

架橋工事用自航台船の定点保持制御装置の開発

Development of Dynamic Positioning System for Bridge Construction Supporting Vessel

下 関 造 船 所 大 仲 茂 樹^{*1}

技 術 本 部 寺 田 郁 二^{*2} 山 本 郁 夫^{*3}

和 田 洋 二 郎^{*4}

本州四国連絡橋公団 古 賀 昇^{*5} 朝 倉 義 博^{*6}

近年、橋梁(りょう)架設工事のために、台船を潮流、風などの海象・気象外乱条件下において、定点保持されるシステムのニーズが高まっている。筆者らはアドバンスト制御理論を用いた定点保持システムを開発し、先般、来島海峡大橋の橋梁架設工事に用いる自航台船に応用した。このシステムの機能と効果は、シミュレーション並びに現場海域実験により確認し、来島海峡のような風や潮流の激しい海域においても、高い定点保持性能が達成できた。

A position-keeping control system is a necessity for bridges construction supporting vessel under severe environmental conditions. The authors have developed a dynamic positioning system based on advanced control theories, and have applied it to a vessel involved in the construction of the Kurushima Bridges. The effectiveness of the system has been confirmed by simulations and experiments. High performance in position-keeping was achieved under the severe environmental conditions of the Kurushima strait in Japan.

1. は じ め に

近年、橋梁(りょう)架設工事のために運搬船を潮流、風などの海象・気象条件下において、定点保持させる制御システムのニーズが高まっている。図1に示す直下吊工法による来島大橋補剛桁(げた)架設工事に際しても、潮流など海象・気象外乱が大きい海域(来島海峡)で橋梁架設工事を行わなければならない。そのため、工事作業中の優れた定点保持を実現させる制御システムの開発が重要となっている。特に、本橋梁架設工事では、運搬船上の補剛桁ブロック(500t)をメインケーブルに設置したリフティングビームで直接吊り上げるため、架設位置直下での定点保持性能が作業効率と安全性を左右する。このたび、アドバンスト制御方式内蔵の定点保持制御装置を本州四国連絡橋公団と共同開発し、図2に示す2000t箱型台船の四隅に主機関と全旋回式推進器(アクチュエータ)を装備した自航台船に搭載し、来島海峡において定点保持性能確認実験を行った。

本システムは、非線形計画法をオンライン制御で演算し、4基のアクチュエータの出力を最適配分し、海象・気象外乱下において船体を精度良く定点保持するところに特色がある。来島海峡のような風や潮流の激しい海域においても、各アクチュエータの出力の最適化を図り、迅速に外乱変動に対応できるシステムを実現している。また、潮流などの未知外乱をカルマンフィルタを用いて推定し、未知外乱が制御系に与える悪影響を先行的に除去し、定点保持性能の向上を図っている。

本報では、第2章にてシステム概要を、第3章にて制御ロジックを説明し、第4章にてシミュレーション検討結果、第5章にて現場海域実験結果を示し、開発した定点保持制御装置の内容をまとめている。

2. システム概要

本システムは次の装置から構成される。

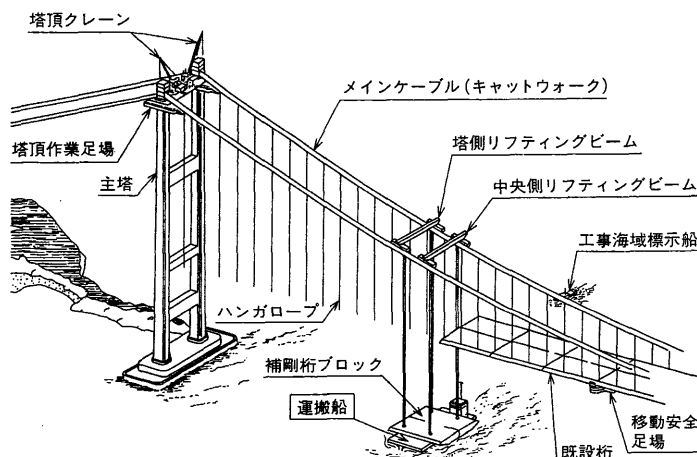


図1 来島大橋補剛桁架設 来島大橋補剛桁架設状況を示す。
Image of bridge construction of Kurushima strait



図2 自航台船外観図 自航台船の外観を示す。
Bridge construction vessel

(1) 操作盤〔携帯(固定可)型、ジョイスティックレバー、旋回ダイヤルほか〕

*1 船舶・海洋部電気・制御設計課主務

*2 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター主査

*3 長崎研究所制御システム研究室 工博

*4 長崎研究所船舶・海洋研究推進室

*5 第一建設局垂水工事事務所機械電気課長

*6 第三建設局今治工事事務所主査

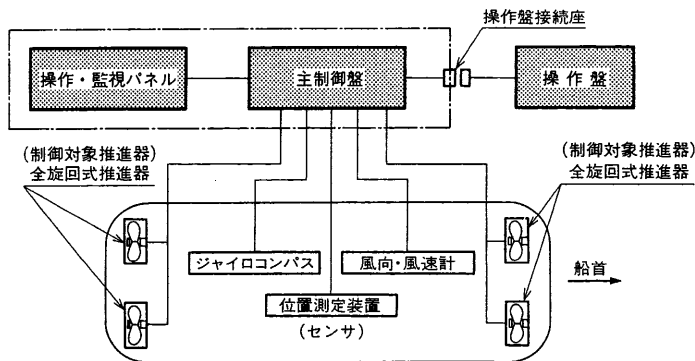


図3 システム構成/接続図 システムの概略構成と各機器の接続状況を示す。
System diagram/connection

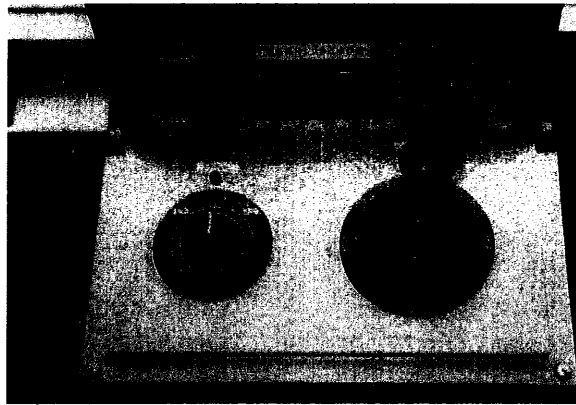


図4 操作盤外観図 実装した操作盤の外観を示す。
Operation console

- (2) 主制御盤 (コンソール組込み型, CPU, 通信ボード, 電源制御ユニットほか)
- (3) 操作・監視パネル (コンソール埋込み型)
- (4) 操作盤接続座 (埋込み型)

本システムの構成と全旋回式推進器及び各種センサとの接続を図3に、操作盤の外観を図4に示す。盤面にはジョイスティックレバー、旋回ダイヤル、液晶パネル、各種表示灯及び押釦スイッチ類を設けている。液晶パネルには“操船指令推進合力”、“船首方位”、“設定方位”、“設定位置”などを表示し、“システム異常”などの可視・可聴警報は主制御盤及び操作・監視パネルに設けている。

本システムは、全旋回式推進器4基をアクチュエータとして持つ自航台船の位置を潮流、波、風などの外乱条件下で自動的に定点保持する操船制御性能を有する。

システムは以下の二つの操船モードを持つ。

- (1) “ジョイスティック制御”モード (JOY モード)

ジョイスティックレバー及び旋回ダイヤルを手動操作して操船するモード。

- (2) “自動定点保持制御”モード (DPS モード)

船位信号をリアルタイムに受信し、台船を自動的に目標位置に保持させるモード。

これらのモードは、操舵(だ)室に装備された操作盤上の操船モード切換スイッチにより切換えられる。制御系のゲイン、パラメータ、推力配分については、船体及び推進器数学モデルでの外乱を考慮したシミュレーション結果により設定される。なお、推進器相互の水流干渉による推力減少、推進器相互干渉を避けるため

の推進器の旋回角制限などについても考慮している。

定点保持モードにおけるシステムの機能は次のとおりである。操作盤上の選択スイッチにより“JOY モード”と“DPS モード”の二つの操船モードを選択できる。両モードにおいて操船中、1基の推進器が故障した場合(非常事態)には、残りの3基の推進器にて操船制御する。各モードにおけるシステムの機能は次のとおりである。

- (1) 定点保持 JOY モード

本モードにおいては、1本のジョイスティックレバーと1個の旋回ダイヤルを操作することにより4基の推進器を制御し、ジョイスティックレバーを倒した向き、倒した量に応じて台船を前後・左右・斜めに移動及び旋回できる。すなわち、目標位置への移動・保持は手動で、目標方位への回頭・保持は手動並びに自動で行える。本モードは“移動”、“旋回”及び“自動船首方位保持”の操船機能と“風外乱補償”機能を有する。

- (2) 定点保持 DPS モード

本モードは位置測定装置からの船位信号をリアルタイムに受信し、台船の現在平面位置と定点保持目標位置との差を常時フィードバックし、4基(1基故障時は3基)の推進器を制御して台船を目標範囲内に自動的に保持させる。また、目標方位への回頭・保持は手動並びに自動で行う。本モードは“微小移動”、“旋回”及び“自動船首方位保持”の操船機能と“風外乱補償”及び“未知外乱補償”機能を有する。

3. 制御ロジック

制御ロジックの基本ブロック線図を図5に示す。制御ロジックは推力配分を中心に、推力配分入力前に、位置制御、方位制御など設定値追従制御処理(含制御モード切替処理)、既知及び未知外乱補償のための外乱フィードフォワード補償処理、推力配分出力後に推進器指令信号設定処理を行う。なお、位置制御、方位制御のゲインはシミュレータを用いてあらかじめ定める。センサは船体位置計測用に位置計測装置(光学式測距計)、方位角計測用にジャイロコンパス、風外乱計測用に風向・風速計を使用する。

推力配分部は、非線形問題への対処と推進器個数変化への対処のために、非線形計画法応用制御により構築する。推力配分は、各方向の要求推力と要求モーメントを各推進器に最適配分するものである⁽¹⁾。推力配分の配分評価基準として、従来は式(1)に示す各推進力の推力の総和を最小とする方法(推進力最小評価手法)が採用されていたが、今回は、潮流が速いこと、定点保持精度が厳しいことにより、制御応答性が重要であり、新たに、式(2)に示す各推進器の旋回角の操作量の総和を最小とする方法(旋回角最小評価手法)を考案した。

$$J_T = \sum_{i=1}^n (F_{xi}^2 + F_{yi}^2) \quad (1)$$

$$J_\theta = \sum_{i=1}^n (\theta_i + \theta'_i)^2 \quad (2)$$

$$\theta'_i = \tan^{-1}(F_{yi}/F_{xi}) \quad (3)$$

$$\theta_i = \tan^{-1}(F_{yi}/F_{xi}) \quad (4)$$

ここで、

J_T : 推進力の総和を最小にする評価関数

J_θ : 旋回角の操作量を最小にする評価関数

n : 推進器の個数

θ'_i : 推進器 i の首振り変化前の角度

θ_i : 推進器 i の首振り変化後の角度

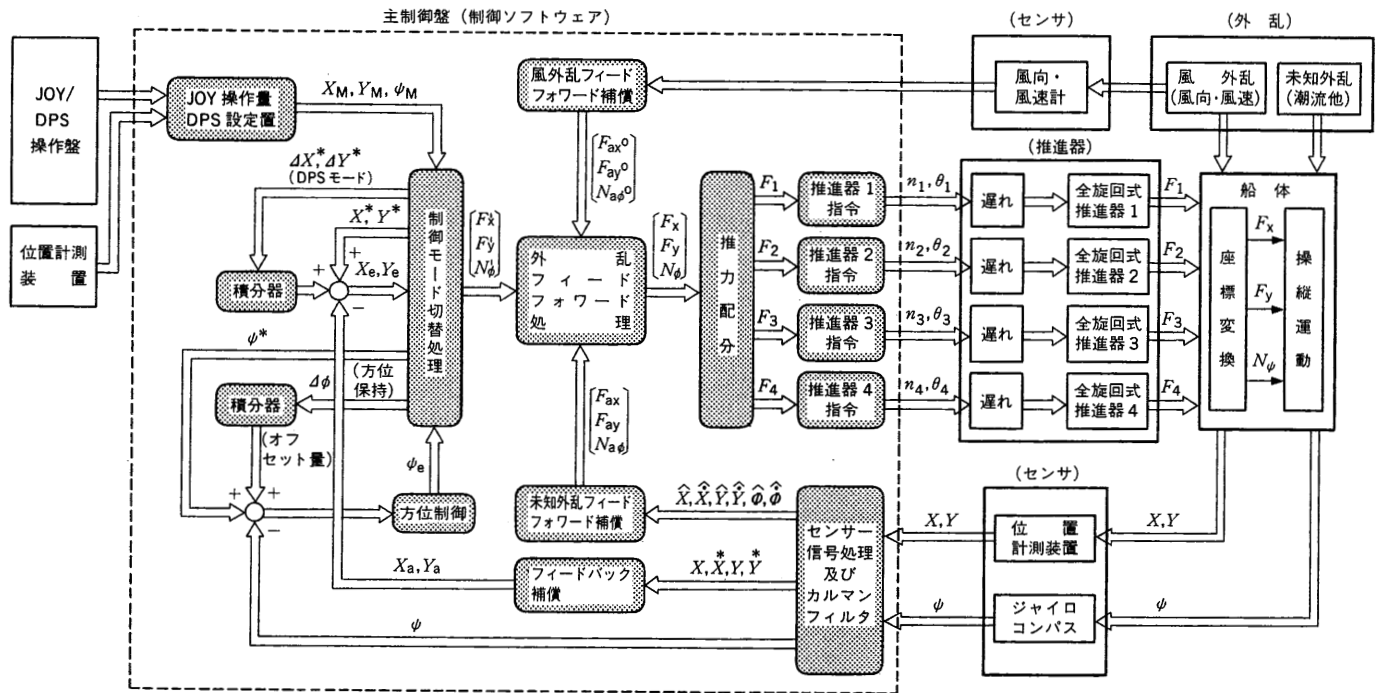


図5 定点保持システム制御系統図 定点保持システムの制御系統を示す。
Block diagram of Dynamic Positioning System

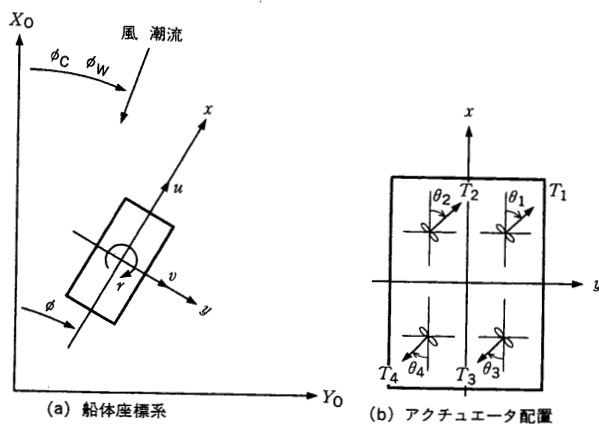


図6 座標系 船体座標系並びにアクチュエータの配置を示す。
Coordinate system

F_{xi}', F_{yi}' : 推進器 i の首振り変化前の X, Y 方向分力

F_{xi}, F_{yi} : 推進器 i の首振り変化後の X, Y 方向分力

評価関数 J_0 を最小化すべく、ペナルティ関数法と準ニュートン法により推力配分値を求める。これにより、船体及びアクチュエータの非線形制約条件（各アクチュエータの最大旋回角及び最大出力）を考慮した推力配分が可能となる。

また、各推進器の力の方向は、初期状態をすべて船体中心に向け約 45° 方向とする。これにより様々な方向の外乱に対処できるものとしている。

外乱フィードフォワード処理は、推力配分の入力前に設定し、外乱フィードフォワード補償処理部と未知外乱フィードフォワード補償処理部から構成される。前者は、風向・風速計がセンシングした風向・風速値から、船体に加わるサージ、スウェイ、ヨー方向の外乱力を推定し、補償力を演算する。後者は、センサにて検出できない潮流、波などの外乱が船体に及ぼす力とモーメントをカルマンフィルタにて推定し、推定量をリアルタイムで補償制御する⁽¹⁾。

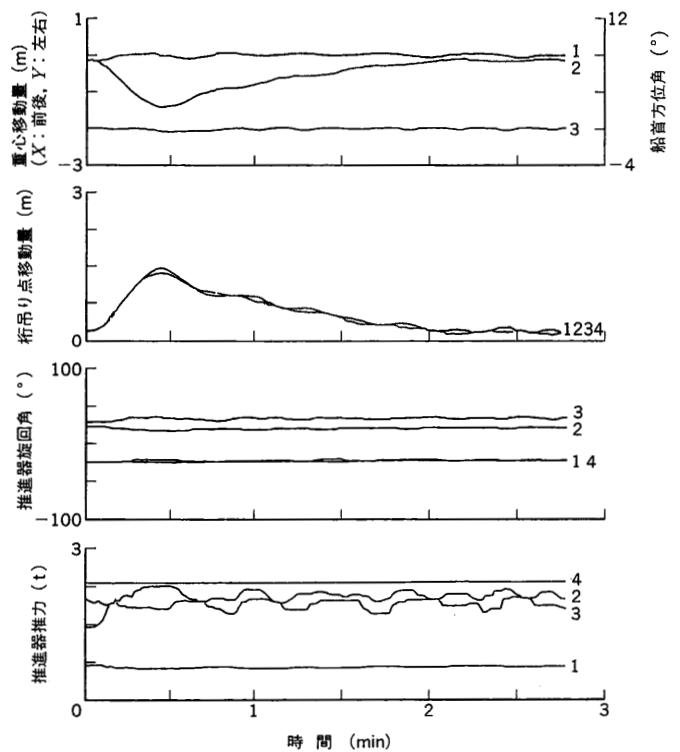


図7 シミュレーション結果 シミュレーション結果の一例を示す。
Result of simulation

本システムでは、DPS モードを基本ループとし、外乱フィードフォワード処理はバイアス加算しており、基本ループの演算時間を増加させないよう工夫している。

4. 数値シミュレーション検討

3章で述べた制御ロジックは、現場海域実験前に船体数学モデルを用いた数値シミュレーションにより、有効性の検討を行った。定点保持性能の検証には、船体の運動を表すシミュレーション

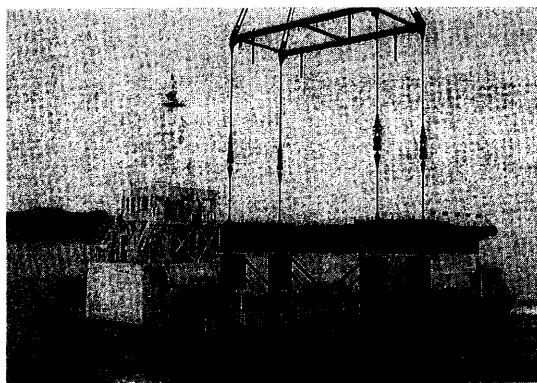


図8 補剛桁架設ブロック吊り上げ作業 補剛桁架設ブロック吊り上げ作業状況を示す。
Operations of lifting block

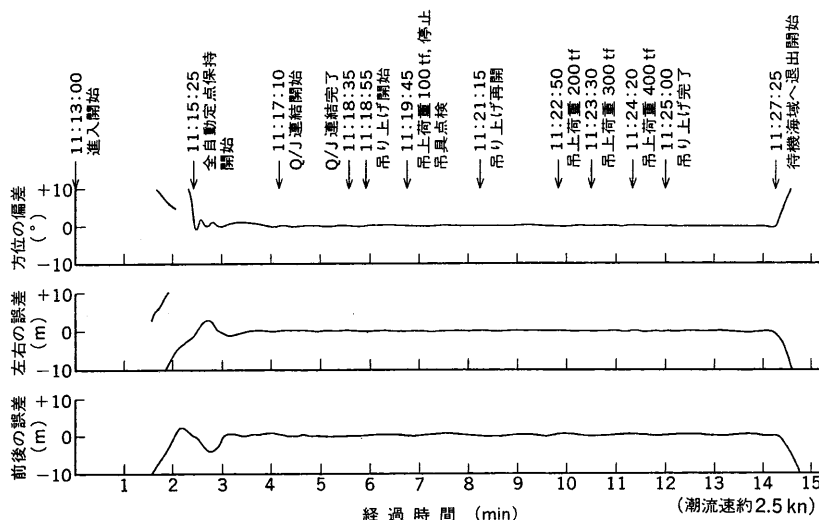


図9 現場海域における定点保持性能 現場海域における定点保持性能実証結果の一例を示す。
Result of dynamic positioning performance by experiment in Kurushima strait

モデルが必要であり、船舶の操縦運動の推定に用いられている運動方程式を適用することとした。図6に示すように、 (X_0, Y_0) を空間固定の座標系、 (x, y) を船体固定の座標系とすると、船体の操縦運動方程式は、次のように前進方向・横方向及び回頭の二次元平面内での3自由度の運動として表すことができる。

・前後運動

$$(M + m_x) \cdot du/dt = (M + m_y) \cdot v \cdot r + X_H + \sum_{i=1}^4 T_{si} \cdot \cos \theta_{si} + X_A + X_W \quad (5)$$

・横運動

$$(M + m_y) \cdot dv/dt = -(M + m_x) \cdot u \cdot r + Y_H + \sum_{i=1}^4 T_{si} \cdot \sin \theta_{si} + Y_A + Y_W \quad (6)$$

・回頭運動

$$(I_{zz} + J_{zz}) \cdot dr/dt = N_H + \sum_{i=1}^4 (x_{si} \cdot T_{si} \cdot \sin \theta_{si} - y_{si} \cdot T_{si} \cdot \cos \theta_{si}) + N_A + N_W \quad (7)$$

ここで、

M, I_{zz} : 船体の質量及び重心周りの慣性モーメント

m_x, m_y, J_{zz} : x, y 軸方向の付加質量及び付加慣性モーメント

u, v, r : 船速の x, y 軸方向成分及び回頭角速度

T_{si}, θ_{si} : i 番目の推進器の推力及び旋回角

x_{si}, y_{si} : i 番目の推進器の取付け位置

X_H, Y_H, N_H : 船体に作用する流体力（船体が運動することによって水から受ける力・回頭モーメント）

X_A, Y_A, N_A : 風により船体を受ける風圧力・回頭モーメント

X_W, Y_W, N_W : 風により船体を受ける漂流力・回頭モーメント

なお、潮流により船体を受ける力については、潮流速度を船速 (u, v) に加算する（相対流速）ことにより、船体に作用する流体力 (X_H, Y_H, N_H) に含めて平水中の操縦運動として扱う。

数値シミュレーションは、現場海域で想定される潮流・波浪・風外乱の様々なケースについて推進力最小評価手法と、旋回角最小評価手法について実施し、定点保持性能を検証した。代表例を

図7にまとめる。推力配分は推進器旋回角度が最小となるように定めているため、推力配分演算の収束時間が旋回角最小評価手法が推進力最小手法より小さくなった。また、外乱変動への対応も内側45°方向の各推進器推力の動的バランスにて位置保持されているため、推進器旋回角最小の推力配分評価関数の効果と併せて、応答が速やかで、かつ外乱に対しロバストとなっている。定点保持の収束量（目標値と船位との変位量）も0.25 m以下（スペック内）と良好な位置保持性能を示した。

5. 現場海域実験

定点保持制御の現場海域実験を、来島大橋補剛桁架設工事を行う来島海峡にて実施した。自航台船“うまし”（排水量500 t、船長54.55 m、船幅48 m）には、船体の四隅に推力6.4 tの全旋回式推進器と本制御系内蔵の制御装置を搭載し、補剛桁ブロック（500 t）吊り上げ時（図8）に自航台船を海象・気象外乱下で定点保持させた。本制御装置の設計条件として、台付けワイヤセッティングから桁ブロック吊り上げまでの20 minを定点保持時間とし、海象・気象外乱下において±2.5 m以内での定点保持性能が要求される。

図9に模擬施工時の結果を示す。強潮流下（3 kn相当）における補剛桁吊り上げ時の定点保持精度は極めて安定しており、桁ブロックと台船の相対ずれは20 cm以内であった。

6. おわりに

本システムにより厳しい海象・気象外乱下における作業台船の定点保持が達成でき、本方式による来島大橋補剛桁架設工事（平成9年実施予定）の実施工に向け、明るい見通しを得た。

今後、様々なタイプの船舶に本システムを活用し、適用性、汎用性を高めるとともに、システムインテグリティ機能の充実など、更なる制御機能の開発を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 寺田, 山本, 船舶操船制御系設計に関する研究, 日本造船学会論文集 Vol.178 (1996) p.313~319