H_∞ 制御手法による翼付き双胴船のロール制御

正員 大 和 裕 幸* 正員 小 山 健 夫*

正員 藤 田 法 正** 正員 榎 本 昌 一*

Roll Control System for the Hydrofoil Catamaran Based on the H_∞ Methodology

by Hiroyuki Yamato, *Member*

Norimasa Fujita, *Member*

Takeo Koyama, *Member*

Masakazu Enomoto, *Member*

Summary

The H_∞ roll control system for the Hydrofoil Catamaran is presented in this paper. The roll dynamics of the ship changes as the speed and other state variables change, and the ship is always under the disturbance from the waves and winds. Taking these two aspects of the control into account, the roll control system is defined as the mixed sensitivity problem of the H_∞ robust control theory. The system was designed and validated by the actual sea testing using the prototype ship "Exceller." The robustness and stability to the disturbance from the wave were clearly observed in the actual sea testing.

1. は じ め に

翼付き双胴船 (Hydrofoil Catamaran) が、東京大学抵抗水槽を中心に瀬戸内クラフト、日立造船の手で開発作業が続けられており、基本的な性能は制御システムも含めて「エクセラー」と名付けられた船長 12 m の実験船で確認した。翼付きの双胴船は、本来、縦および横ともに安定性の高い船型であり、とくに制御等をしなくても十分に船として成立する。しかし、高速時に翼面上に配置された可動翼により十分な制御力を得ることができ、これによって静的および動的な船体運動制御が行なえ、従来の船舶では実現することのできない乗り心地や安定感を作り出すことができる。本研究では翼付き双胴船のロール制御に関して、速度変化等によるシステムの変動、波や風による外乱の抑制効果を狙って、いわゆるロバスト制御手法のひとつである H_∞ 制御理論を適用して設計を行ない、実験船「エクセラー」で実証試験を行なった。

2. 翼付き双胴実験船「エクセラー」

翼付き双胴船は、双胴船に翼を渡して、航行中は翼揚力

により船体全体を浮せて高速を達成するものである¹⁾。しかし、ジェットフォイル式の船舶と異なり、双胴部分は一部没水しているためにロールやピッチの固有安定性は確保されている。1990 年の夏に、水槽試験の結果の立証のため、また、小型の模型では考えることの困難な制御システムの検討のために、瀬戸内クラフト (株) が全長 12 m、重量約 9 トンの実験船「エクセラー」を建造、6 回のシリーズに分けて、途中改造工事をはさみ二年間にわたり実船実験を行なった^{2),3)}。

Fig. 1 に「エクセラー」の三面図を示す。ディーゼルエンジンとウォータージェットを二基ずつ搭載している。側面図には、停止時と航走時の喫水線を示した。前翼後翼ともに後縁に 4 枚ずつの可動翼を持ち、中心線に近い二枚は左右対称に動かし縦の制御に用い、中心線から離れた二枚は左右反対称に動かしロールの制御に用いている。駆動用の油圧サーボアクチュエータも新製した。Fig. 2 には「エクセラー」の制御装置とデータ取得システムを示す。CPU には日本電気製の PC-9801 RA を用いている。フロッピーディスクから制御則をロードして、種々のシステムの実験が行なえるようになっている。

3. H_∞ 制御理論の概要

ここで H_∞ 制御理論について簡潔に述べる。 H_∞ 制御理論はいわゆるロバスト制御理論の一つで、ここ 10 年位の間に急速に進歩した分野であり、船舶への応用も試みられて

* 東京大学工学部

** Komatsu (株)

Fig. 1 Three-view of the experimental ship "Exceller."

Fig. 2 Control and data acquisition system.

いる。

Fig. 3に H_∞ ノルムの定義と理論の基礎となる小ゲイン定理を示した⁵⁾。 H_∞ ノルムはベクトル軌跡上の原点からの最長距離であり、 f をシステムの一巡伝達関数とするとナイキスト線図に相当し、 H_∞ ノルムが1以下であることはシステムが安定であることの十分条件である。 H_∞ 制御では、想定される外乱やシステムの変動に対して重みを設定し、 H_∞ ノルムが1以下になるようにコントローラーを設

定することになる。本研究では、ロールの制御として、波浪による外乱の抑圧とシステムの変動に対するロバスト性の二つについて考慮し、混合感度問題として定式化した。

混合感度問題はFig. 4に示すような構成となり、 Z_1, Z_2 はそれぞれ外乱抑圧とロバスト性に関する制御量で、重み W_1, W_2 を設定する。この重み関数に対してコントローラ C を設定する。このコントローラ C を求めるには以下のような手順で計算を行なうことになる。まず、状態変数ベ

Fig. 3 H_∞ norm and the small gain theorem.

Fig. 4 Mixed sensitivity problem.

クトル x , 制御変数ベクトル u , 制御量ベクトル $z = [z_1^T, z_2^T]^T$, 外乱ベクトル w , 観測量ベクトル y として, システムの状態方程式, 制御量, 観測に関する式はそれぞれ次のようである。

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B_1 w + B_2 u$$

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u$$

$$y = C_2 x + D_{21} w$$

ここで, $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ はそれぞれマトリクスである。

これに対して,

$$C_1^T D_{12} = 0, D_{12}^T D_{12} = I$$

$$D_{12} B_1^T = 0, D_{21} D_{21}^T = I$$

を仮定する。コントローラ $C(s)$ は, Riccati の方程式を解いて, 以下のように表される。^{5~7)}

$$C(s) = \hat{C}(sI - \hat{A})^{-1} \hat{B} + \hat{D}$$

ここで

$$\hat{A} = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T P + B_2 F + Z L C_2$$

$$\hat{B} = -ZL, \hat{C} = F, \hat{D} = 0$$

$$F = -B_2^T X_\infty, L = -Y_\infty C_2^T,$$

$$Z = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

さらに X_∞, Y_∞ は以下の Riccati 方程式の解である。

Riccati 方程式:

$$X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty + C_1 C_1^T = 0$$

$$Y_\infty A^T + A Y_\infty + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0$$

γ は正定数。

4. ロール制御システム設計手順

実際に設計した手順をここに示す。Fig. 4 中の W_1 と W_2 をきめてコントローラを求める。まず, システムのロバスト安定化に関する重み W_2 を決定する。設計に用いるロールの動特性は, 実船でエルロンに周波数入力を入れ, それに対するロール角の応答を計測して求めた。その際に, 入力の大きさや速度の違いなどによりばらつきが生じる。設計に用いた動特性と入力の大きさによるばらつきの様子を Fig. 5 に示した。

このようなばらつきに対して制御システムが成績よく作動するようにする。そこで系に乗法摂動を仮定し, すなわ

Fig. 5 Roll dynamics of "Exceller."

Fig. 7 Weighting function W_1 and W_2 . Fig. 6 Weighting function W_2 .

ち、摂動を Δ として、もとのシステムの伝達関数 P が $(1+\Delta)P$ に変動すると仮定する。そしてこの Δ の中に実験結果が含まれるようにし、これと対応して W_2 を決定する。

Fig. 6 に W_2 と Δ とを合わせて示した。次に外乱抑圧のための W_1 を設定する。外乱に対する感度関数とロバスト安定化の指標である相補感度関数は加え合わせて 1 になるため、重み関数もそれに対応した形とすることが必要である。そこで W_2 を考慮して W_1 は低周波の応答を抑えるような形とした。Fig. 7 に重み関数を示した。

これに対して、前章で述べた Riccati の解を求め、以下のようなコントローラが設定できる^{6),7)}。

$$C(s) = \frac{7.610s^3 + 553.74s^2 + 4860.8s - 6751.0}{s^4 + 85.54s^3 + 1590.3s^2 + 10669.0s + 26110.0}$$

5. ロール制御システム実験結果

設定されたコントローラを「エクセラー」の計算機にロードして実船試験を行った。実験は 1991 年 10 月に行った。瀬戸内海尾道沖周辺の海域で、ロール制御システムの試験は数メートルの風と、40 cm 程度の波のある場所を選んで

Fig. 8 Roll control result.

H _∞ Control	Speed: 20kt		Speed: 22kt	
Control ON/OFF	OFF	ON(ON/OFF:%)	OFF	ON(ON/OFF:%)
Roll angle (deg)	2.26	1.67 (74.03)	2.13	1.58 (74.04)
Roll rate (deg/sec)	4.06	2.34 (57.66)	3.99	2.27 (56.97)
Aileron angle (deg)	-----	6.00	-----	5.68
PD Control	Speed: 20kt		Speed: 22kt	
Control ON/OFF	OFF	ON(ON/OFF:%)	OFF	ON(ON/OFF:%)
Roll angle (deg)	2.12	1.70 (80.20)	2.36	1.86 (78.90)
Roll rate (deg/sec)	3.94	2.42 (61.37)	3.79	2.43 (63.99)
Aileron angle (deg)	-----	7.83	-----	8.14

Sea state: Wave height 40cm

Fig. 9 Summary of the control results in RMS value.

おこなった。ロール制御システムの試験の時歴を Fig. 8 に示す。

これは速度 22 ノットの場合である。command 信号に示されるように 230 秒から 310 秒までの間、制御がかかっており、ロール角、ロールレートともに大きく減少している

のがわかる。

次に、一連の試験で時歴をとり、その rms 値で制御の効きをまとめたのが Fig. 9 である。

H_{∞} 制御によるものは 20 ノットと 22 ノットの 2 種類を示した。また比較のために古典制御を用いた PD (比例及び微分) 制御の結果を合わせて示した。全て同じ海域で、同日に試験したものである。いずれも on/off の差は明瞭で、 H_{∞} 制御の場合、20, 22 ノットともに、ロール角、レートとも約 74% 程度に減少する。また速度が変化しても、即ちシステムの状態が変わっても制御に効きは変わらないこともわかる。PD 制御も効果は明瞭であるが、 H_{∞} 制御の方が、理由はよくわからないがエルロンの動きが少ないことがわかる。

6. 結論と今後

翼付き双胴船「エクセラー」のロール制御システムを H_{∞} 制御手法により設計し、実船試験でその効果を確認した。

- (1) 波浪中のロール運動に関して良好な制御成績をあげることができた。
- (2) 速度を変更してシステムを変動させた試験を行い、システムのロバストネスを確認した。

今回は、研究初期であり、とりあえず重み関数を定義して設計を行ない、良好な結果が得られた。今後はこれら一連の手順をまとめ、例えば、重みの取り方でどのように制御結果が変化するか等を明確にし、設計の指針を考える必要がある。

謝 辞

本研究は、東京大学工学部助教授宮田秀明先生をリーダーとして東大、瀬戸内クラフト、日立造船の 3 者共同で行った翼付き双胴船の研究の一部である。実験艇「エクセラー」を用いた研究はこれで終止符を打つことになる。本研究の機会を与えられ、始終暖かいご支援をいただいた宮田先生に心から感謝いたします。また、瀬戸内クラフト (株) 松野清孝前社長、川口洋氏、日立造船 (株) マリン開発部有井俊彦氏、同技術研究所高井忠夫氏、中川有紀氏はじめ皆様には大変お世話になり、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宮田秀明他：新型双胴水中翼船の開発 (第 3 報 大型船型の計画と流体力学的性能), 日本造船学会論文集, 第 166 号, pp.11-19, 1989.12.
- 2) 宮田秀明他：双胴水中翼実験艇の定常直進航走試験, 日本造船学会論文集, 第 170 号, pp.15-22, 1991.12.
- 3) 大和裕幸他：双胴水中翼実験船の制御システム試験, 日本造船学会論文集, 第 170 号, pp.183-190, 1991.12.
- 4) N. A. Fairbairn and M. J. Grimble: H_{∞} marine autopilot design for course-keeping and course changing, Proc. of the 9th Ship Control System Symposium, Bethesda, USA, 1990.9.
- 5) J. M. Maciejowski: *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, 1989.
- 6) K. Zhou and P. P. Khagonekar: An algebraic Riccati equation approach to H_{∞} optimization, Systems and Control Letters, Vol.11, No.2, pp. 85-91, 1988.
- 7) 加藤寛一郎：最適制御入門, 東京大学出版会, 1987.