

厳密な線形化手法のオートパイロットへの適用 *1

正会員 山田秀光 *2, 正会員 長谷川和彦 *3, 学生会員 川谷慎治 *3

Application of Exact Linearization Method to Ship's Autopilot

By Hidemitsu YAMADA (*Member*), Kazuhiko HASEGAWA (*Member*)
and Shinji KAWATANI (*Student Member*)

Generally, linear control theories are used in ship autopilot design. When the ship is directionally unstable and therefore nonlinear, the dynamics of the ship should be linearized approximately at its equilibrium point. This will however adversely affect its performance in proportion to the distance between its operating point and the equilibrium point.

Recently there have been many studies made relating to nonlinear control theories with favorable results. One promising result is the external linearization method. This is also referred to as the exact linearization method as differentiated from the approximate linearization method.

As described in this paper, we have applied the exact linearization method proposed by Ishidori to the 2nd degree of Freedom Control with path planning and MRAS (Model Reference Adaptive System) and have evaluated its effects by numerical simulation. It is found that when 2nd degree Freedom Control with path planning is applied during fast course alterations, compensation must take into consideration transient response in addition to the nonlinear steady turning characteristics of the ship. An improved design method for the feed-forward controller is also proposed. Further, the affects of ship nonlinear directional instability on the adaptability of MRAS were also studied and it was demonstrated that the MRAS provides adequate adaptability under such conditions.

Keywords : *Ship's Autopilot, Exact Linearization, 2nd Degree of Freedom Control, Model Reference Adaptive System*

1. はじめに

著者らは非線形操縦特性を有する針路不安定船にモデル規範型適応制御（以下MRASと略す）を適用し、MRASが非線形な制御対象に対しても適用可能であることを示した¹⁾。しかしながら船体の非線形特性、特に定常旋回特性の非線形性がMRASの適応性にどのような影響を与えるのかは必ずしも明確ではなかった。一方、最近のオートパイロットにはコース上を正確にトラッキングするための変針特性の向上が要求されてきており、より高速で正確な変針性能が望まれている。高速で高精度な変針を実現しようとする船体の非線形特性の影響を強く受けるため、あらかじめ船体の非線形特性を考慮した制御系の設計が必要となる。また、

従来のフィードバック制御だけでこの要求を実現しようとしても、設定針路に時間的遅れを伴って追従するために設定した航路を外れる傾向がある。これを改善するために、船体の特性を考慮した軌道計画とフィードフォワード制御系を加えた2自由度制御方式が検討されているが²⁾、線形制御理論をもとにしているため、針路不安定船には適用できないという問題があった。

1970年代後半より非線形システムに対する制御理論の研究が盛んに行われ、多くの研究成果が得られている³⁾。その中の一つに状態とフィードバックの非線形変換により非線形システムを見かけ上線形化し、従来の線形制御理論を適用可能とする外部線形化（external linearization）手法が挙げられる。従来の線形化手法は局所的なヤコビアンをとることにより線形化近似を行うのに対して、厳密に状態方程式を線形化するため厳密な線形化（exact linearization）とも呼ばれている。線形化されたシステムに対しては線形制御理論が

*1 平成12年11月17日 造船三学会秋季連合大会において講演、原稿受付平成12年12月1日

*2 (株)トキメック

*3 大阪大学大学院工学研究科

そのまま適用可能であり、いくつかの分野でその有効性が確認されている⁴⁾。

本論文では厳密な線形化手法を2自由度制御系とMRASに適用し、針路不安定船に対する効果をシミュレーションにより確認する。

2. 厳密な線形化

厳密な線形化にはいくつかの方法があるが、ここではIsidoriによる線形化法を用いる⁵⁾。まず、舵に対する船体の応答は次式で表されるとする。

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + n(\dot{\psi}) = K\delta \quad (1)$$

ここで ψ は船首方位、 δ は舵角、 K 、 T は操縦性指数、 $n(\dot{\psi})$ は非線形項である。船首方位のみが観測できるとすると次の状態方程式及び観測方程式が得られる。

$$\dot{x} = f(x) + g\delta \quad (2)$$

$$y = hx \quad (3)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad h = [1 \quad 0]$$

$$f = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{T}(x_2 + n(x_2)) \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix}$$

次に(2)式を線形化するために下記の適当な変数変換と入力変換を仮定する。

$$z = F(x) \quad (4)$$

$$\delta = a(x) + b(x)v \quad (5)$$

ここで F 、 a 、 b はベクトル関数、また、 F は原点を原点に変換すると仮定する($F(0) = 0$)。 v は新たな入力変数である。

(2)、(4)、(5)式より変数変換後は(6)式となる。

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{\partial F}{\partial x} \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{\partial F}{\partial x} \{f(x) + ga(x)\} + \frac{\partial F}{\partial x} gb(x)v \\ &= \frac{\partial F}{\partial x} \{f(F^{-1}(z) + ga(F^{-1}(z)))\} \\ &\quad + \frac{\partial F}{\partial x} gb(F^{-1}(z))v \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式が線形化(state space linearization)できるための条件はIsidoriにより次のように求められている。

「1入力1出力システムの場合、線形化できる必要十分条件は初期状態 x^0 のまわりで次の関係を満足する関数 $\phi(x)$ が存在することである。」

$$\left. \begin{aligned} L_g\phi(x) &= 0 \\ L_gL_f\phi(x^0) &\neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで L_g 、 L_f は g 、 f に沿ったリ-微分⁶⁾を表す。関数 $\phi(x)$ が与えられると、 $F(x)$ 、 $a(x)$ 、 $b(x)$ は以下のように得られる。

$$z = F(x) = \begin{bmatrix} \phi(x) \\ L_f\phi(x) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$b(x) = \frac{1}{L_gL_f\phi(x)} \quad (9)$$

$$a(x) = (-L_f^2\phi(x))b(x) \quad (10)$$

今、(7)式を満足する関数として

$$\phi(x) = x_1 = \psi$$

を選ぶと、 $F(x)$ 、 $a(x)$ 、 $b(x)$ はそれぞれ次のように得られる。

$$z = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad a(x) = \frac{1}{K}\{x_2 + n(x_2)\}, \quad b(x) = \frac{T}{K}$$

上式を(6)式に代入し、整理すると以下の線形化された状態方程式が得られる。

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v = Pz + qv \quad (11)$$

$$v = -\frac{1}{T}(z_2 + n(z_2)) + \frac{K}{T}\delta \quad (12)$$

線形化された制御系の概念ブロック図をFig.1に示す。

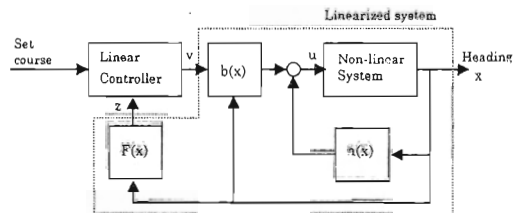


Fig. 1 Block diagram of non-linear control.

3. 軌道計画を有する2自由度制御系への適用

前節で得られた線形化された状態方程式(11)式をFig.2に示す軌道計画を有する2自由度制御系の設計に適用する。Fig.2に示す制御系はコース上を正確にトラッキングするために考案されたもので、従来のPID制御と異なり、遅れなく指定された旋回角速度で正確に自動変針を行うことができる。

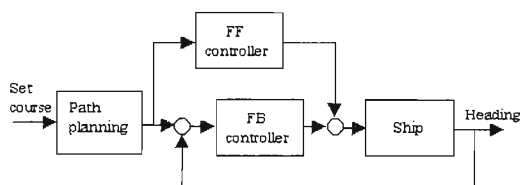


Fig. 2 Block diagram of 2nd degree of freedom control system with path planning.

軌道計画は通常、旋回時の最大旋回角速度を指定し、船体特性や最大舵角を考慮しながらほぼ最短時間で変針可能な計画を立案する。軌道計画をFig.3に示す。ここでは最大旋回角速度 $\dot{\psi}_{max}$ 、旋回角加速度 $\ddot{\psi}_I$ を指定し、旋回角速度の面積が指定された変針角 ψ_I になるような時間 t_1, t_2, t_3 をあらかじめ求め、方位に関する軌道計画を出力する。

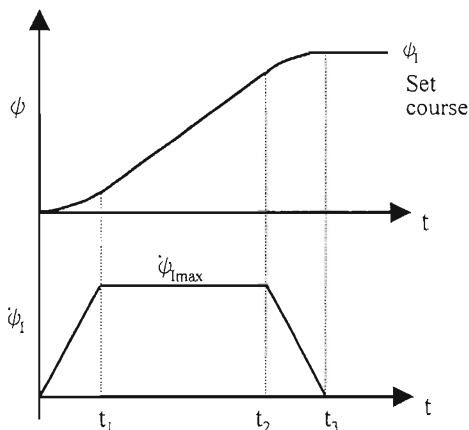


Fig. 3 Example of planned path.

一方、フィードフォワード制御器 C_{FF} は軌道計画から出力される参照針路通り変針できるように船体動特性を補償するもので、通常船体動特性 $G(s)$ の逆数がとられる。

$$C_{FF}(s) = G(s)^{-1} = q^{-1}(sI - P)$$

ここで s はラプラス変数、 P, q は(11)式で表される船体特性である。

フィードバック制御器 C_{FB} はモデル誤差や外乱等を補償するものであり、ここでは(比例+微分)制御を考える。

$$C_{FB}(s) = K_p + T_d s$$

ここで K_p は比例ゲイン、 T_d は微分ゲインである。厳密な線形化の効果をシミュレーションにより確認する。シミュレーションに用いた操縦運動数学モデルはMMGモデルを、また、船体データとしてはシリーズ60船型の質量を変えて針路不安定にした架空のモデルを用いており、その不安定ループ幅は約4°である。

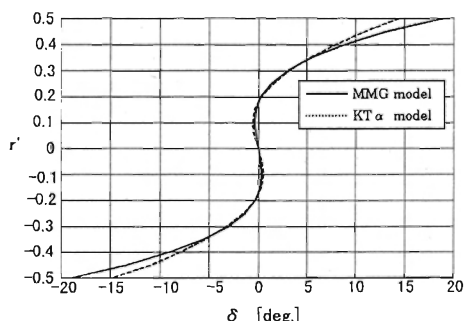


Fig. 4 Steady turning characteristics of simulation model.

Table 1 10° Z test results of MMG model.

	K'	T'	α'
Linear model	4.302	9.501	0.0
Non-linear model	-10.49	-20.12	-31.8

制御系の設計は厳密な線形化の方式と線形モデルで近似した場合の2つについて検討した。線形モデルの場合は、制御系の設計に用いる船体特性については10°Z試験をシミュレーションし、その $K-T$ 解析結果を用いた。一方、非線形モデルの場合は、非線形項 $n(x_2)$ は αx_2^3 とし、定常旋回特性データより K, α を求め、10°Z試験より T を求めた。定常旋回特性データをFig.4に、解析結果をTable.1に示す。これらのデータをもとに制御系を設計し、60°変針を行ったシミュレーション結果をFig.5に示す。船体動特性モデルを線形で近似した場合は全体的に追従遅れと指令変針角に達した後、大きなオーバーシュートが発生している。これに対し、非線形項を考慮した厳密な線形化方式はオーバーシュート量が減少し、その効果がうかがえる。しかしながら、舵を切り返すタイミングで両者とも追従誤差が発生している。そこで、舵切り直し直後の追従誤差を検討するため、MMGモデルと制御系の設

計に用いた(1)式で表される非線形応答モデル ($KT\alpha$ モデルと称する)の $10^\circ Z$ 試験の $\dot{\psi}-\psi$ 位相面軌跡を比較検討してみる。 $\dot{\psi}-\psi$ 位相面軌跡をFig.6に示す。MMGモデルと $KT\alpha$ モデルの位相面を比較すると、舵切り直し直後の旋回角加速度 $\dot{\psi}$ の発達の様子が大きく異なっていることが分かる。MMGモデルは操舵直後に $\dot{\psi}$ が大きく発達しているのに対して、 $KT\alpha$ モデルはほとんど $\dot{\psi}$ が発達していない。この影響が舵切り直し直後の追従遅れに影響していると思われる。

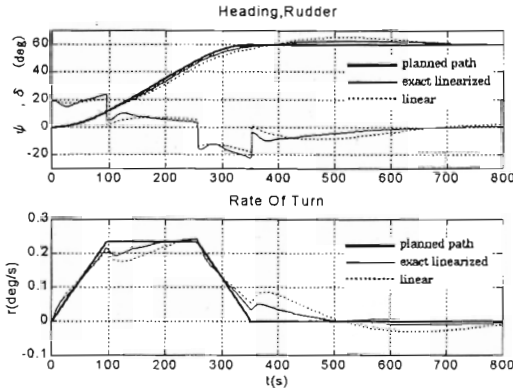


Fig. 5 Simulation results of 2nd degree of freedom control system. (Linear model and exact linearized model)

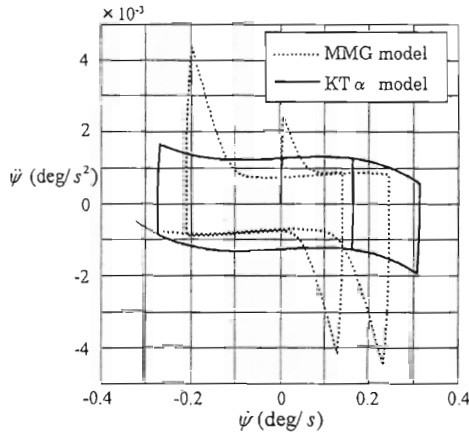


Fig. 6 Phase trajectory of $10^\circ Z$ test. (MMG model and $KT\alpha$ model)

そこで、操舵による $\dot{\psi}$ の発達を考慮するため $KT\alpha$ モデルに δ の影響を考慮した次式を導入する。

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha\psi^3 = K\delta + KT_3\dot{\delta} \quad (13)$$

上式で表される応答モデルの位相面軌跡をFig.7に示す。操舵直後の応答が改善されているのが分かる。(13)式をもとにフィードフォワード制御器を設計した結果を伝達関数表現すると下記となる。

$$C'_{FF} = \frac{(Ts+1)s}{K(1+T_3s)}$$

シミュレーションを行った結果をFig.8に示す。操舵直後の追従遅れが改善されていることが分かる。軌道計画を有する2自由度制御系で最短時間変針に近い応答を要求する場合には、定常旋回特性の非線形性だけでなく、過渡応答特性にも配慮する必要がある。

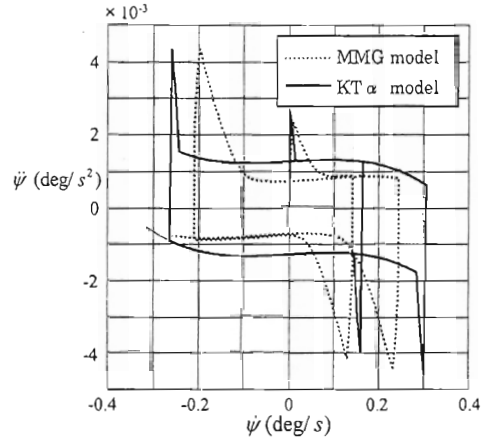


Fig. 7 Phase trajectory of $10^\circ Z$ test. (MMG model and $KT\alpha-T_3$ model)

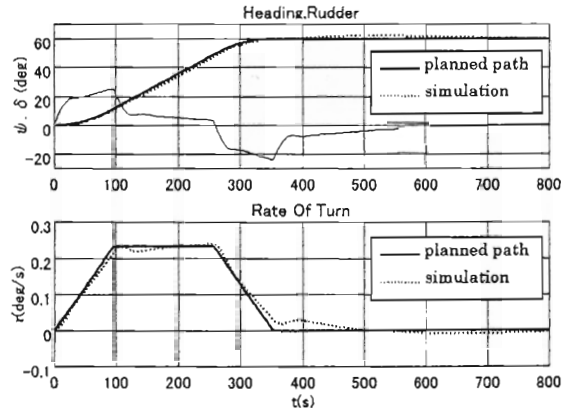


Fig. 8 Simulation result of 2nd degree of freedom control system with improved FF controller.

4. MRASを用いた自動変針制御への適用

次に厳密な線形化により線形化されたシステムにMRASを適用する。制御系のブロック図をFig.9に示す。 $F(x)$, $a(x)$, $b(x)$ は線形化するためのブロックであり、規範モデルは線形化されたフィードバック制御系に対して規定される。

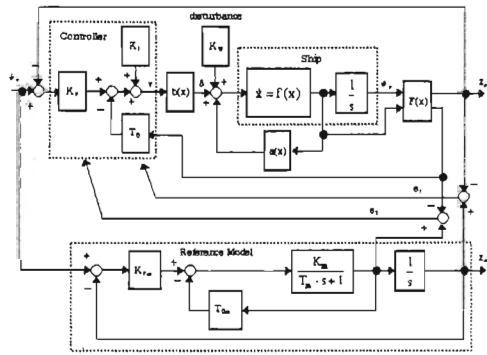


Fig. 9 MRAS control block diagram.

規範モデルを除いたフィードバック制御系の状態方程式は下記で示される。なお、状態変数及び各係数は船長 L と船速 V で無次元化している。詳細は文献¹⁾を参照願う。

$$\dot{Z} = A_p Z_p + G_p U$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{p1} \\ z_{p2} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_r \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K'K_p}{T'} & -\frac{1+K'T'_D}{T'} \end{bmatrix}$$

$$G_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K'K_p}{T'} & \frac{K'(K_I+K_W)}{T'} \end{bmatrix}$$

z_{p1}, z_{p2} : 状態変数

ψ_r : 設定方位

K', T' : 無次元化された操縦性指数

K_p : 比例ゲイン

T'_D : 微分ゲイン

K_I : 積分舵

K_W : 外乱

規範モデルは減衰係数 ζ , 固有周波数 ω_n の系とし、船体を含む制御系の状態方程式と同様に船長 L と船速 V で無次元化する。

$$\dot{Z}_m = A_m Z_m + G_m U$$

$$Z_m = \begin{bmatrix} z_{m1} \\ z_{m2} \end{bmatrix}$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K'_M}{T'_M} & -\frac{1}{T'_M} \end{bmatrix}, G_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K'_M}{T'_M} & 0 \end{bmatrix}$$

$$K'_M = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{\frac{K'_m K_{Pm}}{T'_m}}, T'_M = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{\frac{T'_m}{K'_m K_{Pm}}}$$

z_{m1}, z_{m2} : 規範モデルの状態変数

K'_m, T'_m : 無次元化された規範モデルの操縦性指数

K_{Pm} : 規範モデルの比例ゲイン

フィードバックゲイン K_p, T_D, K_I に関する適応則は (14)~(16) 式と得られる。以上より船体動特性を線形として扱った場合と同じ適応アルゴリズムが得られた。ただし、制御系の出力である舵角 δ は (5) 式より

$$\delta = K_p(\psi_I - \psi) - T_D \dot{\psi} + K_W + \frac{\alpha}{K} \psi^3$$

と得られ、線形として扱った場合に比べ非線形項 ($\frac{\alpha}{K} \psi^3$) の補正がなされている。

船体応答モデルに厳密な線形化を行った場合のシミュレーション結果と線形のまま扱った場合のシミュレーション結果を Fig.10, 11 に示す。両者にそれ程大きな差はなく、定常旋回特性の非線形性に対して MRAS は十分な適応性があると言える。

$$\frac{d}{dt'}(K_p) = \beta'(p_{12}e_1 + p_{22}e_2)\epsilon \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt'}(T'_D) = -\alpha'(p_{12}e_1 + p_{22}e_2)z'_{p2} \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt'}(K_I) = \gamma'(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \quad (16)$$

ここで α', β', γ' は無次元化された適応ゲイン、 p_{12}, p_{22} はリアプノフ関数の正定行列の要素、 e_1, e_2 は船体応答と規範モデルの出力誤差である。

5. まとめ

厳密な線形化手法を軌道計画を有する 2 自由度制御系と MRAS に適用し、針路不安定船に対する効果をシミュレーションにより確認し、以下の結論を得た。

- (1) 軌道計画を有する 2 自由度制御系に厳密な線形化手法を適用することにより、変針性能を改善できることをシミュレーションにより確認した。

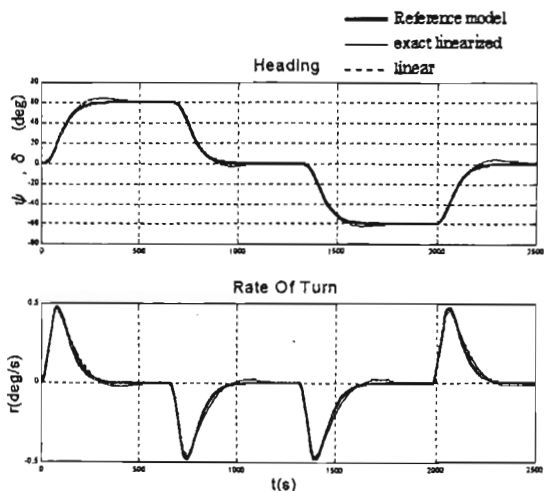


Fig. 10 Results of MRAS simulation.

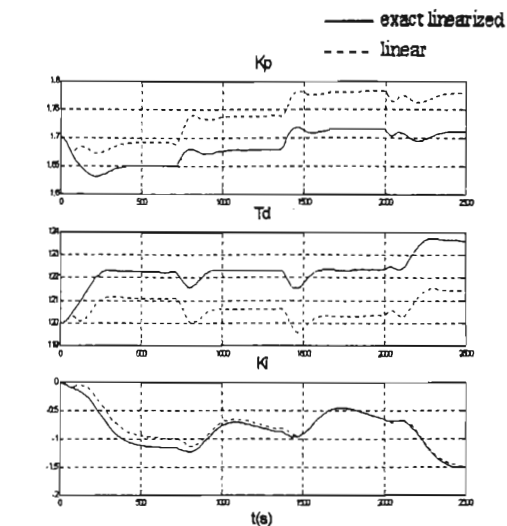


Fig. 11 Time history of F/B parameters.

今後は、実船にてその有効性を確認していく。

参考文献

- 1) 山田, 長谷川: 可変適応ゲイン方式モデル規範型適応制御の研究, 日本造船学会論文集 185 号 (1999).
- 2) 植野, 羽根: オートパイロットの新制御方式, 日本船舶工業会研究報告 (1987).
- 3) 石島, 三平: 非線形システム理論の最近の話題, システムと制御 Vol.33-No.9 (1989).
- 4) 高木, 重政: 空間線形化による非線形制御系の設計, システムと制御 Vol.33-No.9 (1989).
- 5) A. Isidori: Nonlinear Control Systems, An Introduction, Springer-Verlag (1985).
- 6) 和達: 微分・位相幾何, 岩波書店.

- (2) 軌道計画を有する 2 自由度制御系で高速な変針を実現する場合には定常旋回特性の非線形性だけでなく過渡応答特性も考慮する必要がある。また、この場合のフィードフォワード制御器の改善法を示した。
- (3) 厳密な線形化手法を MRAS に適用し、非線形操縦応答モデルに対する適応則を示した。また、厳密な線形化を適用した場合と線形操縦応答モデルをそのまま適用した場合との差は少なく、定常旋回特性の非線形特性に対しても十分な適応性を有していることが、シミュレーションにて確認できた。パラメータ変動は応答モデルで表現できない特性を補償していることが分かった。