \quad c_y = 0.0$ $a_s = 300.0, \quad b_s = 300.0$

(6.21)

[実船実験]

実船実験の結果を Fig. 6.17 に示す。WVDPS へ切り替えは、着桟予定点から 100 [m] 以内となった場合に行った。

初期設定針路 90 [deg.]、平均風向 212.7 [deg.]、平均風向 2.4 [m/s]であった。アプローチ操船において、かなりの Yawing を起こしたが、船速 0.0 [knots] となった時点で着桟予定点から 0.3B のずれに収まった。方位は、ほぼ予定方位を向いている。

[評価]

最終点での方位、位置は良いが、途中振れ回りを起こしている点が改良すべき点として残る。



Fig. 6.17 WVDPS を使用した停船操船による着桟実船実験結果

6.7.2 速度制御を線型モデルに含めた TVLQC による着核操船

これまでの実験結果をみると、多くの場合、変針後ヨーイングが発生していることがわか る。この問題を解消するために、速度制御を線形モデルに含め着桟操船を行うことを試み る。

[線形操縦運動モデル]

変針中、減速を行うため、次の線形モデルを使用した。*a11 ~ a22 と b11 ~ b21* は(4.11)に示す。ここでは、これまで述べてきた線形モデルに速度の項を加えている。

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_u & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{\theta P} & 0 \\ 0 & b_{11} \\ 0 & b_{21} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_P \\ \delta \end{bmatrix}$$
(6.22)

このとき、出力yは

$$\mathbf{y} = Cx + Du, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = 0$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_{d} = \begin{bmatrix} u_{d} \\ y_{d} \end{bmatrix}$$
 (6.23)

ya はルートからの偏差を表し、ua は着桟予定点までの残距離に応じた目標船速が設定した。

[制御アルゴリズム]

すでに 4.11 で、この場合のアルゴリズムは示した。バーシングステージへ切り替えは、 着桟予定点から 50[m]以内となった場合に行われる。

[評価関数における重み]

$$Q_{f} = diag \left\{ 0.001/u_{\max}^{2}, 0.01/v_{\max}^{2}, 1.0/r_{\max}^{2}, 0.1/\psi_{\max}^{2}, 100.0/y_{\max}^{2} \right\},\$$

$$Q_{y} = diag \left\{ 0.1/u_{\max}^{2}, 0.1/y_{\max}^{2} \right\}, \quad R = diag \left\{ 0.0001/\theta_{\max}^{2}, 500/\delta_{\max}^{2} \right\}$$
(6.24)

[シミュレーション結果]

Fig. 6.18 にシミュレーション結果を示す。変針制御の後 210 [sec] 付近で CPP 翼角が 5 [deg] まで大きくなっていることがわかる。この CPP の動きは変針後の舵まわりの流速増加に よる舵圧力増加によって、舵による制御を行うことを容易にすると考えられる。

ただし、B/Tの動きがかなり激しい。そこで、次の実船実験では、フィルタを掛けて用いる必要がある。

[実船実験結果と評価]

実船実験の結果を Fig. 6.19 に示す。変針時少し(0.5B)程度オーバーシュートしたが、変 針後のヨーイングは抑えられ、偏差が少なくなっていくことがわかる。Fig. 6.17 の変針後 と比べるとヨーイングが起こりにくくなり、ほぼ指定された航路に追従している。着桟予 定点から 50 [m] 以内での方位制御と位置制御を同時に行う操船は、着桟予定点より右方向 へ流され、最終的には横方向には 3B、前進方向に 1B (B=10m)の誤差で停船させることが できた。

[評価]

本実験では、停船点の右方向で停船していることを修正すること以外は、ほぼ予定通りの 制御ができている。今後は、この最終段階における速度制御と、方位制御、位置制御の重 みのバランスを最適にすれば、B/Tのみの操船制御も可能となったと評価できる。



Fig. 6.18 速度制御を含めた TVLQC 法による着桟操船シミュレーション結果プロット図と 時系列データ



Fig. 6.19 速度制御を含めた TVLQC 法による着桟操船実船実験結果プロット図と時系列デ ータ

6.8 結言と展望

本章では、それ以前の TVLQC 法によるトラッキング制御の成果を踏まえ、TVLQC 法を できるだけ有効に使う自動着桟制御の試みについて述べてきた。実船実験では、少ない時 間を有効に使わねばならない制約上、詳しいゲイン調整を行えなかったものの、次のよう な知見と展望が得られた。

まず、目的を、TVLQC法による高速時の舵によるトラッキングの有効性を着桟操船に応用し、低速時における B/T によるトラッキング制御を組み合わせ、その有効性を確認する こととした。

つづいて、これまで行われた自動着桟の実船実験例について調査した。その結果著者の知 りうる限りでは、汐路丸を対象とした2例のみであることが分かった。

次に、本章で取り扱う着桟計画を、汐路丸の操船例を参考に

(1) 直線航路を航進し、回頭着桟させる操船(直線航路着桟)

(2)変針後航進し、回頭着桟させる方法(変針航路着桟)

の2つの問題に設定した。

また、これらの問題に、これまで研究された方法を踏襲し、高速域から3ノット程度まで の舵とエンジン操作のみによるアプローチステージとその後停船に至るバウ・スタンスラ スタ、エンジンを使うバーシングステージに分けて考察することとした。

これまで、検討してこなかった速力制御については、指数的なガイドラインを追従する PID 制御と、速力制御を TVLQC 法の中に取り込む 2 つの方法で試すこととした。

そして、アプローチステージでは全て TVLQC 法を使って制御を行い、バーシングステージでは、簡単な指数減衰方式による停船、著者の経験を活かした Weather Vaning Dynamic Positioning 型の操船法を使ってまず着桟操船を行う実験を行った後、種々の TVLQC 法による操船法を設計し、シミュレーション、実船実験を行った。

これらのシミュレーションと実船実験において、次のことがわかった。

- (1) 2つの操船計画法に対して着桟操船制御では、着桟予定点の距離に応じて、2つの 操船段階(アプローチステージとバーシングステージ)を切り替えることにより、着 桟予定点まで近づけることが可能であった。
- (2) 2つの操船計画法に対して高速から中速にいたるアプローチステージに、TVLQC 法によるトラッキング制御と減速制御を併用しても直線時では有効なトラッキングが 可能であった。
- (3) 2つの操船計画法に対して変針時、PID 制御法による減速制御とトラッキング制御 を併用した場合は、ヨーイングを抑えることは難しい。そのため、速度制御を TVLQC 法の線形操縦モデルに含めることで、減速中の変針を行うことが可能であった。
- (4)着桟予定点付近のバーシング操船において、直線航路に対して指数関数を用いた方法では 3.3 [m]、変針航路に対して WVDPS の場合の位置精度は 3.0 [m]まで近づけることができた。
- (5)(4)の操船計画に対して、バウスラスタのみで停船させる実船実験を試み、横方向

0.5B、前進方向では 1.5B の偏差を残し、希望する方位に向け停船させることができた。 (6)(5)のバウスラスタのみを用いたバーシング操船時は、風などの外乱の影響が大き

くなる。したがって、終端位置での方位制御と位置制御への重みの選択が困難である。 この重みの最適なバランスの確立に問題を残した。ただし、この場合、風を考慮した TVLQC 法による着桟操船により、より着桟操船の精度をあげることが可能であるこ とが直線航路のシミュレーションからわかった。

これらを総合すると、今後の課題として、

(1)低速域で変速中の方位制御をさらに改善すること

(2) 低速時外乱に対する対処が含んだ制御を行うこと

が重要であることが明らかとなった。

参考文献

- [6.1] 高井忠夫・大和裕幸:離着桟操船の自動化、運動性能研究委員会・第8回シンポ ジウム, pp.89-111, 1991
- [6.2] 小瀬邦治他:大型船の離着桟操船におけるパイロット支援システムに関する人間 工学的研究、船論,第164号,1988
- [6.3] 岡崎忠胤:最短時間自動着桟操船に関する研究、名古屋工業大学博士論文、1998
- [6.4] 福田人意、大津皓平、岡崎忠胤、田崎哲夫、福井寛明:トラッキング制御を利用 した簡易型船舶誘導システム開発、日本航海学会論文集 103 号, pp.41-49, 2000
- [6.5] Arthur E. Bryson and Y.C.Ho, Applied Optimal Control, Nlaisdell, Waltham MA, 1969; revised printing Hemisphere, Eashington, D.C., 1975
- [6.6] 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, pp.89-94, 2001
- [6.7] H.Fukuda, K.Ohtsu: Recent Development of Ship's Tracking Problems, 7th Academic Symposium between Japan and China Institute of Navigation, pp.13-20, 2001
- [6.8] T.I.Fossen: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994
- [6.9] K.Kvam; Optimal Ship Maneuvering Using Bryson and Ho's Time Varying LQ Controller, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2000
- [6.10] H. Mizuno, T. Okawa, I. Komie: Route Tracking System by Adaptive Autopilot, Proc. of CAMS'89, Copenhagen, Denmark, pp.77-82, 1989
- [6.11] 今村智之:船舶の自動着桟システム構築に関する研究、東京商船大学修士論文、 1999
- [6.12] J.A.PINKSTER、萩原秀樹、庄司るり、福田人意:ウェザーベーン型自動位置保持 システムの研究、日本航海学会論文集、101号, pp.83-94, 1999
- [6.13] H. Hagiwara, R. Shoji, H. Fukuda, J. Pinkster: ONBOARD EXPERIMENT ON WEATHER VANING DYNAMIC POSITIONING/TRACKING AND AUTOMATIC BERTHING, Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, pp.601-608, 2001

第7章 結言

第7章 結言

第1章では、本論文の目的を、

- (1)任意に与えられた航路をできる限り追従できる舵を使ったトラッキングシ ステムの開発
- (2) 舵に加え、エンジン、スラスタを使用した自動着桟を含む高度な港内操船 システムの開発

に定めた。

そして、この目的を達成するために、本論文で使う基本的理論を Y.C.Ho による Time Varying Linear Quadratic Control (TVLQC)理論に定め、その実現性の検証を本学の練習船汐 路丸を対象としたシミュレーションと実船実験の繰り返しにより行うこととした。

- 次に、ここで取り扱うトラッキング問題を設定し、
 - ①舵を使った高速領域における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
 - ②舵を使った高速領域における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
 - ③ 舵の効かない低速域における Bow、Stern Thruster、エンジンを使った(1)(2) の問題

④舵、Bow、Stern Thruster、エンジンなどを使った高速領域からの定点停止問題など に定めた。

第2章では、まず著者がこれらの実験などの効率化のために開発した汐路丸のデータ入出 カシステムネットワーク化、シミュレーションモデル、位置推定フィルタなどについて述 べた。

この結果、

- (1)これまでの汐路丸のデータ入出力システムの欠陥であったプログラミング言語の制約、制御遅延などの問題を、入出力サーバが船体に対する信号入出力を部分を一括に管理することによって、実験者の信号入出力部分に対する労力を軽減し、Windows環境で実行可能な全ての言語を使用可能とするとともに計算速度を飛躍的に高め、実験環境の効率化が図れた。
- (2)陸上の研究室での実験環境を整えるため、汐路丸の実験環境と同じ環境を陸上の研 究室に構築した。
- (3)上記システムのネットワーク環境により、本論文で用いる制御理論の制御周期を DGPSの最高受信周期と同期させつつ 1.0[sec]での間隔で実施することが可能とし た。
- (4) 汐路丸の詳細な非線形操縦運動モデルを作り、作成した制御理論の実船実験の確実 性を保証する前評価法を確立した。
- (5) DGPS から得られた位置情報を利用して、船位推定を行うためのカルマンフィル タを用いた位置推定アルゴリズムを開発し、DGPS 信号に現れる位置情報の平滑

化に成功した。

などの結果を得た。

第3章では、本論文で使う制御法である、Y.C.Hoの可変ゲイン線形制御法(Time Varying Linear Quadratic Control;TVLQC)について、その利点、欠点、欠点の克服法、著者の問題への拡張法などについて述べた。

このうち、著者が新たに得た部分は、

- (1) TVLQC 法によって、航路追従問題を解くため、制御開始状態と終端条件が指定さ れている追従問題の制御解を求めたこと
- (2)(1)を定常外乱のある場合に拡張し、制御開始状態と終端条件、終端条件までの 定常外乱が与えられている場合の追従問題の制御解を求めたこと
- の2点である。

第4章では、問題を高速航行時のトラッキング問題とし舵のみによる航路追従制御問題 を取り扱った。

設定した問題は、2つのウェイポイントを設定した単純な航路(Simple Tracking Route)と最短時間幅寄解にウェイポイントを設定した航路(最短時間ルート)とした。

制御方式としては、まず命令針路に次の針路を指示し、航路偏差が指数減衰関数によっ て減少するトラッキングシステムを検討した。

さらに舵に直接信号を与える方式として、TVLQC法を使ったシステムを開発し、以後全てこの方法を検討した。

これらのシミュレーションと実船実験によって得られた TVLQC 法に関する主な結果は、

- (1) 舵に直接命令舵角を指令する TVLQC 法によるトラッキングでは、目標ルートからの偏差が大きくても、少ないオーバーシュートで目標ルート上をトラッキングすることが可能であることが、設定した2つの問題に対する実船実験から明らかになった。 さらにトラッキングの精度を許容範囲に抑えつつ、操舵量を抑えることも可能であることがわかった。
- (2)トラッキング中の定常偏差の除去法として、発生した定常偏差を計算し、目標ルートを発生した定常偏差の方向と反対側に設定することで解消する、Virtual Ttrack Route法が有効なことわかった。
- (3) 風圧力を考慮した線形操縦モデルを使用した TVLQC 法によって、予め外乱を打ち 消した操船が可能であることがわかった。
- (4)流体微係数を船体要目から推定し、その推定した微係数から線形モデルを構築し、 TVLQC 法によってトラッキング制御を行う方法も有効であった。また、野本モデル を使用した場合も TVLQC 法によるトラッキングが可能であった。これらのことによ って、本方法が汐路丸以外にも汎用性が確保されることがわかった。
- (5)設定出力の設定項目を偏差だけでなく船首方位、ヨーレートを設定することによって、ヨーレート、船首方位をも希望する値に設定して制御するトラッキング制御が可能となった。

以上のことを総合すると、提案した TVLQC 法によるトラッキングは、比較的高速・中速 領域の舵のみによる港内操船の諸局面において、有効なことがわかった。

第5章では、低速航行時のトラッキング制御を可能にするため、問題を先に設定した Simple Tracking Route への追従問題と設定し、TVLQC 法によるトラッキング制御の有効性を 確認した。

そのため、まず、バウスラスタ (B/T) のみをアクチユエータとする制御でトラッキング を行った。

さらに、汐路丸は3[knots]程度の船速を保持している状態では、舵による制御も多少は 可能であるので、あわせて B/T と舵を併用したトラッキングも行った。

これらのシミュレーションと実船実験から、次のことがわかった。

- (1) TVLQC 法による B/T を使用したトラッキングでは、シミュレーションと実船実験 の両方において、TVLQC 法の有効性を確認することができた。
- (2) 舵がまだわずかに効く、速力3[knots]付近を維持したまま、B/Tと舵を併用してト ラッキング実験を、TVLQC法によって行った結果、2つのアクチュエータを使用す ることにより船首の制御と偏差を、B/Tのみの制御より減少させることが可能であ った。

これらの結果は、本方法の低速時における有効性を示しており、自動着桟システム開発に 大きな進展が得られるものと判断した。

そこで、第6章では、TVLQC法を有効に使った自動着桟法を検討した。

- そのため、まず問題設定を行い、
- (1) 減速直進後、バース前面で所定の方向に定針し停船させる直線航路着桟
- (2)1回変針後、減速直進し、バース前面で所定の方向に定針し停船させる変針航路着 桟

の2つの問題を設置した。

そしてこれらの着桟を実現するため、高速時の舵とエンジンを使ったアプローチ操船時の トラッキングに TVLQC 法を使い、低速時のバーシング操船においては、B/T、S/T、速度 制御に TVLOC 法を使った着桟操船を行い、その有効性を確認した。

第6章では、さらに、バーシング操船において、WVDPSによる方法、指数関数による方法を使って停止点に近づける方法もシミュレーションと実船試験により検討した。

これらのシミュレーションと実船実験において、次のことがわかった。

- (1)アプローチ操船において、TVLQC法によるトラッキング制御と PID 制御則による 減速制御を併用する制御を行った結果、この方法は有効なアプローチ操船のひとつで あることが確認できた。
- (2) バーシング操船などにおける変針時、PID 制御則による減速制御と TVLQC 法によ るトラッキング制御を併用した実船実験の場合は、ヨーイングを抑えることが難しい。

そのため、速度制御を TVLQC の線形モデルに含めた制御を行った結果、減速中の変 針もスムーズに行うことが可能となった。

- (3)着桟予定点では、3通りの制御アルゴリズムを替えて実船実験を行ったが、どの制 御でも着桟予定点への位置制御は可能であることがわかった。すなわち、WVDPSの 場合は3.0[m]、指数関数を用いた方法では3.3[m]まで近づけることができた。
- (4) バウスラスタのみで変針航路を追従させながら停船させる実船実験を試み、横方向 0.5B、前進方向では1.5Bの偏差を残し、希望する方位に向け停船させることができた。 ただし、最終段階での位置制御と方位制御のバランスが問題を残した。
- (5) 低速時は、風などの外乱の影響が大きくなる。風を考慮した着桟操船により、着桟 操船の精度をあげることが可能であることが直線状航路に対するシミュレーションに より確認できた。

特に、バウスラスタのみで着桟できる可能性があることを示す(4)の結果は大きな成果 であると言える。

最後に、今後の着桟問題の課題として、

(1) 低速領域における方位制御と位置制御の最適な重みの選択法

(2) 低速領域での外乱影響の除去

などが上げられることを指摘した。

Appendix

Appendix A 汐路丸の操縦運動モデルの微係数

A.1 高速時の汐路丸の各微係数

		数值	単位
質量	m	6.7418×10^{4}	$[kg \cdot s^2/m]$
付加質量(x方向)	mx	2.671×10^{3}	$[kg \cdot s^2/m]$
付加質量 (y方向)	m_y	5.4032×10^{4}	$[kg \cdot s^2/m]$
z 軸周りの慣性+付加慣性モーメント	$I_{ZZ} + J_{ZZ}$	1.5184×10^{7}	$[kg \cdot s^2/m]$
垂線間長	L	46	[m]
平均喫水	d	2.85	[m]
浸水面積	Sw	480	[m ²]
船体抵抗係数	Ct	4.32750×10^{3}	[-]
舵抵抗減少率	t _R	0.215	[-]
舵位置での有効伴流係数	WR	0.22	[-]
舵の投影面積	A_R	4.25	[m ²]
舵軸のx座標	XR	-22.649	[m]
船体に作用する舵の干渉率の中心	XH	-14.4	[m]
船体に作用する舵の干渉力を表す係数	a _H	0.219	[-]
舵単独直圧特性の迎角に対する傾き	$f \alpha$	1.85	[-]
整流係数	γR	0.4998	[-]
舵位置の有効流向に及ぼす旋回角度の	l_R'	-0.77735	[-]
影響を横流れ速度に換算する係数			×
舵位置における速度減速率	<i>k</i> _x	0.6177	[-]
プロペラ直径	D_P	2.2	[m]
プロペラ回転数	n	5	[1/s]
推力減少率	<i>t</i> _P	0.193	[-]
プロペラ位置での有効伴流係数	WP	0.28989	[-]
プロペラピッチ角の補正定数	Сто	20.86	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	Co	3.509177×10^{-1}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	C_1	2.291329×10^{-2}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	<i>C</i> ₂	-3.064803×10^{-1}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	Сз	-5.197373×10^{-3}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	<i>C</i> ₄	3.784367×10^{-4}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	C ₅	1.681795×10^{-2}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	C6	-3.186904×10^{-6}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	<i>C</i> ₇	2.015531×10^{-3}	[-]
プロペラ推力係数の実験係数	C_8	2.272834×10^{-6}	[-]
-------------------	---------------------	-------------------------------------	-------
プロペラ推力係数の実験係数	С9	-1.803216×10^{-1}	[-]
サージに関する船体流体力の微係数	$\dot{X_{\nu}}$	-0.111418 \times 10 ⁻¹	[-]
サージに関する船体流体力の微係数	X'vr	0.176915	[-]
サージに関する船体流体力の微係数	Xr	0.137031×10^{-2}	[-]
サージに関する船体流体力の微係数	$\dot{X_{\nu \nu}}$	0.955500×10^{-2}	[-]
サージに関する船体流体力の微係数	Xrr	0.181790×10^{-3}	[-]
スウェイに関する船体流体力の微係数	$\dot{Y_{ u}}$	-0.28689	[-]
スウェイに関する船体流体力の微係数	Ývr	-0.13684	[-]
スウェイに関する船体流体力の微係数	Yr	-0.355849×10^{-2}	[-]
スウェイに関する船体流体力の微係数	$\dot{Y_{vv}}$	-0.55403	[-]
スウェイに関する船体流体力の微係数	Yrr	0.128952	[-]
Yaw に関する船体流体力の微係数	$N_{ u}$	-0.14076	[-]
Yawに関する船体流体力の微係数	Nvr	-0.16903	[-]
Yawに関する船体流体力の微係数	N _r '	-0.612311×10^{-1}	[-]
Yawに関する船体流体力の微係数	$\dot{N_{\nu \nu}}$	0.974819×10^{-1}	[-]
Yaw に関する船体流体力の微係数	Nrr	0.117956×10^{-1}	[-]
バウスラスタの x 座標	x_B	17.5	[m]
スタンスラスタの x 座標	xs	-18.8	[m]
舵の時定数	T _{RUD}	11.9	[s]
プロペラピッチの時定数	T _{CPP}	2.8571	[s]

A.2 汐路丸の風にに関する微係数

Table A.1 風に関する項の微係数

	数值	数值	単位
正面風圧投影面積	Aof	58.10	[m ²]
側面風圧投影面積	Aos	275.0	[m ²]
風圧力係数 Cx を1次近似したときの係数	C' _X	-0.322453	[-]
風圧力係数 Cr を1次近似したときの係数	C'_Y	0.951717	[-]
風圧力係数 CN を1次近似したときの係数	C'_N	0.108088	[-]
空気密度	ρΑ	0.125	[kg • s ² /m ⁴]

A.3 低速時の汐路丸流体微係数

Speed [knots]	-1.4	0	1.4	3
<i>u</i> [m/s]	-0.720222	0.000000	0.720222	1.543333
Y_{ν}	-0.035567	0.000000	-0.035567	-0.334914
Yr	-0.179128	0.179128	0.179128	0.036669

N _v	0.013795	0.000000	-0.013795	-0.129903
Nr	-0.280939	-0.280939	-0.280939	-0.057510
Xvr	-8.27568	8.27568	8.27568	0.179906
X _{vv}	-0.049801	-0.049801	-0.049801	-0.049801
X _{rr}	8.99825	8.99825	8.99825	0.004252
<u>Y</u> _v	-0.35567	-0.35567	-0.035567	-0.334914
Yr	-0.179128	0.179128	0.179128	0.036669
Y _{vv}	0	0	0	-1.16043
Yrr	0	0	0	-0.014199
Yvr	0	0	0	-0.059773
Yrv	0	0	0	-0.998911
<i>N</i> _ν	-0.013795	-0.013795	-0.013795	-0.129903
Nr	-0.280939	-0.280939	-0.280939	-0.05751
Ννν	0	0	0	-0.52623
Nrr	0	0	0	-0.024716
Nvr	0	0	0	-0.678058
Nrv	0	0	0	-0.072669

m/s	-3	-2.123	-0.849	0	0.425	0.849	1.231	
Ct	-8.10×10 ⁻³	-7.00×10 ⁻³	-4.50×10 ⁻³	0	2.32×10 ⁻³	4.05×10 ⁻³	4.56×10 ⁻³	

m/s	 1.231	2.06	2.888	3.716	4.501	5.393	6.1758	7.197
Ct	4.56×10 ⁻³	4.51×10 ⁻³	4.18×10 ⁻³	3.87×10 ⁻³	3.45×10 ⁻³	3.93×10 ⁻³	4.23×10 ⁻³	5.76×10 ⁻³

Appendix B 汐路丸着桟操船の一例

この図は、汐路丸船長がおこなった汐路丸の実際の着枝操船例を示す。B/T と S/T の 120 [sec] ~ 150 [sec] の間に信号がでているのは、B/T と S/T のトライを行ったためである。着 桟シナリオなどは、この操船例を参考にした。



Fig. B.1 汐路丸着栈操船例

Appendix C 東京商船大学練習船汐路丸海上試験成績書抜粋

一般記事

	第1回海上試験	第2回海上試験
試験種類	速力、前後速力、投揚錨、	Z 操舵、旋回力、スパイラ
	操舵	ル、惰力、スラスタ
施行年月日	昭和 62 年 1 月 22 日 ~ 23 日	昭和 62 年 1 月 26 日
施行場所	館山湾および相模湾	館山湾
試験海域の水深	館山沖 345 ~ 622 [m]	$96 \sim 449 \ [m]$
	相模湾 343~668 [m]	
海水の比重	1.023	1.019
前部喫水	2.63 [m]	2.62 [m]
中央喫水	2.85 [m]	2.85 [m]
後部喫水	3.09 [m]	3.08 [m]
撓み量	ホグ1[cm]	0
トリム	0.46 [m]	0.46 [m]
排水量	663.6 [t]	660.7 [t]
相当喫水	2.86 [m]	2.85 [m]

主機関

4-サイクルディーゼルエンジン×1基

	出力×回転数	最大	1400 [PS] × 700 [rpm]	
		常用	1190 [PS] × 700 [rpm]	(85%最大)
プロペラ	4 翼可変	ピッチプ	゚ロペラ×1基	

直径×基準ピッチ比×展開面積比 : 2,200 [mm]× 0.8382 × 0.57 回転方向 : 右回り(船尾より)

プロペラ軸 減速比 1:2.333

速力運転性1	能試験成績										
									逝 峞	紅年月日 紅場所	昭和 62 年 1 月 22 日 館山沖
									ξK	派	晴れ
									Ŕ	筡	$345 \sim 622 \text{ m}$
									政	き力は電波过	計測装置による。
試験種類	入標時刻	標中間航走			主機	軸出力	CPP	方位	相対風向	海上の	備考
					回転数		翼角		・風速	模様	
		標中間距離	時間	速力							
	h:m	ш	s-m	kt	rpm	ps	deg	deg	m/s deg		
1/4 MCR	10:33	1856	6-38	9.06	300.2	333	10	192	0.5 360	風浪2	当て舵最大 2 deg
	10:58	1853	6-00	10.00	300.1	354	10	12	9.0€5		当て舵最大 3 deg
	好 太	1855	6-19	9.53	300.1	344	10				
2/4 MCR	11:41	1855	4-36	13.07	300.1	705	15	12	9.0\25	귀區	当て 舵最大 1 deg
	12:21	1854	5-14	11.48	300.1	695	15	192	3.0 45		当て 舵最大 1 deg
	平均	1855	4-55	12.28	300.1	700	15				
3/4 MCR	12:57	1854	4-13	14.24	300.0	1056	18.5	12	11.0 >5	구回	当て 舵最大 2 deg
	13:27	1856	4-33	13.21	300.0	1050	18.5	192	3.5 15		当て 舵最大 2 deg
	平均	1855	4-23	13.37	300.0	1053	18.5				
85% MCR	13:51	1858	4-06	14.68	300.0	1163	19.5	12	12.0 >0	圃 노 미	当て舵最大 1 deg
	14:16	1854	4-26	13.55	300.0	1170	19.5	192	3.8 🔨 0		当て 舵 最大 2 deg
	平均	1856	4-16	14.12	300.0	1167	19.5				
4/4 MCR	14:39	1856	3-59	15.10	300.0	1427	21	12	11.5 >0	비	当て舵最大 2 deg
	15:05	1859	4-16	14.11	300.0	1405	21	192	5.0 \$10		当て舵最大3 deg
	平均	1858	4-09	14.61	300.0	1416	21				
11/10 MCR	15:27	1860	3-55	15.38	300.1	1538	21.5	12	11.000	비	当て舵最大 1 deg
	15:45	1858	4-14	14.22	300.1	1524	21.5	192	7.5×15		当て舵最大 2 deg
	平均	1859	4-05	14.80	300.1	1531	21.5				

Z 操舵試驗成績

施行	年月日	昭和 62 年 1 月 26 日	天候	晴	
施行	場所	館山沖	海上の模様	風浪:3 うねり:2	
水深	ŧ [m]	$96 \sim 449$			
排水	、量 [t]	660.7			
喫	前 部 [m]	2.62			
	後 部 [m]	3.08			
水	平 均 [m]	2.85			
垂緕	長(LWL) [m]	45.8			
水中	ı側面積(Am) [m²]	127.5			
舵面	ī積(Ar) [m²]	4.25			
舵面	ī積(Ar) [m²]	1/30			
操船	E角度 [deg]	5	10	15	
発	速力(V) [kt]	13.87	13.99	14.34	
令	回転数 [rpm]	300	300	300	
前	軸馬力(SHP) [PS]	1154	1183	1178	
発令	「時刻 [h-m]	10:30	10:43	10:58	
K	Т	0.182[1/s] 6.73[s]	0.182[1/s] 5.96[s]	0.163[1/s] 5.27[s]	
K		0.181 [1/s]	0.148 [1/s]	0.145 [1/s]	
T		7.68 [s]	5.06 [s]	4.36 [s]	
K' T'		1.174 1.09	1.163 0.93	1.016 0.85	
K'		1.168	0.946	0.904	
T'		1.19	0.79	0.70	
Km	ean	0.182 [1/s]	0.165 [1/s]	0.154 [1/s]	
Τm	ean	7.21 [s]	5.51 [s]	4.82 [s]	
K' n	nean	1.171	1.055	0.96	
T' m	ean	1.14	0.86	0.78	
V /]	Lpp	0.155 [1/s]	0.156 [1/s]	0.160 [1/s]	
相対	風向 [deg]	左 90	右 10	右 5	
相対	風速 [m/s]	2.0	2.0	11.0	
発令	方位 [deg]	200	180	0	
プロ	ペラ翼角 [deg]	19.5	19.5	19.5	

注) $K' = K \times L_{PP}/V$, $T' = T \times V/L_{PP}$

旋回試験成績

施行年月日		昭和 62 年 1 月 26 日	天候	晴				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
施行場所		館山沖	海上0	 D模様		波	浪:1 う	ねり:1
水深 [m]		96 ~ 449				1		
発令時刻 []	1-m]	4 <u></u>		12-28	12-35	;	14-43	12-48
発令前方位	[deg]			180	160		200	200
舵角 [deg]				15			35	. .
回頭舷				右	左		右	左
排水量 [t]		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		660.7				
	前部 []	m]		2.62				
喫水	後部 []	m]		3.08				
	平均 []	m]		2.85			•	
水線長(LW)	L) [m]			45.8				
水中側面積	(Am)	[m ²]		127.5				
舵面積(Ar)	[m ²]			4.25				
Ar/Am								
転舵を発令した時の速力 [kt]					14.15		13.94	13.91
転舵を発令した時の主機回転数 [rpm]					700		700	700
転舵を発令	19.5	19.5		19.5	19.5			
最大縦距(DA) [m] 239.12 228.83 152.20 1						151.59		
最大横距(D	表大横距(DT)[m] 316.15 324.88 145.49 14						147.24	
DA / LWL	DA / LWL 5.22 5.00 3.32 3.3						3.31	
DT / LWL				6.90	7.09		3.18	3.21
旋回半径 []	m]			152.63	144.2	5	65.30	64.65
トランスフ	ァー [m	1]		138.40	139.8	6	59.06	58.77
15°回頭に	要した	寺間 [m-s]		0-12	0-12		0-10	0-10
90°回頭に	要した	寺間 [m-s]		0-45	0-44		0-27	0-27
180°回頭	こ要した	時間 [m-s]		1-24 1-22 0-52 0-51			0-51	
KG [m]				3.36				
MG (GoM)	[m]			1.51 (1.	34)			
OG [m]				0.51				
相対風向 [deg]			右 15	右 6		右 13	右 11
相対風速 []	m/s]			8.5	6.0		8.5	7.5
最大傾斜角	[deg]			-	-		5.7	5.4

前後進試験成績

施行年月日		昭和 62 年 1 月	22日	排	水量 [t]	·····	663.6	
施行場所		館山沖			前部 [m]		2.63	
水深 [m]		$345 \sim 622$		喫	後部 [m]		3.09	
海上の模様		風浪:1 うねり):2	水	平均 [m]		2.85	
風向・風速		0 [deg] 7.5 [n	n/s]		相当 [m]		2.86	
天候		曇		ト	リム [m]		0.46	
主機の型式		4-サイクル		プ	型式		4 翼可変ピッ	<i></i> ノチ
		ディーゼルエ	ンジン					
				~	直径×基準	ピッチ比	2200 [mm] ×	0.8382
				ラ	×展開面積	〕比	\times 0.57	
85%MCR 前	進速力「	中、後進発令か	5 5	行	進中、前進	85%MCR	出力発令から)
後進速力整定	定までの)成績		前	進速力整定	までの成績	ť	
	前進速	力 [kt]	14.66			後進速力	[kt]	7.21
後進発令前	プロペ	ラ翼角 [deg]	19	前	進発令前	プロペラ	翼角 [deg]	15
	プロペラ軸回転数		300.6	プロペラ		軸回転数	300.6	
[rpm]					[rpm]			
軸出力 [PS]			1176			軸出力 []	PS]	810
後進発令時	後進発令時刻 [h-m]			前進発令時刻 [h-m]			16-40	
後進発令か	らプロへ	ペラ翼角後進全	0-52.5	前進発令からプロペラ翼角前進全力			0-56	
力までの時	間 [m-s]]		ま	での時間 [』	m-s]		
後進発令か	ら船体停	『止までに要す	1-40	前進発令から船体停止までに要する			0-56	
る時間 [m-	s]			時	間 [m-s]			
後進発令か	ら船体停	『止までの航走	454	前進発令から船体停止までの航走距			148	
距離 [m]				離	[m]			
後進速力整定	定後の速	E力 [kt]	8.30	前	進速力整定	後の速力	[kt]	13.56
後進速力整定	定後のフ	プロペラ翼角	15	前	進速力整定	後のプロベ	ペラ翼角	19
[deg]				[de	eg]			
後進発令よ	りプロへ	ペラ翼角ゼロま	0-30	前	進発令より	プロペラ翼	角ゼロまで	0-24
での時間 [」	n-s]	-		0	時間 [m-s]			

猶
昡
驗
哲
Ŕ
К
1 N
ĸ

6 E				
和62年1月2	たヨ	溴:0 うねり:0	50 [deg] 、 2.0 [m/s]) [deg]
뮲	館	風	坮	-2.0
施行年月日	施行場所	海 上 の 模 様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
バウスラスタによる	右旋回試験	水深 56 ~ 446 [m]]	16:00	700 [r.p.m.]
験の種類		晴 れ	始時刻	始時主機回転数

压ポ	杍		整定		5												
変節油	ン プ 圧	[kg/cm ²]	最大		80												
			回転数	[rpm]	1796			1784									
動機			電圧	[v]	440			440									
駆動電			電流	[Y]	95			215									
片舷フルノッチ	から反対舷フル	ノッチ回転数所	定値までの時間	[sec]													
発令から油	圧モータ回	転数所定値	間での時間	[sec]					-								
片舷フルノッ	チから翼角所	定値までの時	間	[sec]	11.4												
発令から	翼角所定	値までの	時間	[sec]	5.6												
油圧モー	夕回転数			[r.p.m]	$\langle \rangle$		>	<	<								
プロペラ	翼角			[deg]	0			20.4							÷		
ノッチ				-	0			10									
スラスタ	種別				バ 関	ウ始	盘	離	兇	浚	スタ 開	- ン 拾	推	翷	近	後	

颧
昡
쮏
1
Ŕ
к
١Ņ
к

1				ر ر	
	昭和62年1月26日	館山沖	風浪:0 うねり:0	右 20 [deg] 、 2.2 [m/s]	-2.0 [deg]
	施行年月日	施行場所	海 上 の 模 様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
	バウスラスタによる	左旋回試験	水梁 96~446[m]]	16:07	700 [r.p.m.]
	試験の種類		天 晴れ	開始時刻	開始時主機回転数

モポ		整定		5											
数ン節プ	[kg/cm ²]	最大		80									÷-		
		回転数	[rpm]	1796			1782								
動 機		電圧	[N]	440	****		440								
駆動電		観流	[Y]	95			230								
片舷フルノッチ から反対舷フル	ノッチ回転数所	定値までの時間	[sec]												
発令から油 圧モーク回	転数所定値	間での時間	[sec]												
片舷フルノッ チから翼角所	定値までの時	E	[sec]				10.5								
発令から 翼角所定	値までの	時間	[sec]				4.6								
油圧モー 夕回転数			[r.p.m]			>	<	<u> </u>							
プロペラ 翼角			[deg]	0			21.3								
ノッチ				0			10								
スラスタ 種別				バ 開	<u>ウ</u> 格	世	凝	定	浚	スタ 開	- ン 協	盘	翱	兇	後

顮
氓
澱
11 L
Ŕ
к
1N
к

昭和62年1月26日	館山沖	風浪:0 うねり:0	左 165 [deg] 、 2.2 [m/s]	-2.0 [deg]
施行年月日	施行場所	海上の模様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
スターンスラスタによ	る右旋回試験	水 深 96 ~ 446 [m]]	16:20	700 [r.p.m.]
試験の種類		天 晴れ	開始時刻	開始時主機回転数

Е

山石	整定					•.•• <u>-</u>							
検 制 し Kg/cm ²]	よ 大				-								
	回	4					-		1197			1183	
動 機	電 圧 [v]								440			440	
駆動電	電 流 [A]								135			375	
片舷フルノッチ から反対舷フル ノッチ回転数所	定値までの時間 [sec]									12.6			
発令から油 圧モータ回 転数所定値	間での時間 [sec]									9.6			
片舷フルノッ 子から翼角所 定値までの時	間 [sec]												
発令から 翼角所定 値までの	時間 [sec]												
油圧モー 夕回転数	[r.p.m]		>	<	<				0			1060	
プロペラ 翼角	[deg]												
ノッチ									0			10	
スラスタ 種別		バ ま ば	の時	整	定	後		スタ開	- ン 始	掛	罄	定	後

緧
成
驟
臣
Þ
κ
١D
κ

昭和62年1月26日	館山沖	風浪:0 うねり:0	右 5 [deg] 、 1.5 [m/s]	-2.0 [deg]
施行年月日	施行場所	海上の模様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
スターンスラスタによ	る在旅回武験	水深 [96~446[m]]	16:15	700 [r.p.m.]
試験の種類	{	天 晴れ	開始時刻	開始時主機回転数

王士	R		整定													
资 御 紀	ント	[kg/cm ²]	最大													
			回転数	[rpm]				- - -				1197			1182	
動機			電圧	[v]		-						440			440	
駆動電			電流	[135			380	
片舷フルノッチ	から反対舷フル	ノッチ回転数所	定値までの時間	[sec]									11.6			
発令から油	圧モータ回	転数所定値	間での時間	[sec]									6.0			
片舷フルノッ	チから翼角所	定値までの時	围	[sec]												
発令から	翼角所定	値までの	時間	[sec]												
油圧モー	夕回転数			[r.p.m]		\ _	>	<	<u> </u>			0			1060	
プロペラ	翼角			[deg]												
ノッチ												0			10	
スラスタ	種別				バ 開	ウ格	世	整	定	後	スタ開	- ~ 乾	串	麴	定	幾

緧
氓
簌
損
R
ĸ
IV.
к

				<u> </u>
昭和62年1月26日	館山沖	風浪:0 うねり:0	右 30 [deg] 、 2.0 [m/s]	-2.0 [deg]
施行年月日	施行場所	海 上 の 模 様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
バウ及びスターンスラ	スタによる右旋回試験	水 深 96 ~ 446 [m]]	16:25	700 [r.p.m.]
試験の種類		王 晴れ	開始時刻	開始時主機回転数

定力	整活		5										
変 節 油 ソ プ 圧 [kg/cm ²]	最大		80										
	回転数	r mrdr 1	1796			1780			1197			1182	
動 機	電 圧 「v」	r ^ 1	440	_		440			440			440	
駆 動 電	龍 「」	[V]	95			220			130			375	
片舷フルノッチ から反対舷フル ノッチ回転数所	定値までの時間												
発令から油 圧モータ回 転数所定値	間での時間	ראמנין											
片骸フルノッ チから翼角所 定値までの時	間 []	[200]											
発令から 翼角所定 値までの	時間									-			
油圧モー 夕回転数		[m·d·r]		>	<	<			0			1065	
プロペラ 翼角		r ucg	0			20.4							
ノッチ			0			10			0	_		10	
スラスタ 種別		バ 開	ウ 始	盘	巍	定	後	 スタ 開	- > 始	曲	翷	定	浚

緧
惤
駿
뙵
Ŕ
К
ī
К

昭和62年1月26日	たっていた。	風浪:0 うねり:0	右 68 [deg]、 2.8 [m/s]	[-2.0 [deg]
施行年月日	施行場所	海上の模様	相対風向・風速	開始時プロペラ翼角
バウ及びスターンスラ	スタによる左旋回試験	大 深 96 ~ 446 [m]	16:29	700 [r.p.m.]
試験の種類		天 晴れ	開始時刻	開始時主機回転数

王力	整定	s.			
察 第 プ パ 工 (kg/cm ²]	壊大	80			
	回 転 数 [rpm]	1796	1783	1197	1180
動 機	電 圧 [V]	440	440	440	440
駆 動 電	電 流 [A]	95	230	130	380
片舷フルノッチ から反対舷フル ノッチ回転数所	定値までの時間 [sec]				·
発令から油 圧モーク回 転数所定値	間での時間 [sec]				
片舷フルノッ チから翼角所 定値までの時	間 [sec]				
発令から 翼角所定 値までの	時間 [sec]				
油圧モー 夕回転数	[r.p.m]		\langle	 0	1065
プロペラ 翼角	[deg]	0	21.3		
ノッチ		0	10	0	10
スラスタ 種別		バウ開始時	整定後	 X ク 開 約時	整定後

回頭時間

	バウスラス	<u></u>	スターンス	ラスタ	同時作動		
	右旋回 左旋回		右旋回	左旋回	右旋回	左旋回	
	回頭時間	回頭時間	回頭時間	回頭時間	回頭時間	回頭時間	
	[m-s]	[m-s]	[m-s]	[m-s]	[m-s]	[m-s]	
30 °	0-35	0-29	0-40	0-42	0-26	0-25	
60 °	0-57	0-48	1-04	1-06	0-40	0-38	
90 °	1-19	1-06	1-29	1-31	0-53	0-51	
120 °	1-41	1-26	1-53	1-56	1-06	1-04	
150 °	2-02	1-43	2-18	2-20	1-20	1-17	
180 °	2-22	2-01	2-42	2-44	1-34	1-30	

謝辞

本研究は東京商船大学大学院商船学研究科博士後期課程交通システム工学専攻在学中に、 同大学商船学部海洋工学講座・大津皓平教授のもとで行った研究をまとめたものである。

指導教授である大津皓平教授には、最適制御理論と応用さらに、汐路丸による実船実験ま で懇切丁寧なご指導と激励を頂きました。さらに、国内学会、海外シンポジウムへの投稿 アドバイス、博士後期課程入学から現在まで、研究に関する全てに渡りご指導いただきま した。心からお礼申し上げます。

同大学商船学部海洋工学講座・井関俊夫助教授、並びに副指導教授・賞雅寛而教授には様 々なご指導や激励を頂きました。

汐路丸における実船実験では歴代の船長以下乗組員の方々に大変お世話になりました。 福井元船長、八田元船長、覚前船長、広瀬機関長、臼井元1等航海士、山下1等航海士、 山形1等機関士、関口2等航海士、今野甲板員、稲富甲板員、碓井司厨長に深く感謝の意 を表します。

ノルウェー科学技術大学 T.I.Fossen 教授には、船舶の制御に関するご指導から、留学の準備、ノルウェーでの生活についての細かい助言、手続きをして頂きました。そして、ノルウェー科学技術大学大学院生 K.Kvam 氏は、この論文の基礎となるシミュレーション・実験を進めていただきました。

三井造船昭島研究所・織田博行博士、三好晋太郎氏、海上技術安全研究所・岡崎忠胤博 士、石川島播磨重工業㈱技術開発部・田崎哲夫氏には船舶制御、実船実験、プログラム開 発等、貴重なアドバイスを頂きました。

情報システム設計講座交通計画管理研究室・萩原秀樹教授、庄司るり講師には WVDPS 等、様々なアドバイスを頂きました。

東京商船大学海洋工学講座誘導制御研究室の関係者の方々には、実験の準備と事務手続き、論文執筆、発表などで多大なご協力を頂きました。特にお世話になりました博士後期 課程の寺田大介氏、榧野純氏研究室 OB の横河電子機器㈱・Jin Seok Park 博士、オーストラ リア海事大学 Nguyen Hung Duc 講師、研究室に勤務されている織田美千子さんにお礼申し 上げます。