

最短時間を目指した着離棧操船の研究

輸送高度化研究領域 高度運航システム研究グループ *岡崎忠胤 福戸淳司

1. まえがき

近年、内航海運の船員の高齢化による船員不足と労働負荷軽減の立場から、一人当直を目標とした航行支援システムが提案されており⁽¹⁾、労働負荷が集中する着離棧操船の支援システムのニーズもでてきている。一般に、操船者は、明確な尺度を意識しないものの、安全性と効率性を常に考慮して操船計画を立案し、着離棧操船を行う。しかし、操船者の安全性のとらえ方は主観的判断によるものであり、その基準も操船者によりまちまちとなる。そのため経験が少ない操船者の場合、安全性を重視した消極的操船となり、結果として効率の悪い操船となる可能性がある。一方、経験豊富な船長は、多くの経験より船舶の操縦性能の限界を把握し、限界操船に適切な安全マージンを付加して、スムーズな操船を行う。いずれの場合においても、さまざまな局面で操縦性能を限界まで用いた操船方法が、前もって得られれば参考となる。この限界操船方法は、船舶の操縦運動モデルから、操船所要時間を最短とする制御解として数値的に導出することが可能である⁽²⁾。

そこで、一步進んで自動制御により、操縦運動モデルから導出した最短時間操船方法を実船へ適用することを考える。しかし、最短時間制御解を実船へ直接フィードフォワードした場合、操縦運動モデル自体の誤差や外乱の存在のため、数値解どおりの制御結果は得られない。また、操縦運動モデルが非線形であるため、最短時間制御解はオフラインでの導出となる。したがって、操縦運動モデルから導出した最短時間操船方法を実船にて実現しようとするれば、その操船法を目標値とした、追従制御システムが必要となる。

本研究では、上記の数学的な最短時間制御解に、定点で停止させることを実現するための終端処理を加えた、航跡と速度変化などを目標値とし、追従するトラッキング制御システムを提案する。そして、シミュレーションと実船実験を行い、提案制

御システムの検討を行う。

2. 最短時間定点停止操船

2.1. 問題設定と定式化

本研究では、着棧操船の入船右舷付けを念頭に置き、表1に主要目を示す練習船を対象に、図1に示すA点からB点に最短時間で誘導停船させる問題を扱う。ここで、A点は開始点で、停船点であるB点を右30度前方、距離12L(1L=50m)に見る位置とし、この地点へ針路0度、速力9ノットで進入することとする。

表1 対象船舶の主要目

Loa	49.93[m]
Breadth	10.0[m]
Depth	2.8[m]
Displacement	717.5[tons]
Propeller	CPP
Bow Thruster	2.4[ton]

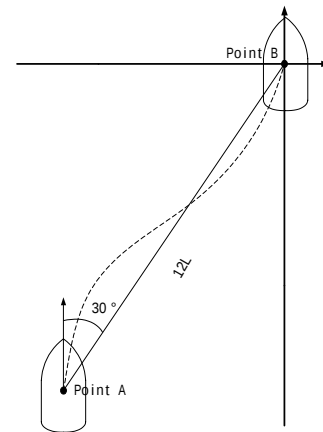


図1 最短時間定点停止操船問題

この種の誘導問題は、変分法の2点境界値問題へと置き換え定式化することができる⁽³⁾。しかし、速力変化が大きく大運動を伴う操船を扱うため、運動方程式が非線形性の強いモデルとなり、問題を解析的に解くことが困難となる。そこで、このように非線形性を強く含む問題を数値的に解く手法としてその有効性が確認されている Sequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm(SCGRA)法⁽⁴⁾を利用する。

2.2. 数値解の検討と修正

上記の最短時間定点停止操船問題を数値的に解くと、図2に示す航跡と状態変数の応答時系列が得られる。

ここで、アクチュエータの利用方法に着目すると、舵とCPPを利用して停船点手前まで減速しながら誘導するフェーズ（以後アプローチング操船と呼ぶ）と、停船点手前から主にバウスラストとCPPを利用して姿勢制御と停船点へ停止させるフェーズ（以後バーシング操船と呼ぶ）の2つの操船フェーズに分割できる。本問題では、運航上の理由から、バウスラストの利用可能速度を3ノットに設定したため、この2つ操船の分岐点は、速力が3ノットまで減速された地点となる。

ところで、バーシング操船への分岐点までの誘導では減速のために舵効きが悪く、実船で最短時間操船の数値解どおりに誘導することが難しくなるので、バーシング操船での修正が重要となる。しかし、最短時間操船では操縦性能の限界による停船を行うため、分岐点から停船点までの距離はわずか0.5Lとなっており、高い操縦性能を持つバウスラストを利用しても、停船点までの残り距離が短いため、修正が間に合わず、致命的な失敗となる可能性が高い。そこで、バーシング段階での誤差修正が十分可能となるように、バーシング操船の領域を広げる必要がある。そのためには、速力3ノットとなる地点から停船点までの距離を拘

束条件に加えることとなる。

しかし、前述のアルゴリズムでは、状態変数に代数方程式による拘束条件を付加して問題を解くことは難しい。そこで、最短時間定点停止操船問題をアプローチング操船問題とバーシング操船問題の2つの連続した2点境界値問題に分割することにより、2つの操船の分岐点となる地点を任意に設定することとする。そして、本稿ではバーシング操船の領域を十分に確保するため、バーシング操船開始位置を、停船点まで2Lの距離と設定する。前述の図2に結果を示す最短時間定点停止操船では、停船点までの距離が2Lとなる位置は、停船点を約20度の角度に見る地点であった。そこで、バーシング操船の開始位置を停船点の手前2Lで、停船点を20度の角度で見る位置とし、このときの船首方位を20度、速力をバウスラストが利用可能な3ノットと設定する。なお、バーシング操船では、常にバウスラストを利用可能とするため、CPPの前進最大値を、速力3ノットに対応する命令翼角（0.5度）に制限した。また、アプローチング操船の後半部分では、後進指令により減速すると舵効きが悪くなることが予想される。そこで、アプローチング操船時のCPPの最低値を0度に制限し、後進指令無しに減速する問題に修正した。

以上の設定のもと、アプローチング操船問題とバーシング操船問題を数値的に解いた結果、図3に示す航跡と状態変数の時系列を得た。速力が3

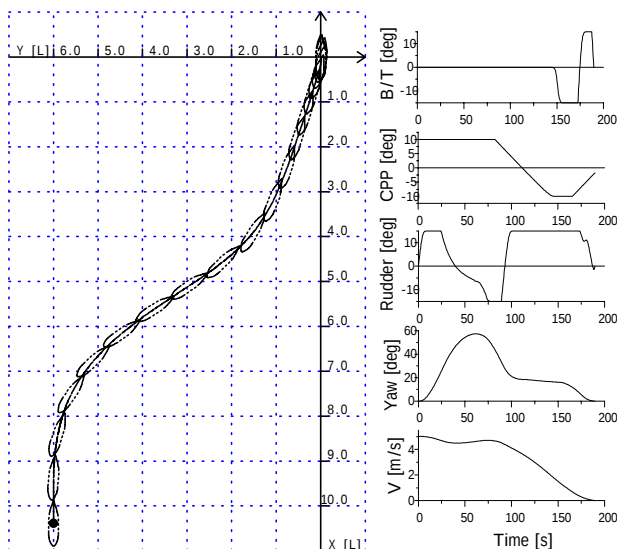


図2 最短時間定点停止操船問題の数値解

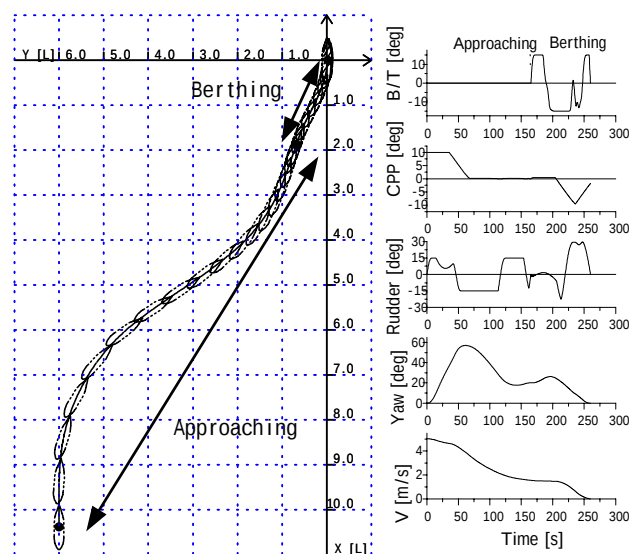


図3 操船フェーズを分割した最短時間定点停止操船問題の数値解

ノットとなる地点を停船点まで 2L の位置に拘束したことと、アプローチ操船で、アスターンの利用を制限したため、操船所要時間は、260 秒となり、図 2 に結果を示す最短時間操船より、70 秒長い結果となった。

3．制御系の構成

次に、モデルより導出した最短時間定点停止操船方法を実船で実現する制御システムの設計を行った。任意定点へ誘導するという本問題の性質上、位置制御を第一の目標とし、続いて最短時間制御を目指すために、速度制御を第二の目標とする。そこで、図 4 に示す通り最短時間制御解の軌跡上にウェイポイントを設定し、各ウェイポイント上

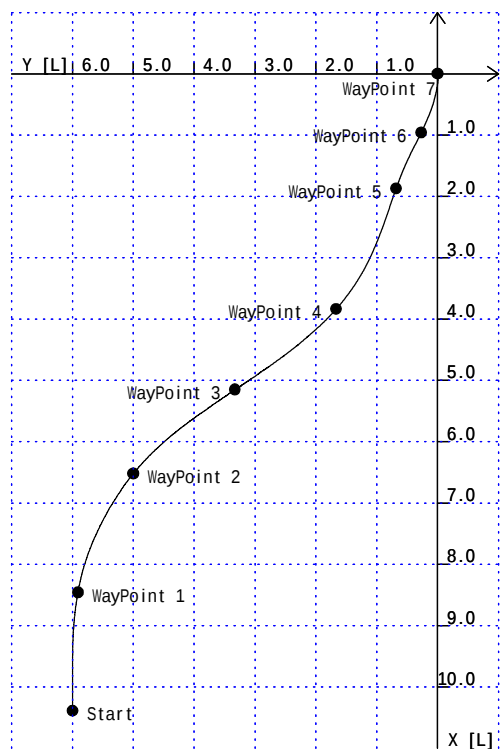


図 4：ウェイポイント

に最短時間制御時の通過速度を目標値に設定する。そして、これらの目標値を通過するルートトラック制御システムを設計する。

図 5 に、本研究で用いる制御系の構成を示す。制御系は、最短時間制御の数値解からウェイポイント： (X_0, Y_0) とウェイポイント上の目標方位： ψ_0 および目標速度： V_0 を出力するサブシステム（ウェイポイントジェネレーター）と、ウェイポイントに目標速度で到達するための指令方位： ψ_r と指令速度： V_r を出力するサブシステム（オーダージェネレーター）と、指令方位および指令速度と本船の状態から舵角： δ 、バウスラスタ翼角： θ_{BT} 、CPP ピッチ角： θ_p の制御値を出力するフィードバックコントローラーの 3 つのサブシステムから構成される。

4．シミュレーション

本研究で導出した最短時間制御解は、風外乱を考慮していないが、実海域において無風条件下で実船実験を実施することは難しい。そこで、平均風速 5[m/s]の条件下、シミュレーションを行い風の影響を検討した結果、以下に示す問題が生じた。ケース 1：真風向 180 度の場合、本船後方からの風となるため、目標値通りの減速が出来ず、アプローチ操船終端点での船速が、3.2 ノットとなり、バーシング操船開始時にバウスラスタを利用出来なかった。

ケース 2：真風向 270 度の場合、横風のため、アプローチ操船後半部分にて船首が風向へ切りあがり、アプローチ操船終端点での船首方位が 8.2 度となった。

ケース 3：真風向 270 度の条件下でのバーシング操船では、ケース 2 と同様の理由で、バウスラスタによる右回頭に時間が掛かり結果として、その後の左回頭が間に合わず、終端点における船首方

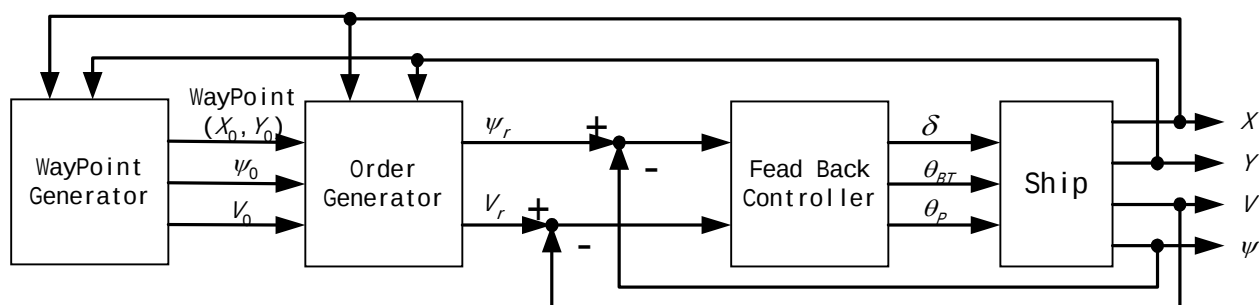


図 5：制御系の概略

位が 10.5 度となった。

以上のシミュレーションから、風外力に対しアクチュエータの推力不足が推測できる。そこで、アクチュエータの制限値を拡大し、船速 5 ノット以下での舵角制限を ± 30 度に、アプローチ操船時の CPP ピッチ角の最小値を 0 度から -2 度に、バウスラストの最大値を ± 19 度とした。そして再度、上記 3 ケースのシミュレーションを実行したところ、ケース 1 では、アプローチ操船終端点での船速が 2.9 ノットに、ケース 2 では、アプローチ操船終端点での船首方位が 14.5 度に、ケース 3 では、バーシング操船終端点での船首方位が -1.3 度に改善された。

5 . 実船実験

図 6 に、実船実験時の航跡と状態変数の応答時系列を示す。航跡図では D G P S で観測した船位を実線で示し、目標値としたウェイポイントを黒丸で数値解の軌跡を点線で示した。同図から分かるとおり、目標ルートに沿った制御結果を得ることができた。終端点での位置は、Y 軸方向へ -1.1[m]、X 軸方向へ -1.8[m]、船首方位が 8.4 度、目標値より偏位しているが、オーバーシュートすることなく、制御目標へ到達している。操船所要時間は、227 秒であり、モデルから導出した数値解より 33 秒短い結果となっている。これは、実験時の風が真風向 320 度、平均風速 2[m/s] と小さかったため船体運動への影響が小さく、各アクチュ

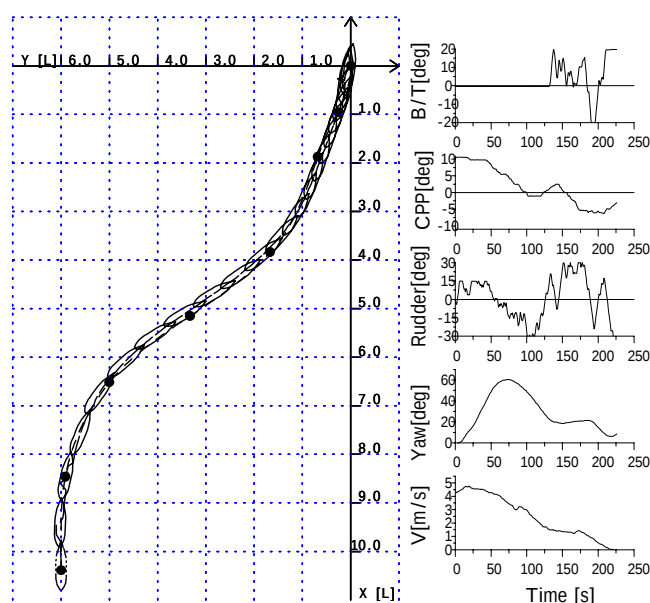


図 6：実船実験時の航跡と各状態変数の時系列

エータの制限値を拡張したために増加した推力が、各操船を短時間で実行することに作用したためと考えられる。

6 . 結言

本稿では、バウスラスト及び CPP を装備した小型練習船を対象に、最短時間制御を目指した自動定点停止操船システムの開発を行った。まず、自動定点停止操船の目標値として、操縦運動モデルから最短時間定点停止操船の数値解を導出し、実操船への適応性を検討した。そして、最短時間定点停止操船の数値解の軌跡と速度を若干修正した値を目標値としたトラッキングを行うこととした。そしてこのトラッキングを実現するために、最短時間定点停止操船を 2 つのフェーズに分割し、バーシング操船の領域を拡大して数値解を導出し、実船での目標定点への自動停止操船を実現することができた。

本稿では、入船右舷付けを念頭に置いた定点停止操船問題のみを扱ったが、今後、出船着舷や離舷操船、強風下での着離舷操船へと問題を拡張する予定である。

最後に、本課題について共同研究を行っている東京商船大学大津皓平教授と実船実験で多大なるご協力を頂いた東京商船大学練習船汐路丸の乗組員諸氏に深甚の感謝の意を表したい。

参考文献

- (1)小瀬邦治：Integrated bridge system について：日本航海学会誌,116 号, pp.3-16, (1994) .
- (2)大津皓平,正司公一：最短時間操船に関する研究 I,日本航海学会論文集, 90 号, pp.261-271, (1994) .
- (3)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,日本造船学会論文集,172 号, pp.365-337, (1992) .
- (4)A.K.Wu and A.Mile. : Sequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm for Optimal Control Problems with No Differential Constraints and Boundary Conditions Part1, Optimal Control Applications and Methods, Vol.1-1, pp.69-88, (1980) .