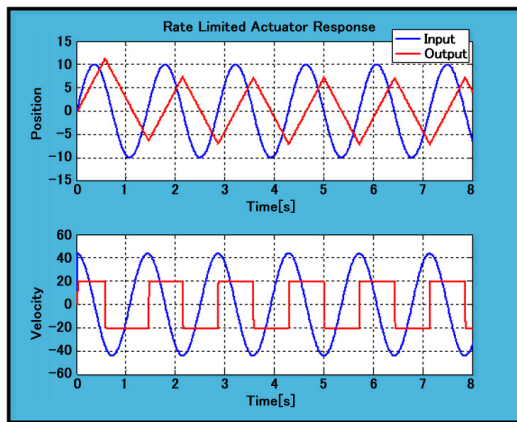


速度飽和のあるアクチュエータを有する運動系の安定化制御

Stabilization of Motion Control System with Rate Limited Actuator



安達 丈泰^{*1}
Takehiro Adachi

栗屋 伊智郎^{*2}
Ichiro Awaya

中田 昌宏^{*3}
Masahiro Nakata

市川 卓示^{*4}
Takuji Ichikawa

運動制御を行う機械製品では、応答性を上げていくとアクチュエータの動作速度が飽和し、制御システムが不安定となるため、速度飽和が発生しないように応答性を下げた設計が施されている。本稿では、アクチュエータの速度飽和を含む運動制御システムに対し、応答性向上に伴う不安定化を解決できる新しい制御手法について述べる。この手法は、アクチュエータの線形参照モデルを利用して、飽和が生じないようにアクチュエータへの指令を補正する安定化手法である。本手法を適用することで、運動制御系が安定化され、さらなる応答性の向上に寄与できることを解析とシミュレーションにより示す。

1. はじめに

機械製品の運動制御系の設計においては、システムに存在する非線形要素が系の安定性に影響を及ぼす場合があり、制御性能向上に対する障壁となっている。その中でも、アクチュエータの速度飽和は、制御系の位相特性を悪化させ、系を不安定化する要因として問題になっている⁽¹⁾。

例えば、油圧系のサーボアクチュエータを用いた運動制御では、制御応答性を上げていくと、油圧アクチュエータの流量制限によりアクチュエータの速度が飽和する。この速度飽和により、指令に対して実応答が遅れるため、位相遅れが発生し、自動制御系が不安定になることが知られている。ロケットにおいては、姿勢制御用のアクチュエータの設計において、速度飽和が制御系安定性に影響を及ぼすことが報告されている⁽²⁾。また、航空機においても、Pilot Induced Oscillation (PIO)と呼ばれる不安定現象に注意を払うことが求められている⁽³⁾⁽⁴⁾。

近年、このようなアクチュエータの速度飽和に起因する不安定現象に対して、記述関数によるリミットサイクルの発生予測法を用いて、高精度に解析する手法が開発されている。1997年にDudaは、正弦波状の入力に対して常時速度飽和が発生する場合の速度飽和の記述関数を導出し、記述関数を用いた安定解析手法を開発した⁽⁵⁾。その後、2007年に名古屋大学の山田らにより、部分的に速度飽和が発生する場合の速度飽和の記述関数が開発され、より高精度な安定解析が可能となっている⁽⁶⁾。

一方、現実的な対処法として、アクチュエータの速度飽和が発生しないようにフィードバック制御のゲインを安定限界値以下とする調整がなされている⁽²⁾⁽⁷⁾。また、最適制御理論に基づく制御

*1 ICTソリューション本部システム技術開発部

*2 ICTソリューション本部システム技術開発部課長 博士(工学)

*3 防衛宇宙ドメイン艦艇事業部潜水艦部

*4 防衛宇宙ドメイン艦艇事業部潜水艦部課長

設計により安定化する手法⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や非線形フィルタを挿入する方法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、適応制御による方法⁽¹³⁾などが提案されている。このように、アクチュエータの速度飽和を含む制御システムでは、速度制限に起因する位相遅れが発生すると、これ以上制御帯域を上げられないという課題がある。

本稿では、アクチュエータの速度飽和を含むシステムにおいて、位相特性の改善を目的に、アクチュエータの線形モデルを参照し、速度飽和による位相遅れを補償する制御手法について述べる⁽¹⁵⁾。最初に、一般的な速度飽和のあるアクチュエータを使用した運動制御モデルの安定性について解析し、制御ゲインを上げていくと不安定となることを示す。そして、提案手法を適用することで、制御ゲインを上げて系を安定化でき、さらに、運転条件の変化等で、速度飽和の値が変化しても安定に制御できることを示す。

2. 本稿で対象とする運動モデルと高速運動時の課題

2.1 運動モデル

図1に、本稿で対象とする運動モデルを示す。

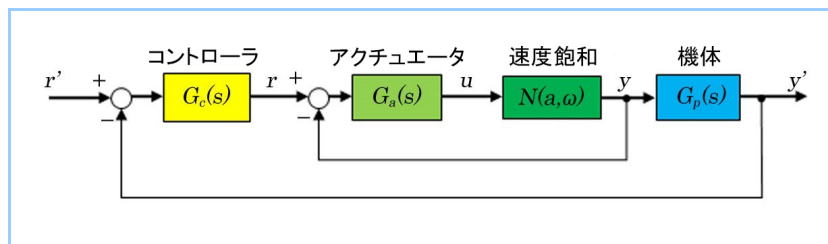


図1 速度飽和のあるアクチュエータを有する運動制御ブロック図

本稿では、速度飽和要素を含むアクチュエータとして、油圧サーボ系を取上げる。サーボ弁の応答性は油圧シリンダの応答性に比べて十分速いとして無視すると、一般的な油圧サーボ系の開ループ伝達関数 G_a は、式(1)のように表せる⁽¹⁴⁾。

$$G_a = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_a \omega_{na}^2}{s^2 + 2\zeta_a \omega_{na} s + \omega_{na}^2} \quad (1)$$

ここで、サーボゲイン $K_a = 31.4 \text{ rad/s} (= 5 \text{ Hz})$ 、油圧シリンダ系の減衰係数 $\zeta_a = 0.33$ 、油圧シリンダ系の固有角周波数 $\omega_{na} = 300 \text{ rad/s}$ とする⁽¹⁴⁾。

速度飽和要素 N は、アクチュエータの出力が油量の制限により速度制限を受ける際の速度リミッタであり、速度制限値 V_L は、 $\pm 20 \text{ deg/s}$ とする。

運動制御系のモデルは、例題として航空機の縦運動モデルとした。

運動制御系の伝達関数 G_p は、式(2)のように表せる⁽³⁾。

$$G_p = \frac{\alpha}{\delta_s} = \frac{\omega_{nsp}^2 (as + 1)}{s^2 + 2\zeta_{sp} \omega_{nsp} s + \omega_{nsp}^2} \quad (2)$$

ここで、 α : 仰角 [rad]、 δ_s : 昇降舵角 [rad]、縦運動系の固有角周波数 $\omega_{nsp} = 2.12 \text{ rad/s} (= 0.34 \text{ Hz})$ 、縦運動系の減衰率 $\zeta_{sp} = 0.489$ 、係数 $a = 0.0174$ とする⁽³⁾。

コントローラは一般的なPID制御器とし、その伝達関数 G_c は、式(3)に示す。

$$G_c = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{(T_{d1} s + 1)(T_{d2} s + 1)} \right\} \quad (3)$$

ここで、比例ゲイン $K_p = 0.3342$ 、積分時間 $T_I = 0.531 \text{ s}$ 、微分時間 $T_D = 0.531 \text{ s}$ 、1次微分帯域時定数 $T_{d1} = 0.159 \text{ s}$ 、2次微分帯域時定数 $T_{d2} = 0.00159 \text{ s}$ とする。制御仕様は、制御帯域 0.1 Hz 、ゲイン余裕 33 dB 、位相余裕 93 deg として、ゲインを設定した。

2.2 高速運動時の課題

対象とする運動制御モデルに、ステップ状の運動指令を与えたときの挙動をシミュレーションする。図2に、制御帯域0.1Hzにおいて、ステップ状の運動指令(振幅2deg)を与えた時の運動制御系の非線形シミュレーション結果を示す。ステップ入力時に一瞬アクチュエータの速度飽和が発生するが、安定に制御できていることが確認できる。

次に、制御帯域0.5Hzとなるように制御ゲインを上げた場合を考える。図3に、制御帯域0.5Hzにおいて、ステップ状の運動指令(振幅2deg)を与えた時の運動制御系の非線形シミュレーション結果を示す。運動制御系の応答性を上げると、アクチュエータの位置指令の帯域が上がり、アクチュエータ内部の速度飽和への入力振幅が増大する。その結果、アクチュエータの実位置が三角波状に振動し、運動制御系に持続的な振動が発生していることが確認できる。ここでは、アクチュエータの振幅は物理的な可動範囲を想定した角度制限 $\pm 20\text{deg}$ を設けている。

このように、速度飽和要素を含むアクチュエータを使用して、運動制御系を構築した場合、その制御帯域を上げていくと、制御系が不安定となる。

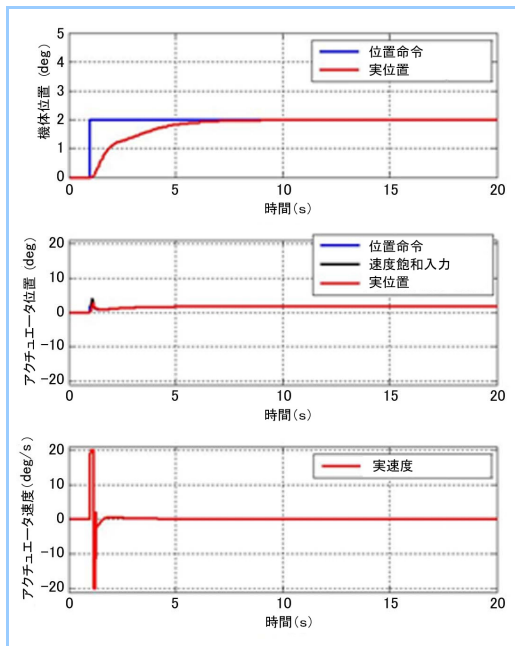


図2 制御帯域 0.1Hz 時の運動制御系のステップ応答シミュレーション

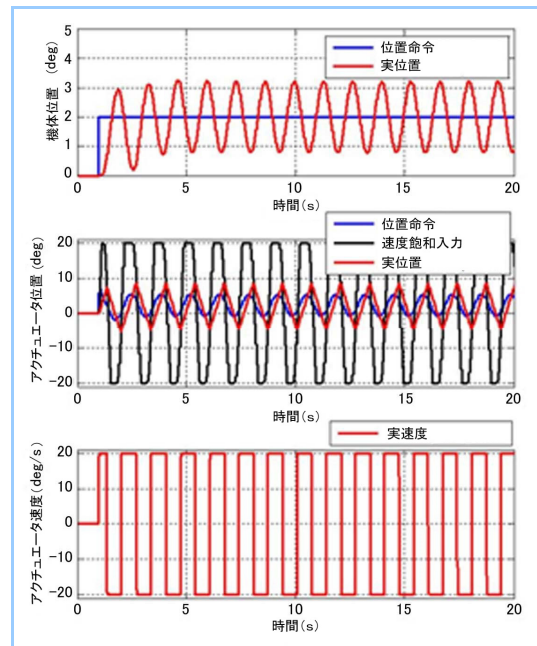


図3 制御帯域 0.5Hz 時の運動制御系のステップ応答シミュレーション

3. 速度飽和を含むシステムの安定解析法

本稿では、速度飽和を含めたシステムの安定性を評価するために、速度飽和の記述関数を用いた安定解析を行った。記述関数は、非線形要素に正弦波を入力したときに、その出力の基本波成分のみが出力される周期関数である。速度飽和の記述関数は、名古屋大学の山田らにより開発された記述関数を用いており、式(4)～(8)に示す⁽⁶⁾。

$$N(a, \omega) = \begin{cases} 1 & \langle 0 \leq \omega < \omega_{onset} \rangle \\ \sqrt{s_1^2 + c_1^2} e^{j \arctan\left(\frac{c_1}{s_1}\right)} & \langle \omega_{onset} \leq \omega < \omega_g \rangle \\ \frac{4\omega_{onset}}{\pi\omega} e^{-j \arccos\left(\frac{\pi\omega_{onset}}{2\omega}\right)} & \langle \omega_g \leq \omega \rangle \end{cases} \quad (4)$$

$$s_1 = \frac{1}{\pi\omega} \left(-(\tau_1 - \tau_2)\omega^2 + \omega_{onset}(2\sin(\omega\tau_1) + \sin(\omega\tau_2)) - \omega\sin(\omega\tau_1)\cos(\omega\tau_1) \right) \quad (5)$$

$$c_1 = -\frac{1}{\pi\omega^2}(\omega_{onset} - \omega \cos(\omega\tau_1))^2 \quad (6)$$

$$\omega_{onset} = \frac{V_L}{a} \quad (7)$$

$$\omega_g = \frac{\sqrt{\pi^2 + 4}}{2} \omega_{onset} \quad (8)$$

ω_{onset} : オンセット周波数, ω_g : 完全速度飽和周波数, V_L : 速度制限値, a : 入力振幅

3.1 アクチュエータ制御系の安定解析

速度飽和要素を含む油圧サーボアクチュエータの制御系モデルにおいて, 前述の記述関数を用いた安定解析を実施した。ここで, 部分的に速度飽和が発生する場合の速度飽和の記述関数を計算する際の, 任意の振幅 a , 周波数 ω における速度飽和の切替り時間 τ_1, τ_2 は, ニュートンラプソン法^(注1)による数値解析で解を求めた。

(注1) 方程式の解を求める際に, 反復的に数値計算を行い近似解を求める1手法。

図4に, 速度飽和要素のボード線図を示す。速度飽和への入力振幅は, 5deg, 10deg, 15deg, 20deg の特性をそれぞれ示している。入力振幅が大きくなるほどより低い周波数帯で位相遅れが発生しており, 位相遅れに振幅依存性があることがわかる。よって, 速度飽和要素は, 制御系の安定性に大きな影響を与えることが予想できる。

リミットサイクルが発生する条件は, 式(9)で表される。

$$G_a(j\omega)N(a, \omega) = -1 \quad (9)$$

安定性の判別は, 左辺の速度飽和要素を含む開ループ特性の周波数軌跡を描き, 最大振幅 a_{max} の軌跡が点 $(-1, 0)$ をどちらに見て通過するかで判別できる。

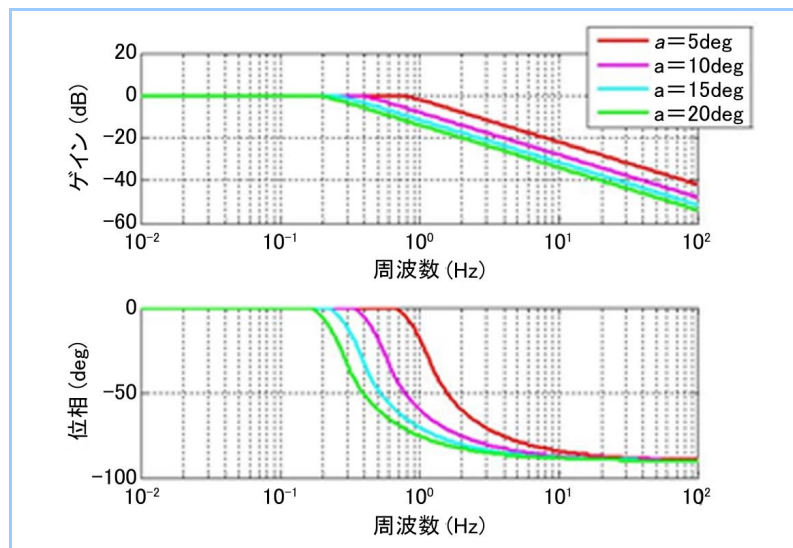


図4 速度飽和の記述関数の周波数特性

図5に, 速度飽和要素を含むアクチュエータの開ループ制御系のナイキスト線図^(注2)を示す。最大振幅条件 ($a=20\text{deg}$) において, 周波数軌跡が点 $(-1, 0)$ を左に見ながら通過するため, 速度飽和要素を持つアクチュエータ制御系は安定であることがわかる。

(注2) 周波数 ω を $0 \sim \infty$ まで変化させたとき, 伝達関数 $G(j\omega)$ が複素平面に描く軌跡を図示したもの。

ただし, 速度飽和のあるアクチュエータ制御系の外側に運動制御系のループを構成する機械製品では, アクチュエータの速度飽和による位相遅れが, 運動制御系の安定性に大きな影響を与えるため, 注意を要する。

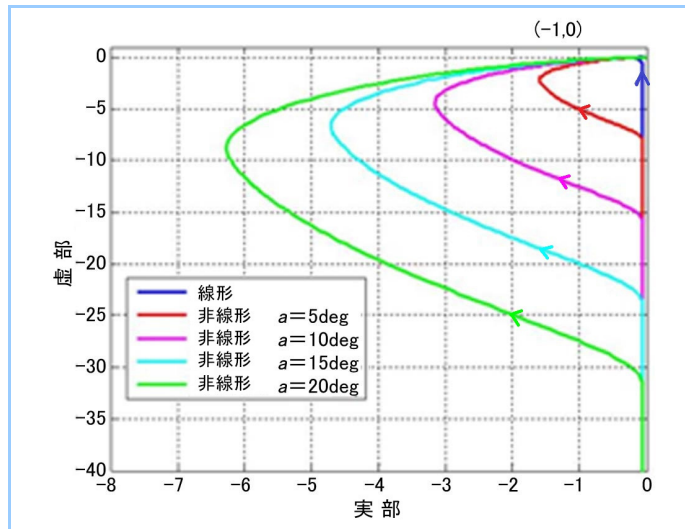


図5 アクチュエータ制御系の安定解析結果

3.2 運動制御系の安定解析

速度飽和要素を考慮した運動制御系に対し、比例ゲイン K_p を変えた時の安定性を解析する。運動制御系の閉ループ周波数特性を導出するためには、前述の速度飽和を含むアクチュエータ制御系の閉ループ特性を最初に求めておく必要がある。記述関数を利用しているため、速度飽和要素 $N(a, \omega)$ への入力 u の振幅は常に a となるようにアクチュエータ制御系の目標入力振幅を調整する必要がある。そこで、入力 r 、出力 u としたときの伝達関数は、式(10)となる。

$$\frac{u(j\omega)}{r(j\omega)} = \frac{G_a(j\omega)}{1 + G_a(j\omega)N(a, \omega)} \quad (10)$$

よって、速度飽和要素への入力振幅を a とするには、基準入力信号 $\sin \omega t$ に対し、式(11)を通して振幅を周波数毎に調整すればよい。

$$G_{ru}(a, j\omega) = \frac{1 + G_a(j\omega)N(a, \omega)}{G_a(j\omega)} \cdot a \quad (11)$$

本稿では、図6に示す通り、振幅 a を一定にした解析を行うために、式(11)の振幅調整要素を挿入したときの入出力関係を周波数応答として定義する。

しかしながら、系の安定性を解析する上では、ループ外にある調整要素 $G_{ru}(s)$ は直接影響を与えないため、本解析では、入力を r 、出力を y としてボード線図を求める。

従って、速度飽和 $N(a, \omega)$ の入力振幅が常に a となるように、アクチュエータ制御系の入力振幅 r を周波数 ω に応じて変化させた周波数特性が得られる。また、振幅 a の範囲は、アクチュエータの可動範囲によって決定されるため、その最大振幅まで変化させた周波数特性を複数描くことで、速度飽和の非線形性を考慮した周波数特性の領域を図示することができる。

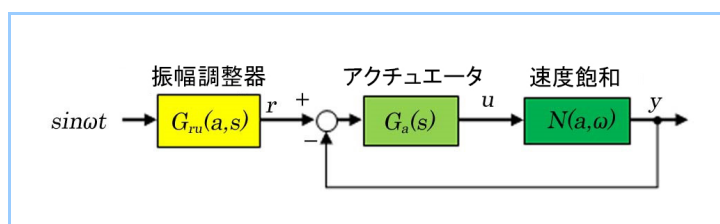


図6 速度飽和のあるアクチュエータの周波数応答の定義

図7に、制御帯域 0.1Hz ($K_p = 0.3342$) としたときの開ループ運動制御系のナイキスト線図を示す。この結果より、アクチュエータの指令振幅が最大 ($a = 20\text{deg}$) の条件で、周波数軌跡が点 $(-1, 0)$ を左に見ながら通過するため、安定であることがわかる。

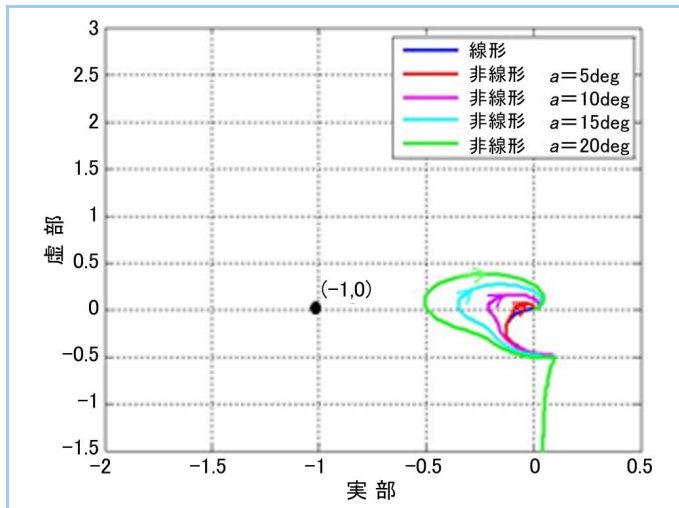


図7 制御帯域 0.1Hz 時の運動制御系の安定解析結果

次に、図8に、制御帯域を 0.5Hz ($K_p=0.9952$) に上げた場合の開ループ運動制御系のナイキスト線図を示す。制御応答性を上げて、線形では安定余裕があるが、アクチュエータの指令振幅が 15deg 以上になると、速度飽和が生じて、周波数軌跡が点 $(-1, 0)$ を右に見ながら通過するため、制御系が不安定となることを示している。

この結果は、2.2 項の非線形シミュレーション結果と一致しており、速度飽和の記述関数を用いた安定解析法の有効性が確認できる。

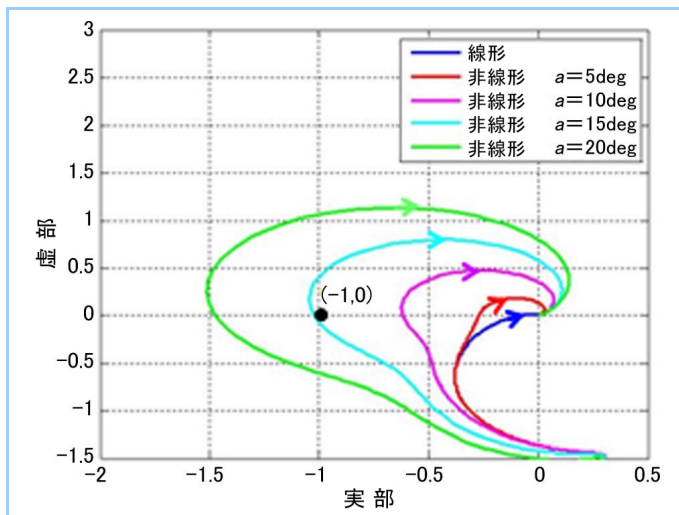


図8 制御帯域 0.5Hz 時の運動制御系の安定解析結果

4. 線形参照モデルを用いた速度飽和時の補償法

4.1 速度飽和補償器の構成

アクチュエータの速度飽和要素を含む運動制御系において、制御帯域を上げてでも安定に制御できる補償法について述べる⁽¹⁵⁾。

図9に、速度飽和時に安定化する補償器を適用した運動制御ブロック図を示す。 G_{ae} は、式(12)に示す通り、速度飽和要素を含まない線形アクチュエータモデルの伝達関数である。この線形アクチュエータモデルに実際のアクチュエータと同じ指令を入力し、速度飽和要素を含むアクチュエータの実動作値と比較して速度飽和の差分量を求める。この差分量は、速度飽和によりアクチュエータが動作できない量を意味するため、これをアクチュエータの指令にフィードバックすることで、実際に動作可能な指令値に補正され、その結果として、位相遅れが改善される。この補償法によれば、アクチュエータの速度飽和が発生しない場合でも、差分量が0となるため、系の安

定性に影響を及ぼすことは無い。また、運転条件の変化などで負荷配分が変わることにより、速度飽和の値が変動することがある。その場合でも、線形参照モデルとの比較で速度飽和による応答誤差をフィードバックするため速度飽和量の変動にも対応できる特長も有している。

$$G_{ae} = G_a = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_a \omega_{na}^2}{s^2 + 2\zeta_a \omega_{na} s + \omega_{na}^2} \quad (12)$$

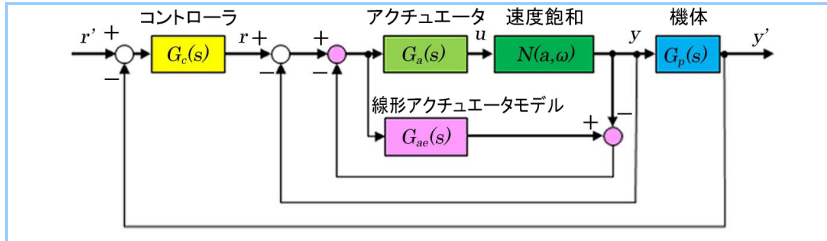


図9 速度飽和の補償器を適用した運動制御ブロック図

4.2 速度飽和補償器適用時の安定解析

図10に、速度飽和補償器を追加したときの開ループ運動制御系のナイキスト線図を示す。アクチュエータの指令振幅が最大の条件 (\$a=20\text{deg}\$) においても、安定であることがわかる。

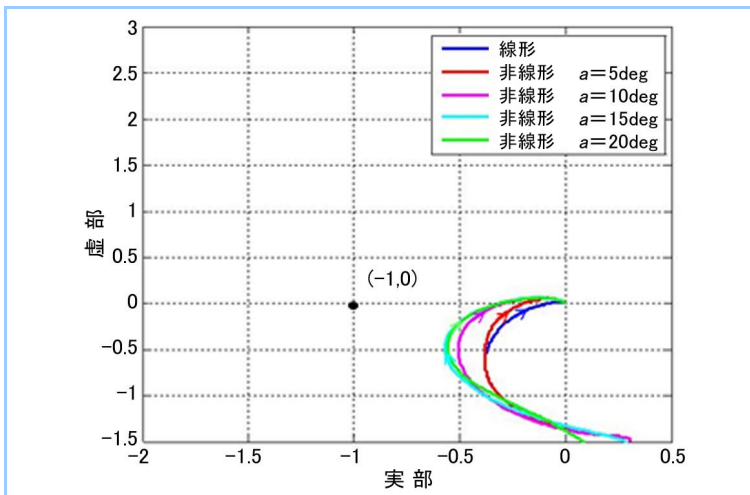


図10 速度飽和補償器を適用した場合の安定解析結果

図11に、閉ループ運動制御系のボード線図を示す。運動制御系の制御帯域は、0.5Hz となるように設計した。

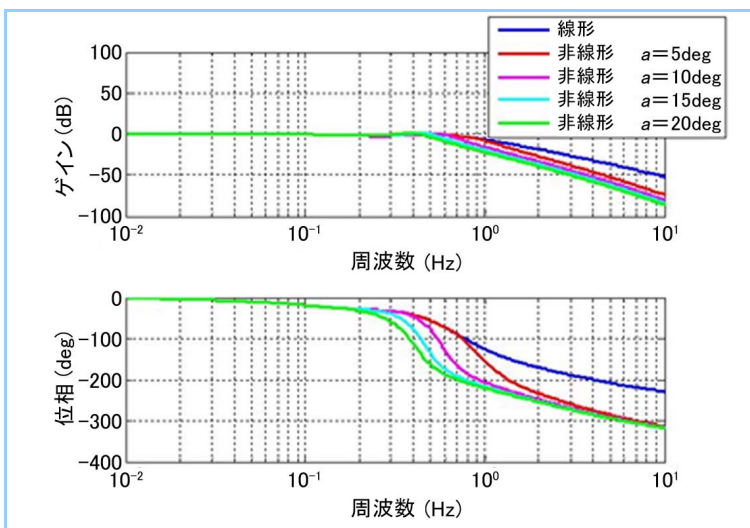


図11 速度飽和補償器を適用した場合の運動制御系の周波数特性

4.3 速度飽和補償器適用時の非線形シミュレーション

図 12 に、制御帯域 0.5Hz で設計した運動制御系で、ステップ状の運動指令 (振幅2deg) を与えた時の運動制御系の応答をシミュレーションした結果を示す。ステップ状の運動指令に対して、初期に発生するアクチュエータ制御系の速度飽和がすぐに解消され、運動制御系は安定化されていることが確認できる。

この速度飽和補償器により、フィードバック制御系の帯域を 0.1Hz から 0.5Hz に上げても、アクチュエータの速度飽和が発生する全ての条件で安定に制御できることがわかる。この線形参照モデルを用いた速度飽和の補償法により、速度飽和を考慮した上で、アクチュエータの能力を最大限に利用し、機体の運動を安定に制御できる。

4.4 速度飽和のパラメータが変化した場合の制御安定性

次に、速度飽和の速度制限値 V_L を $\pm 10 \text{deg/sec}$ に変更した時の結果を示す。図 13 に、運動制御系のステップ応答シミュレーション結果を示す。この結果から、速度飽和の上限値が運転条件の変更等で変化しても、安定に制御できることがわかる。

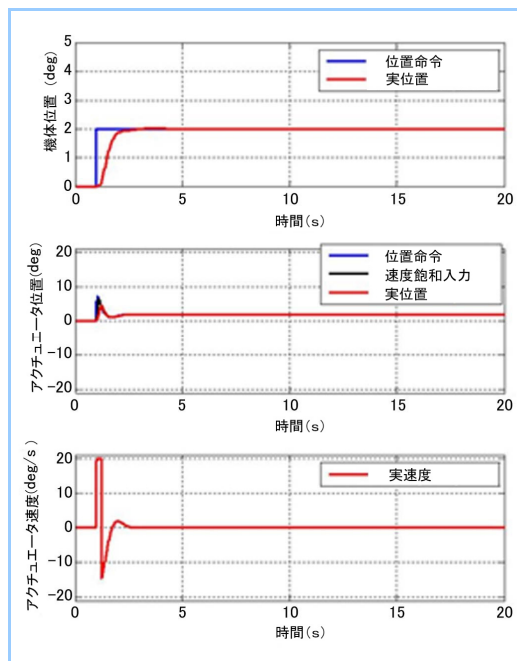


図 12 速度飽和補償器を適用した場合のステップ応答シミュレーション

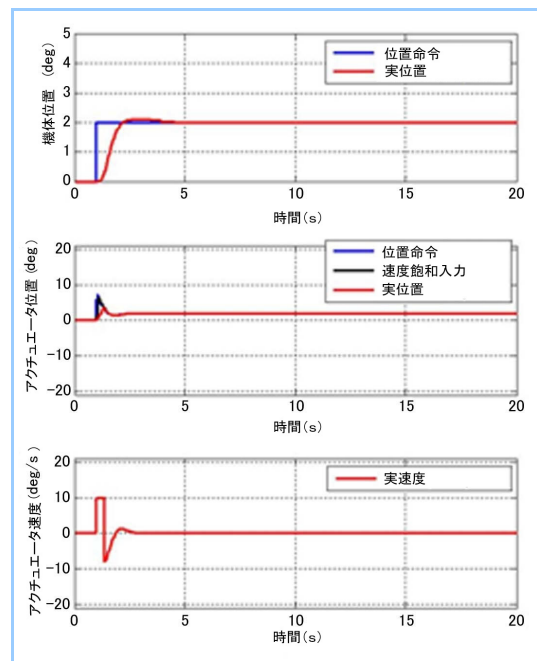


図 13 速度飽和パラメータが変化したときのステップ応答シミュレーション

5. まとめ

本稿では、速度飽和要素を含むアクチュエータ制御系を用いたときに、制御応答性を上げた時に速度飽和により不安定となることを最新の速度飽和の記述関数を用いた安定解析手法と非線形シミュレーションで証明した。次に、アクチュエータの速度飽和が発生した場合に安定化できる線形参照モデルを用いた速度飽和の補償法について述べた。記述関数法による安定解析と非線形シミュレーションによる比較により、この速度飽和補償器が制御応答性を上げても、アクチュエータの速度飽和が発生する条件で安定化できることを明らかにした。

本研究成果は、速度飽和のあるサーボアクチュエータを使用する当社の機械製品 (水中航走体、航空機、ロケットなど) の安定化と制御性能の向上に貢献できるものと考えられる。今後、当社製品への適用に向けた検討を進めていく。

参考文献

- (1) Berg, J. M. et al., An analysis of the destabilizing effect of daisy chained rate-limited actuators, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 2 (1996), pp. 171-176.
- (2) 安田誠一ほか, M-V ロケットの推力方向制御 (TVC), 宇宙航空研究開発機構特別資料 M-V 型ロケット: 5号機から8号機まで (2008).
- (3) 加藤寛一郎ほか, 航空機力学入門, 東京大学出版会 (1982).
- (4) Katayanagi, R., Pilot-induced oscillation analysis with actuator rate limiting and feedback control loop, Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 44, No. 143 (2001), pp. 46-51.
- (5) Duda, H., Prediction of pilot-in-the-loop oscillations due to rate saturation, Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 20, No. 3 (1997), pp. 581-587.
- (6) 山田克彦ほか, 速度飽和要素に起因する PIO の解析, 日本機械学会論文集C編, Vol. 73, No. 728 (2007), pp. 103-110.
- (7) Ackermann, J. et al., Actuator rate limits in robust car steering control, Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control (1997).
- (8) Yuasa, Y. et al., Optimal control designs for systems with input saturations and rate limiters, SICE Annual Conference (2010).
- (9) Lin, Z. et al., State and output feedback design for robust tracking of linear systems with rate limited actuators, Optimal Control Applications & Methods, Vol. 23, No. 1 (2002), pp. 21-43.
- (10) Shewchun, J. M. et al., High performance control with position and rate limited actuators, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 9, No. 10 (1999), pp. 617-630.
- (11) Liebst, B. S. et al., Nonlinear prefilter to prevent pilot-induced oscillations due to actuator rate limiting, Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 25, No. 4 (2002), pp. 740-747.
- (12) Tzeng, C. Y. et al., Feedback linearization design of a ship steering autopilot with saturating and slew rate limiting actuator, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 13, No. 1 (1999), pp. 23-30.
- (13) Tzeng, C. Y. et al., Adaptive ship steering autopilot design with saturating and slew rate limiting actuator, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 14, No. 4 (2000), pp. 411-426.
- (14) 小波倭文朗ほか, 油圧制御システム, 東京電機大学出版局 (1999).
- (15) 安達丈泰ほか, 線形参照モデルを用いた速度飽和を含むシステムの安定化, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 829 (2015).