

船舶の自動着棧技術の課題と展望



研究ノート

牧 敦生*

Perspective on the Automatic Berthing Technology for the Autonomous Vessel

Key Words : Autonomous vessel, Automatic berthing, Optimal control theory, AI, CMA-ES, AIRL

はじめに

最近の船舶海洋分野における世界的な潮流の一つが、自律運行化である。読者の多くがご存知のように、自動車の分野では、一部の運転モード、例えば車線変更や車間保持、車庫入れなどを、ある程度ではあるが、自動で行う車種が既に存在していて、新しい車の宣伝やカタログを見ると、著者も心が躍ってしまう。一方、我々の船舶分野でも、既に簡単なケースについては、自律化を達成した例が国外では既に存在している。フィンランドの Finferries は 2018 年末に、完全に自律運行をする船を 1 隻投入することに成功していて、これは非常に画期的な出来事であると思う。もちろん、東京湾や瀬戸内海のような、交通量の非常に多い箇所、同様なシステムが直ちに構築できるものとは考えにくい、まず実証してみたぞ、ということに大きな価値がある。

一方、我が国日本でも、実は、船の自動運行の研究・開発の潮流は、1980 年代より存在していた。そして、1990 年の時点で、既に、自動での接岸・着岸（以降は、これを着棧と呼称）の試験を、東京商船大学の練習船「汐路丸」を用いて実際に行っている。このように、日本はこれまで自動運航船、特にその中でも港内操船の自動化の研究において世界をリードする瞬間が確かにあったはずである。しかし残念なことに、その後さまざまな事情により、その

技術が実用に供されることが無かったと聞いている。

一方、前述のように、自動車の自動運転技術の開発機運の高まりに呼応するようにして、船舶海洋の業界でも、自動運航船の研究が再度精力的に行われるようになってきた。ただ、今回の場合、海外、特に欧州がこのような研究・開発の流れの中心地である。当然、「時代のバス」に乗り遅れないように、日本国内でも自動運行に対する研究開発の流れが急に加速することとなったが、ややその変化の動機付けが外発的なものであることを、著者は残念に感じている次第である。

しかし、当面の目標がクリアになったということで、我々研究者サイドとしては、自律運行に関する研究に積極的に取り組める社会的な体制が整ったわけであり、これは誠に喜ばしいことである。我々、大阪大学船舶設計学領域（通称：梅田・牧・酒井研究室）では、自動運行の中でも特に港内操船フェーズで課題となる自動着棧技術の解決に向けて攻勢的姿勢で取り組んでいる。本稿ではこれらについての最新の研究成果を報告するとともに、他分野、特に制御工学や人工知能分野との協働の重要性についても大いに語りたいと思う。

自動着棧の難しさ

船舶の自動着棧は自動車であるところの「車庫入れ」に相当するものである。自動車の車庫入れ等、車両制御は、ノンホロノミック系の問題と呼ばれていて、固有の難しさがあることが知られている。一方、船舶の自動着棧は、一見したところ、数学的な難しさが乏しいように見える。

ところが、船舶は見上げんばかりの巨大構造物である。従って、慣性が大変大きい。車のようにタイヤで接地すらしていない、ブレーキもない船舶は、急には止まれないのである。そしてなにより、船舶



* Atsuo MAKI

1982年8月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 船舶海洋
工学専攻博士後期課程 (2010年)
防衛省、米海軍水上戦センター等を経て
現在、大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 准教授 博士(工学)
TEL : 06-6879-7579
FAX : 06-6879-7594
E-mail : maki@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

の着岸時の大きな特徴として、制御入力の大きさが、船体に比してあまりに乏しい。通常船舶の舵は、一般にプロペラ直後に装備されている。これは、プロペラにより増速された流れをしっかりと舵に当て、そしてその流れの方向を変えることにより、舵の揚力を増し、船の向きを変えているのである。舵の力がプロペラによる流れの増速に大きく依存しているということは、着岸時のように速度が低い状況では、プロペラ回転数も低く、舵面での流速が極めて遅くなる。厄介なことは他にもある。

自動着岸を制御の問題として考える際、数学的な取り扱いとして曲者なのは岸壁の存在である。船は岸壁には絶対に接触をしてはいけないことは当然であるが、最終的には船は岸壁の近傍の終端位置で静止する必要がある。従って、必ず侵入不可な領域との境界近傍に解が存在しなければならない。評価関数に接触をペナルティーとして単純に考慮すると、岸壁側への領域の侵入により極端に評価値が跳ね上がる構造をとるため、数値的な性質が悪くなる可能性が高い。このあたりをどう扱ってクリアするかは技術的な面白みがあるのである。

また、港が海などに面している以上、風の影響を受けない日はむしろ稀である。船の横腹にまともに強い風を受けると、相当な横力が生じる。岸壁側に押し付けられるようになり、離されるようになり、そして風も非定常である。そして、船の様々な載荷状態と外乱を記述する状態方程式の形と係数を、一体どう推定すればよいだろうか。

自動着岸技術に関する研究

当研究室では自動着岸技術について、幾つかの方向性から研究を行っている。初めに著者らが行ったのは、オフラインの計算手法の構築である。オフラインの制御とは、時間的な制約がない状況下で、まるで「神業」と言えるような最適な着岸制御をコンピューター上で再現しようというものである。オフラインの着岸制御則や軌道が得られていれば、例えばPD制御のような古典制御則でもその軌道を辿って着岸に導きうる可能性もある。そこで、まずはオフラインの制御手法を一度確立しようと考えたのである。「神業」的な操船制御則を得るには、最適制御理論を使う必要があった。実際の検討に際して直面した問題は、逐次2次計画法などの勾配に基づく

計算法では最適化計算が思うように進まないことであった。これは評価関数の多峰性なども関係しているものと考えられる。また、勾配法では、計算の開始時に、ある程度質の高い先験的な初期解を用意する必要があるが、それには非常に骨が折れる、という実行上の問題もあった。しかし、これらいずれの問題も、進化計算の一手法であるCMA-ES (Covariance Matrix Adaption - Evolutional Strategy) を導入することで、ほぼ完全に解決できることが分かった。これは、進化計算手法そのものの開発に挑まれている筑波大学 (当時：信州大学) の秋本洋平博士との共同研究により初めて達成されたものであり、博士自身が改良を加えた最新のCMA-ESが用いられている。CMA-ESは、この問題の場合、制御変数について、正規分布を用いた多点探索を行うものである。そして、探索過程で、正規分布の共分散行列を学習する。本手法は悪スケール性や変数間依存性、多峰性といった困難さを有する連続最適化問題に対して非常に適している。図1は最適着岸軌道の例である。この時点では、岸壁への衝突をペナルティーとして考えていた。現在は、Lagrangeの未定乗数を導入して、ペナルティー項を拘束条件としてより厳密に対処できるCMA-ESを秋本博士らに構築いただいた。これにより、質の高い解を効率的に求めることができるようになってきている。

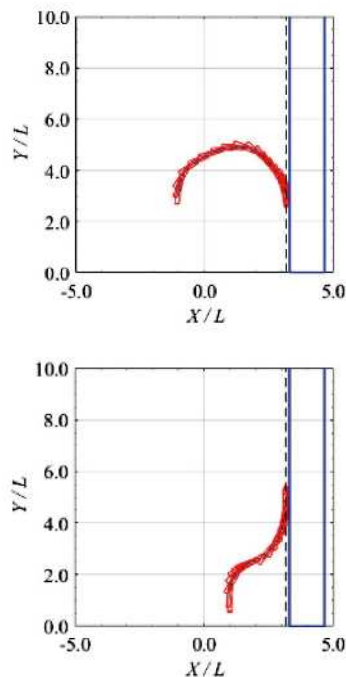


図1 オフライン計算で得られた最適着岸軌道

オフラインの計算に一定の目的が立ちつつある状況下、精力的に取り組まねばならぬことは、オンライン制御の実現である。オフライン制御の解は、「神業」的である一方、考慮されていない外乱やモデル化誤差などの影響により、実際の制御に直接適用をすることはできない。そのため、どうしてもオンライン制御の手法を別途構築しなければならないのである。

オフライン制御とは異なり、オンライン制御は時間的制約が存在し、リアルタイムで時々刻々制御する必要がある。従って、制御則を得るのに時間を要する、上述のCMA-ESをダイレクトに用いることは不可能である。そこで、これらの解決のため、我々の研究グループでは3つのアプローチを同時並行的に行っている。いずれの目的も、実時間制御で接触無しに着棧させること、である。

1つ目は、実時間最適制御手法の導入である。これは変分法を数学的背景に持つ条件式を時々刻々解いて最適解を追跡する手法である。京都大学の大家敏之博士との共同研究により進めており、著者はそのアルゴリズムを着棧問題に適すように変更し、オフライン制御の解を先験的初期解として与える手法を提案し、計算を行っている。

2つ目は、秋本博士が進めている、強化学習による進化的強化学習手法IBP-CMAを用いた研究である。IBPはインスタンスベース方策 (Instance-Based Policy) と呼ばれる方策表現手法と、その最適化手法のCMA-ESを組み合わせたものである。状態とそれに対する取るべき行動の対 (インスタンスという) を複数保持し、実際の制御では、与えられた状態に近い状態を持つインスタンスを参照し、そのインスタンスの持つ行動からエージェントがとる行動を決定する、というものである。

さらに、3つ目は、横浜国立大学の白川真一博士が進めている逆強化学習の一つである、敵対的逆強化学習AIRL (Adversarial Inverse Reinforcement Learning) によるアプローチである。ここでは、エキスパートデータとしてオフライン制御の計算結果を用い、そこから報酬関数を自動で設計する。これが逆強化学習といわれる所以である。エキスパートとして、オフライン制御の「神業」的制御を直接利用できるのが、大きな魅力である。

これらの欄外ではあるが、古典的とはいえ、PID

制御の可能性も捨てていないわけではない。状況に応じては、PID制御の方がうまく機能する場合もあるかもしれないことから、秋本博士や白川博士などとの直近の議論によって、ある程度着棧のタスクを分けて、サブタスクにPID制御を任せることなども検討していく必要があるだろう、と考えるようになった。PIDの制御パラメータは、CMA-ESなどにより探索することも、指摘と提案があった。

また、状態方程式をどのように逆算するかも大きな課題の一つである。我々は、操縦運動を表す状態方程式中に含まれる40個程度のパラメータを、CMA-ESによるシステム同定により逆推定するアプローチをとることを決めた。今のところ、シミュレーションの軌道からモデルの逆推定はほぼ完全な精度で実現可能であることを確認しているが、実船のデータからどの程度、逆推定ができるのか、またモデルのどのような部分に今後改善が必要なのかを明らかにしていきたいと考えている。

おわりに

本稿では、自動着棧制御技術に関する、最新の取り組みを紹介した。他分野の研究者との積極的な交流が示すように、これは船舶分野の研究者・技術者のみで完結させることが、容易ならざる課題であるし、著者も他分野の研究者の考え方や取り組み方に常に大きな刺激を受けている。特に、白川博士や秋本博士から着棧制御問題を見た場合、本文に述べたような実問題特有の、人工的なベンチマーク用の例題とは異なる、解きにくさが存在しているはずであり、新たな計算方法やアルゴリズムへのインスピレーションを得るためのテストベッドとして好意的に捉えていただいている。人工知能技術の研究者2人が異口同音に言われるのが、本文で述べたような岸壁・棧橋の存在の「厄介さ」であり、その「厄介さ」を、「面白さ」としても感じていただいているようである。著者が大塚博士と実施している実時間最適制御や、PID制御を用いた着棧制御も、人工知能に負けない制御性能を発揮できるよう今後も取り組みを深化させる予定である。

謝辞

本稿は、日本学術振興会の科学研究費助成金 (基盤C:19K04858)、造船学術推進機構 (REDAS) の

研究補助による。また、実時間最適制御に関する研究は、ジャパンマリンユナイテッド株式会社との共同研究による。同社の正司公一氏には熱心なご討論をいただいた。ここに記して、関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Maki, A., Sakamoto, N., Akimoto, Y., Nishikawa, H. and Umeda, N. : Application of optimal control theory based on the evolutionary strategy (CMA-ES) to automatic berthing, JMST, First on line, 2019.
- 2) 大橋響太郎, 牧敦生, 梅田直哉, 秋本洋平 : 進化的強化学習手法 IBP-CMA による自動着棧制御, 日本船舶海洋工学春季講演会論文集, 2019.
- 3) 牧敦生, 高橋奏美, 下地冬芽, 大塚敏之, 正司公一, 梅田直哉 : オフライン最適制御計算結果を先験的な解として用いる実時間最適制御手法に関する研究, 日本船舶海洋工学春季講演会論文集, 2019.
- 4) 清水彰馬, 白川真一, 牧敦生, 梅田直哉 : Adversarial Inverse Reinforcement Learning による着棧制御則の獲得に関する研究, 日本船舶海洋工学春季講演会論文集, 2019.
- 5) 牧敦生, 西川博之, 梅田直哉, 秋本洋平 : 進化計算手法 CMA-ES を用いた低速操縦性モデルのパラメータ同定に関する基礎的研究, 日本船舶海洋工学春季講演会論文集, 2019.

