

船速に依存せず正確に方位制御可能な 操船システムの開発

三菱電機株式会社

代表執行役 執行役社長 漆 間 啓

ヤマハ発動機株式会社

代表取締役社長 日 高 祥 博

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 今 村 直 樹

三菱電機(株) 姫路製作所 阪 口 亮

ヤマハ発動機(株) マリン事業本部 伊 藤 誠

ヤマハ発動機(株) マリン事業本部 中 安 良 和

Yamaha Motor Corporation, USA 山 口 幸 平

はじめに

プレジャーボートは、余暇にマリンレジャーを楽しむための乗り物であり、その楽しみ方は、小型ボートでは内海での気軽なフィッシング、大型ボートでは外洋での本格的なフィッシングやクルージングなど、様々である（図1）。



図1 マリンレジャーの様子

このプレジャーボートの世界において近年、操縦が簡単で気軽に操船を楽しみたいといった経験の浅い操船者からのニーズとともに、高い操船技術が求められる離着岸から解放されたい熟練者からのニーズもまた高まりを見せてきている。これら多様なニーズに応えるべく、船外機

シェアトップクラスの技術力とボートやその使用われ方に関する幅広い知見を強みとするヤマハ発動機と、電子制御ユニット量産化の実績とノウハウを強みとする三菱電機姫路製作所ならびに物理現象に立脚した制御理論への深い専門性を強みとする同社先端技術総合研究所とが協業し、「操船の手間を省く」価値提供が可能な、ボートのオートパイロット機能を有する操船システムを開発した。

開発のねらい

オートパイロット機能は、ボートの“走る・曲がる・止まる”を自動化するものである。競合他社は、このうち“曲がる”の自動化を既に実用化していた点で我々には弱みであった。そこで、当該機能の基幹である船首を操船者の意図した向きに仕向ける、他社性能を圧倒的に凌駕する方位制御技術で、「操船の手間を省く」操船システムを目指した。しかし、我々が志向する方位制御技術には、下記の厳しい市場要求に応えつつ、現場の課題を払拭する必要があった。

【要求】ボートと、ボートを駆動する船外機との無数の組み合わせに対応しなければならない。

通常、ボートを製造するボートビルダーと船外

機メーカーは別なため、船外機メーカー側が船外機を艀装するボートを選べない。また、操船者は、釣りから移動用途まで幅広い船速範囲でオートパイロットを使いたい期待を持っている。

【現場の課題】 ボートと船外機の組み合わせのバラつきに対して、現場で個別に制御の適合作業をすることが一般的なため、ボートビルダー、ディーラー、ユーザーの作業負担が重い。

このことには、万が一でも適合作業が不適切な場合に、システムの制御性悪化を招き、快適な乗り心地が得られないリスクを孕んでいる。

こういった実情を背景に、本開発の目的は、どんなボートでも初期設定作業不要で適応でき、そしてお客様が常に快適な航走をできるように、ボートと船外機の組み合わせバラつきを考慮した系統的な方位制御系の設計手法とその技術確立であった。本目的を達成するための技術課題は、下記のとおりであった。

【技術課題】 どんなボートでも、時速 10km から 100km までにかけてすべての船速域で方位制御系の安定性を確保し、操船者が指示した方位指令に対して機敏に実方位が応答し、当該応答のバラつきをすべての船速域で抑制すること。

装置の概要

操船システムは主に、ボートの位置を検出する GNSS (Global Navigation Satellite System)、ボートの方位を検出するヘディングセンサ、操船者が経路したい或いは行きたい目標座標を設定するディスプレイ、オートパイロットのモー

ドを設定するパネル、およびオートパイロット機能の基幹である方位制御技術と絡む各種制御モジュールを実装した BCU (Boat Control Unit) から構成され、さらにオプションとして、倒しやひねりといった操作だけで方位や船速の調整ができるジョイスティックを備えている (図 2)。操船者は通常、レバー操作で前進・後退指示ならびにスロットル開度指示して船外機の推進力を調整しながら、Helm (ハンドル) 操作で船外機の舵角を調整する複雑な複合動作をタイミング良く行いながら操船する必要がある。これに対して操船システムでは、操船者の座標設定だけで目的地へ到達でき、操船者は複雑な複合動作から解放される。

BCU は、操船に関する周辺情報を各種のセンサから入手し、ボートをどのように動かすかを判断し、各種のコントロールユニットへ指令を与える操船制御、ボート電装品の駆動制御を行うボディ制御、ボートの各ユニットの通信調停を行うゲートウェイ制御から構成されている (図 3)。

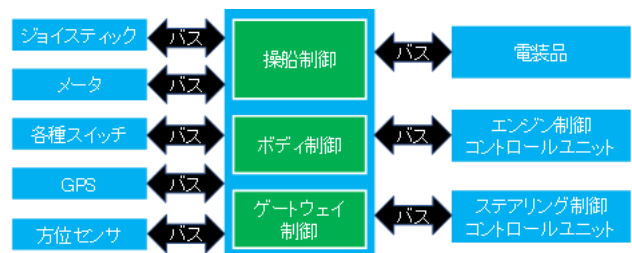


図3 BCUの構成



図2 開発した操船システムを備えたボートの一般的な構成

技術上の特徴

前述の技術課題は、下記取り組みで解決した。

(1) ボートの動特性の実験的解明とモデリング

ボートの方位を変更する源は、船外機が有する操舵機構で舵を操作し、そのときに舵に作用する流水からの反力や船外機が発生する推力の方向変化で生じるモーメントである。ボートの動特性には、代表的で現在でも実用的なものに野本モデルがある。野本モデルは、操舵に応じてボートの角速度の大きさと位相が変化する、という非常に直感的な動特性をシンプルな数式でモデリングしている。しかしながらボートは、タンカーのような大型船と比較して小型で機動性が高く、かつ方位制御を効かせる船速域もかなり広い。そこで、野本モデルの考え方を基本としながらも、ボートの大きさ（全長、船幅）、船外機数（1～4機掛け）、船底形状違い、の複数のボートで、船速をパラメータとした舵角に対する角速度の周波数応答を徹底的に実測した。その結果、どんなボートでも同じ船速であれば周波数応答の差異が小さくしかも線形で、当該特性が船速に強く依存する、といった極めて重要な実験的事実を突き止めた（図4）。これにより、線形でありながら、線形モデルのパラメータに船速依存性を持たせた特長的なモデリングが可能となった。また、産業界では最も身近な古典制

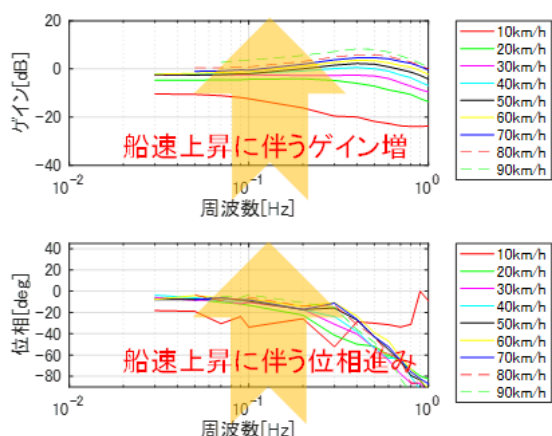


図4 舵角に対する角速度の周波数応答実測値

御理論が、制御系設計に使える見通しを得た。

(2) 系統的な方位制御系設計

方位制御系を理論立てて系統的に設計するために、ボートの動特性モデルと制御系のモデルをもとに、数値シミュレーションで要求の成立性を検証するモデルベース開発を実践した。方位制御系は、角速度を制御する角速度制御系と、角速度の積分に相当する方位を制御する方位制御器より構成される。特に、前者の角速度制御系は、ボート動特性の船速依存性を吸収しつつ、外乱に対するロバスト性を担保するゲイン可変型の3つの特長的な制御器で設計した。

- ①角速度制御器：角速度応答を、船速に依らず常に一定として応答バラつきを抑制する役割
- ②振動抑制制御器：特に舵効きが鈍感な低船速域での操舵による、角速度応答の遅延を小さくする役割
- ③2自由度制御器：“方位を変更するように方位指令が出ているにも拘らず、船首がなかなかその方向を向いてくれない”といった違和感を操船者に与えないよう、方位指令直後に実方位を機敏に反応させる役割

なお、ボート動特性の高船速域では、図4に示したゲインの緩やかな山に見られるように、操舵によって角速度の感度が高くなる特性があるため、これを抑える役割を果たすフィルタをさらに導入し、方位制御器を含め、方位制御系を構成した（図5）。

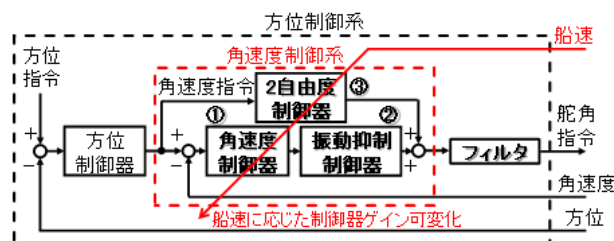
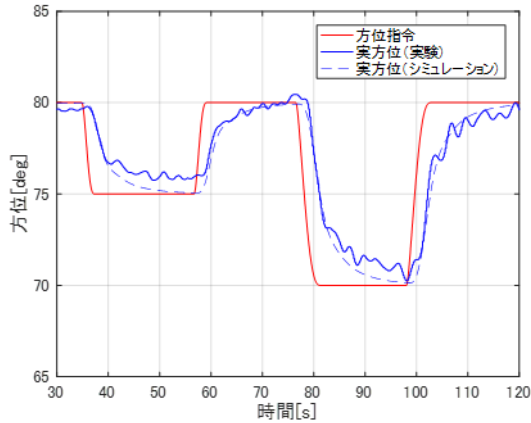


図5 開発した方位制御系

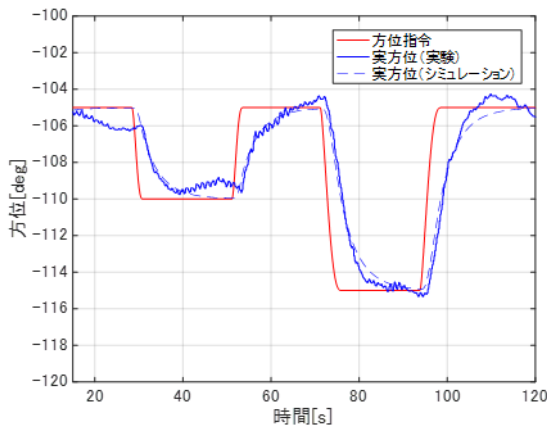
(3) 実験による検証

方位制御系をBCUへ実装し、複数のボートで方位制御性能を評価した。その結果、すべての

ボートのすべての船速域で方位制御性能を満足することを確認し、「船速、およびボートに依存せず正確に方位制御可能」なことを実証できた（最大時速 70km のボートでの実測例、図 6）。



(a) 時速 10km



(b) 時速 70km

図6 実験と数値シミュレーションの比較

実用上の効果

【産業性】ボート動特性は、システム設計の効率化や、将来の自動操船化に向けた他の機能開発へ活用できる。また、角速度制御系でのゲインスケジューリング制御の考え方は、ボートのみならず動特性が変動する機械対象へも応用できる。

【社会性】低船速から高船速にかけて安定した自動操舵を実現できるため、ボートを直進走行させるためのハンドルでの操舵、つまり当て舵

操作を低減し、操船者の労力の手間を大幅に省く簡単な操船を提供できる。搭乗者には、直進中の方位の振れが極めて小さい快適な乗り心地を提供できる。

【波及効果】開発した方位制御技術には汎用性があり、ユニークな推進器を有する新操船システム HARMO にも展開されている（図 7）。



図7 新操船システムHARMOの推進器

知的財産権の状況

本開発品の装置に関する主要な特許登録は、下記のとおりである。

① 日本国特許第 6976367 号

名称: 船舶の方位制御装置

概要: 制御対象の変動に対してロバストな制御装置およびその方法に関する。

② 米国特許 US10296014

名称: BOAT MANEUVERING CONTROL METHOD FOR BOAT AND BOAT MANEUVERING CONTROL SYSTEM FOR BOAT

概要: ボートの方位保持などの機能実現に係る制御方法とその制御システムに関する。

むすび

私たちは、今後もお互いの企業の強みを融合させ、マリンレジャーを楽しむすべてのお客様へ「いいね！」と感じて頂ける価値を常に探求し、価値提供に資する機械装置の具現化に向けて積極的に挑戦し続けてまいります。