

# 力センサーレスパワーアシスト制御のロバスト性及び性能解析

呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

On Robustness and Performance of Force Sensorless Power Assist Control

Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

近頃福祉機器や医療関係で注目を浴びている、外乱オブザーバを応用した力センサーレスパワーアシスト制御器を分析、一般化構造を提案する。モデルを利用した力観測であるためロバスト性が弱いと思われる力センサーレスパワーアシスト制御を、提案する一般化構造を利用してそのロバスト性と制御性能を解析する。その結果から、各制御パラメータの作用を明らかにし、力センサーレスパワーアシスト制御器の可能性と設計方針を明らかにする。

キーワード：力センサーレスパワーアシスト制御、外乱オブザーバ、ロバスト性、制御性能、パワーアシスト制御器設計  
Keywords: force sensorless power assist control, disturbance observer, robustness, control performance, power assist control design

## 1. 序 論

現代の制御理論の応用部門の中で、力センサーレスパワーアシスト制御 (Force Sensorless Power Assist Control、以下 FSPAC) が注目を集めている。特に福祉と医療関係領域への応用がメインになって様々な研究が進められている<sup>(1) (2) (3)</sup>。

この FSPAC の多くは、従来産業用制御でロバスト制御として使われてきた外乱オブザーバを力推定機構として採用しており<sup>(4)</sup>、力センサーを持たなくても外力の大きさをすばやく推定できるようにしている。

しかしこの外乱オブザーバを利用した外力推定はプラントの物理モデルを利用しており、その物理モデルが実際のプラントと違っている場合に、システムの安定性や所望のアシスト性能が得られるかどうかということに関する議論が必要である。これにもかかわらずこれに関する研究は少なく、よって各パラメータが制御性能や安定性にどのように影響するかという点も確かめられていない<sup>(5) (6)</sup>。

そこで、本研究では既存の FSPAC 研究に用いられている制御器を分析し統一的な観点から扱えるように、FSPAC 一般化構造を提案する。この一般化構造によって制御器のロバスト安定性や制御性能の解析ができるようになる。

そして、速度制御系システムに対する FSPAC 制御器を設計、提案する一般化構造の解析により各パラメータの働きを解析、そこから得られる一種の洞察力からパラメータの選定ができるようにした。

## 2. 力センサーレスパワーアシスト制御の一般的な構造による解析

2.1 FSPAC の一般的な構造提案 図 1 に速度制御系システムをプラントとしたときの FSPAC を示した。この構造から FSPAC の一般的な構造を考えることができる。

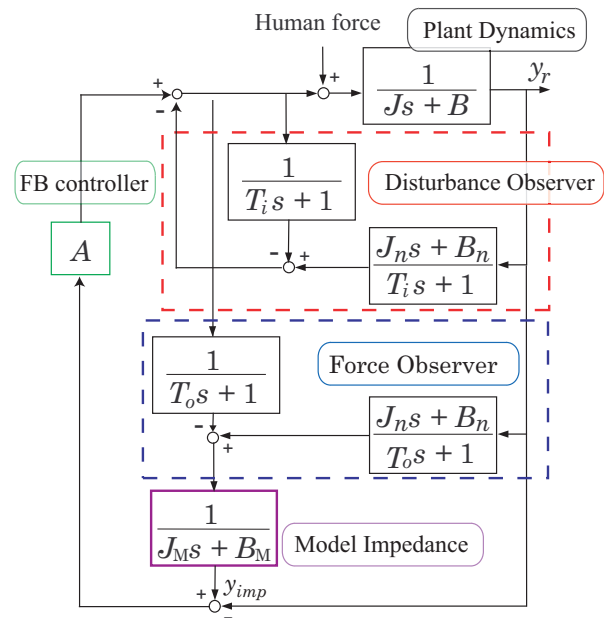


図 1 力センサーレスパワーアシスト制御器の基本構造

まずは制御器のもっとも内側に推定外乱をフィードバックする外乱オブザーバがある。これはシステムのノミナル化のためである。その外側にアシストする外力を推定するためさらに外乱オブザーバをもうひとつ設計する。これを内側の外乱オブザーバと区別するため外力オブザーバと呼ぶことにする。

この外力オブザーバから推定された力がアシストされるので、そのアシストする量を決めるためにインピーダンスのモデルが必要となる。ここではモデルインピーダンスとそれを呼び、外力オブザーバから推定した力をこのモデルインピーダンスに入力して参考出力信号 ( $y_{imp}$ ) を作る。

最後に、モデルインピーダンスを利用して得られた参考出力値に追従させるためにフィードバック制御をかけている。これをフィードバック制御器と呼ぶことにする。

これらの基本構造に基づき、図2のような一般化構造を提案する。

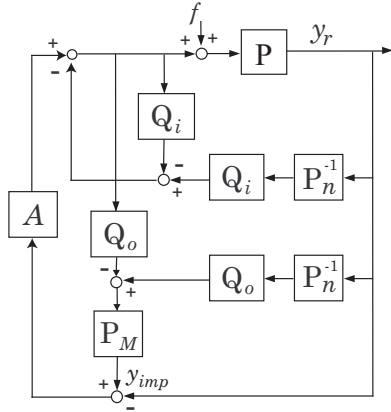


図2 FSPACの一般化構造

FSPACに必要な各ブロックを、プラント \$P\$、外乱オブザーバに必要な逆モデル \$P\_n^{-1}\$ とローパスフィルタ \$Q\_i\$、カオプザーバに必要な逆モデル \$P\_n^{-1}\$ とローパスフィルタ \$Q\_o\$、モデルインピーダンス \$P\_M\$、フィードバック制御器 \$A\$、として記述する。

この一般化構造の記述法を利用すると図3と4のような構成でFSPACを再構築することができ、その特徴を分析できるようになる。

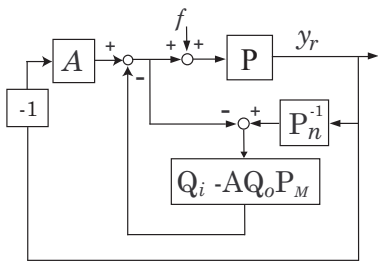


図3 外乱オブザーバの構造で見たFSPAC

図3の、外乱オブザーバの構造に合わせた記述を行うと、従来の外乱オブザーバではローパスフィルタで構成されていた \$Q\$ フィルタをFSPACでは \$Q\_i - A Q\_o P\_M\$ にしていることがわかる。

また図4の構成にすると古典的なフィードバック制御器の解析ができるようになる。本研究では図4の構成を用いて、FSPACのロバスト安定性とアシスト制御性能を解析することにする。

2.2 一般構造提案の既約分解表現を利用したSF-PACの特徴解析 ここでは図2の各ブロックを最も簡単な既約分解表現で表すことにし、FSPACの特徴を解析

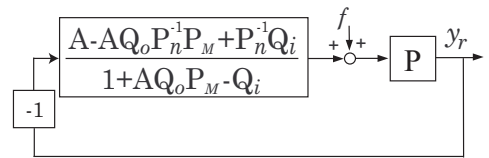


図4 フィードバック制御器の構造で見たFSPAC

する。各ブロックを

$$P_{\{n,M\}} = \frac{1}{D_{\{n,M\}}}, P = \frac{1}{D},$$

$$Q_{\{i,o\}} = \frac{1}{D_{\{i,o\}}}, A = \frac{N_{FB}}{D_{FB}} \dots \dots \dots (1)$$

とおくと、一巡伝達関数は

$$T_O = \frac{N_{FB} D_M D_i D_o - N_{FB} D_n D_i + D_n D_o D_M D_{FB}}{D(D_{FB} D_M D_i D_o + N_{FB} D_i - D_M D_o D_{FB})} \dots (2)$$

となり、\$f\$ から \$y\_r\$ までの閉ループ伝達関数は

$$T_C = \frac{N_{cl}}{D_{cl}} \dots \dots \dots (3)$$

$$N_{cl} = D_{FB} D_M D_i D_o + N_{FB} D_i - D_M D_o D_{FB} \dots \dots \dots (4)$$

$$D_{cl} = D(D_{FB} D_M D_i D_o + N_{FB} D_i - D_M D_o D_{FB}) + N_{FB} D_M D_i D_o - N_{FB} D_n D_i + D_n D_o D_M D_{FB} \cdot (5)$$

と求まる。

特に式(3)の閉ループ伝達関数を見ると、分母多項式で \$D\$ にかける式が分子多項式になっていることがわかる。従来の外乱とモデル誤差を抑制するための外乱オブザーバ (\$N\_{FB} = 0\$ の場合) では、この分母多項式にかける式が \$(D\_i - 1)\$ となり、\$D\_i \approx 1\$ とすると閉ループ伝達関数の特性多項式から \$D\$ の特性が消えるロバスト特性が得られる<sup>(7)</sup>。さらに \$f\$ から \$y\_r\$ までの伝達特性も分子多項式が0になることで \$f\$ がシステム出力に影響を与えないようになる。

しかし、外力 \$f\$ をアシストするFSPACでは \$f\$ から \$y\_r\$ までの伝達特性を0にすることはできなく、そのため \$D\$ の影響を消すことができない。従来の外乱抑制用外乱オブザーバと違うアプローチでロバスト性の問題を正確に考えなければならない。そこで、式(3)の分母多項式を変形し

$$D_{cl} = (D D_{FB} + N_{FB}) D_M D_i D_o + (D - D_n)(N_{FB} D_i - D_M D_o D_{FB}) \dots \dots \dots (6)$$

とすると、モデル誤差 \$(D - D\_n)\$ に対し \$(N\_{FB} D\_i - D\_M D\_o D\_{FB})\$ が影響を与えていることがわかる。ここに注目するとFS-PACをよりロバストに設計することが可能となる。

しかし、ロバストかを図るため \$N\_{FB} D\_i - D\_M D\_o D\_{FB}\$ を0にする \$\frac{N\_{FB}}{D\_{FB}}\$ を選ぶと閉ループ伝達関数 \$T\_C\$ が \$\frac{1}{D + \frac{D\_o}{D\_i} D\_M}\$ となってしまふ。この \$T\_C\$ では \$\frac{1}{D}\$ の特性がそのまま残ってしまい、イナーシャやダンピングを減らすパワーアシスト

の性能を作ることができない。すなわち、FSPAC でも制御性能とロバスト性にはトレードオフ関係が存在するのである。

このトレードオフ特性に注目して、どのような設計を行えばよいのかという点は今後の課題であるが、式 (3) から (6) までの記述はその設計に用いられる重要な表現といえる。

2・3 違う構造を持つ FSPAC の既約分解表現における特徴 図 3 の構造以外の構造をもつ FSPAC も考えられるのでそれらをここで紹介する。図 5 と図 6 である。本稿ではこれらの伝達関数特性における特徴を紹介する。

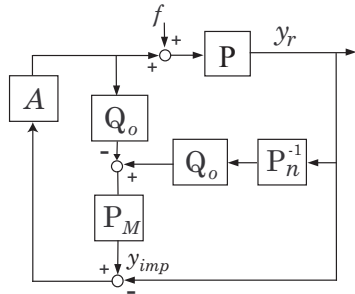


図 5 内部外乱オブザーバを持たない FSPAC

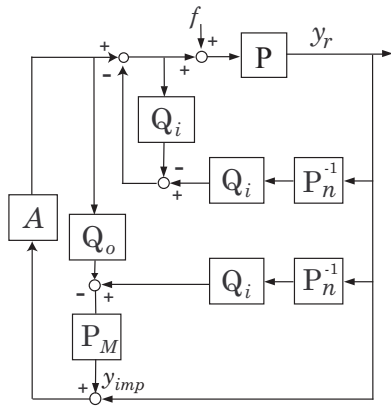


図 6 カオブザーバの入力位置を変更した FSPAC

図 5 の閉ループ伝達関数は

$$T_{C2} = \frac{D_{FB}D_M D_o + N_{FB}}{(DD_{FB} + N_{FB})D_M D_o + (D - D_n)N_{FB}}, \dots (7)$$

図 6 の閉ループ伝達関数は

$$T_{C3} = \frac{N_{cl3}}{D_{cl3}} \dots (8)$$

$$N_{cl3} = D_{FB}D_M D_i D_o + N_{FB}D_i - D_M D_o D_{FB} - N_{FB} \cdot (9)$$

$$D_{cl3} = (DD_{FB} + N_{FB})D_M D_i D_o + (D - D_n)(N_{FB}D_i - D_M D_o D_{FB} - N_{FB}) \cdot (10)$$

となる。

式 (3) から式 (10) のどれにも FSPAC には共通して分母に  $(DD_{FB} + N_{FB})D_M D_i D_o$  項が入っている。しかしロバスト特性にかかわる  $(D - D_n)$  にかかわる項がそれぞれ違っている。また分子多項式は 3 つすべてが違うが、特に図 2 と図 6 では最後に  $-N_{FB}$  が入る違いであり、分母方程式と同じような形式の変化である。すなわち、図 6 の構造の FSPAC では  $N_{FB}$  の設計が重要となってくるのである。

これらの違いがより明確にするためのシステマティックな設計の方法が今後の課題といえる。

### 3. FSPAC のパラメータによるロバスト安定性、制御性能解析

本節では FSPAC の基本構造 (図 1) を利用して、その制御器の各パラメータの影響を調べる。ただし、伝達関数を解析したパラメータ影響解析ではなく、MATLAB を利用した数値計算による解析である。

解析する制御器の特性はロバスト安定性とアシスト制御性能である。ゲイン余裕と位相余裕を利用してロバスト安定特性を論じ<sup>(8)</sup>、モデルインピーダンスの周波数特性と実際得られた閉ループ周波数特性の差をもってアシスト制御性能を論じる。

注目する FSPAC のパラメータは

- (1)  $Q_o, Q_i$  の時定数
- (2) フィードバックゲイン  $A$
- (3) ノミナルモデルのパラメータ  $J_n, B_n$
- (4) モデルインピーダンスのパラメータ  $J_M, B_M$

である。これらのパラメータを変化させながらロバスト安定性と制御性能がどう変化するのが確かめることにする。

3・1 ロバスト安定性の解析 図 4 の構造から一巡伝達関数を求めることができ、それを利用して FSPAC のゲイン余裕と位相余裕を求めることができる。それをもってロバスト安定性を確かめることにする。式 (11) が利用した一巡伝達関数である。

$$\frac{A - AP_M P_n^{-1} Q_o + P_n^{-1} Q_i}{1 + A Q_o P_M - Q_i} P \dots (11)$$

まず  $T_i$  と  $T_o$  を変化させた時のゲイン余裕と位相余裕を図 7 と 8 に示した。ただし、 $J = J_n = 10, B = B_n = 1$  とし、フィードバックゲイン  $A$  は 1 に設定した。

計算と図示の都合上ゲイン余裕が無限大になったとき 60dB として表現するようにした。また無限大の位相余裕も 180deg として表記した。これらの結果から、二つの時定数を同じ大きさに設定した方がゲイン余裕が大きいことがわかる。さらに、位相余裕に関してはカオブザーバの時定数より内部外乱オブザーバの時定数がより大きい影響を持っていることがわかる。次はアシスト効果をより大きくするため、より小さい  $J_M, B_M$  をもつモデルインピーダンスにして計算を行った。その結果が図 9 である。

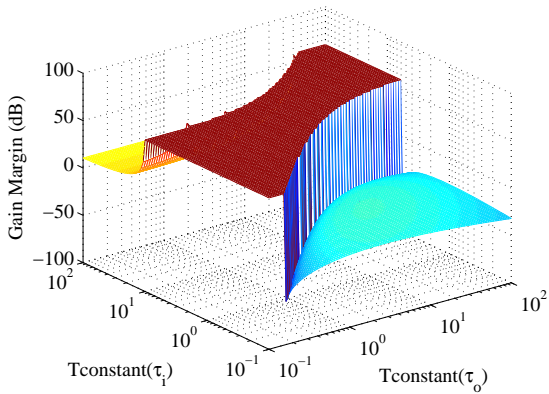


図7 時定数の変化によるゲイン余裕の変化  
( $J_m = \frac{J_n}{2}, B_m = \frac{B_n}{2}$  の時)

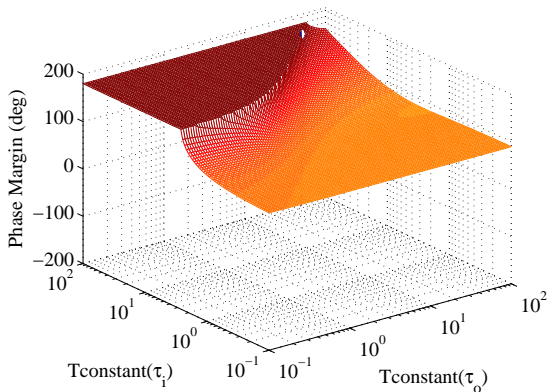


図8 時定数の変化による位相余裕の変化  
( $J_m = \frac{J_n}{2}, B_m = \frac{B_n}{2}$  の時)

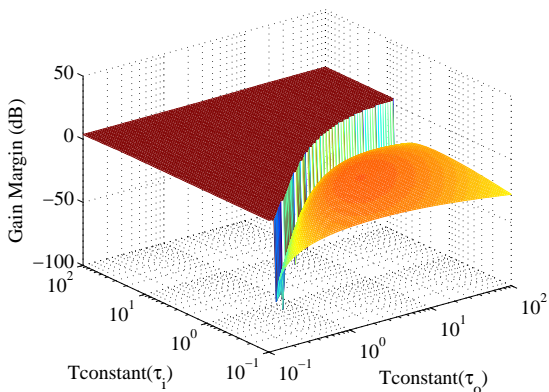


図9 時定数の変化によるゲイン余裕の変化  
( $J_m = \frac{J_n}{5}, B_m = \frac{B_n}{5}$  の時)

この結果から、アシスト効果をあげるためより小さいイナーシャやダンピングを持つパラメータとして  $J_m, B_m$  を設定するとゲイン余裕が小さくなり、ロバスト性が弱くなることがわかる。これは式(2)の一巡伝達関数を確かめる

ことができる。その一巡伝達関数の DC ゲインが

$$\frac{B_n B_M + A(B_M - B_n)}{BA} \dots\dots\dots (12)$$

となるが、アシストのためには  $B_M < B_n$  に設定する必要があり、フィードバックゲイン  $A$  の大きさなどによってこの項が負になりうる。すると全体の安定性が弱くなり、位相・ゲイン両余裕が急激に減ってロバスト安定性も急に悪くなる。これが  $J_m = \frac{J_n}{5}, B_m = \frac{B_n}{5}$  時のゲイン余裕が図7に比べ減ったしまった理由となる。

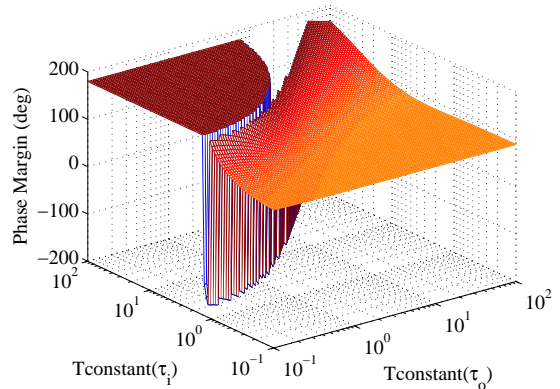


図10 時定数の変化による位相余裕の変化  
( $J_m = \frac{J_n}{5}, B_m = \frac{B_n}{5}$  の時)

図10はその時の位相余裕の変化を表している。位相余裕は  $J_m, B_m$  が小さくなるにつれ増えている。

図7と図9の結果から、 $T_i = T_o$  と選ぶとより大きいゲインを確保できることがわかる。そこで  $T_i = T_o = \tau_{dob}$  とおき、共通の時定数  $\tau_{dob}$  とフィードバックゲイン  $A$  を変えながら位相・ゲイン余裕を確かめた。図11にその結果を示す。

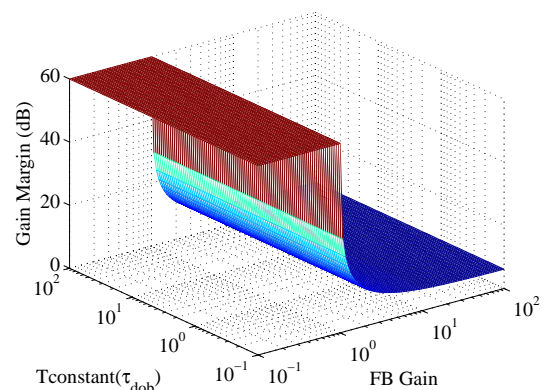


図11 FBゲインと時定数によるゲイン余裕の変化

図11から一定値以上のゲインはゲイン余裕を急に減らすことがわかる。これも式(12)の値が0上から0以下に

なることによって生じる現象である。ゲインが大きくなると負になりやすく、ロバスト安定性が悪くなる。

図 12 は  $\tau_{dob}$  や  $A$  を 1 に固定し、 $J_M$  と  $B_M$  を動かしたときのゲイン余裕である。 $B_M$  の大きさが大きい影響を与えていることがわかる。

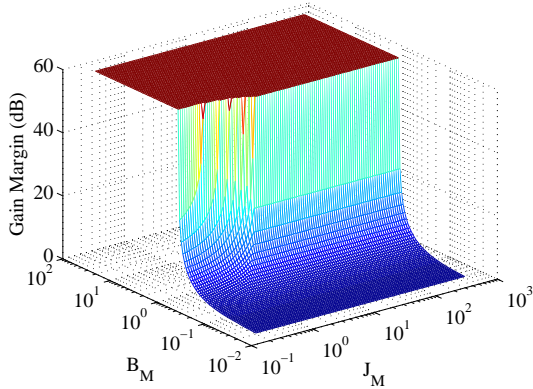


図 12 規範モデルの変化によるゲイン余裕の変化

最後に  $J_n, B_n$  の変化によるロバスト安定性を調べる。設計ではできるだけ  $J, B$  の真値に近い値を選ぶようにしているが、その真値を実際にわかることはなく推定値を設計に利用している。また低周波の摩擦の影響など真値が運転途中に変わることもありうるので、 $J_n, B_n$  を  $J, B$  の真値と比べどの程度の値に設定するべきかに対する方針が必要になっていく。そこで、 $J = 10, B = 1$  として、 $J_n$  と  $B_n$  をその  $\frac{1}{50}$  倍から 50 倍まで変化させながらゲイン余裕を計算した。図 13 にその結果を示す。

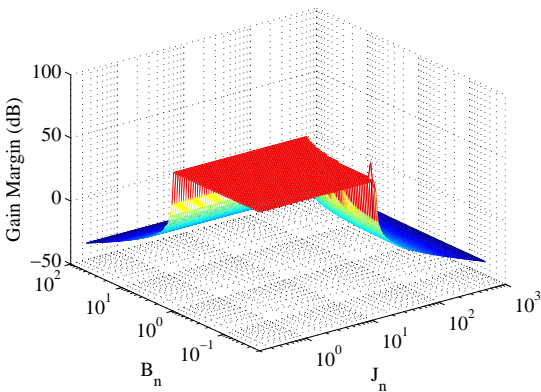


図 13 ノミナルモデル変化によるゲイン余裕の変化

$J_n, B_n$  がある境界より小さい領域では無限大のゲイン余裕を見せている。だが、それより大きくなったとたん余裕は急に小さくなりすぐ不安定領域まで入ってしまった。傾向的に小さい  $J_n, B_n$  の方がより安定性が高いことがわかる。さらに、この無限大ゲイン余裕から外れてくる境界は

式 (12) が負になる時点で、式 (12) が FSPAC の安定化の重要な設計指標になるのを改めて示している。式 (12) の正負に関しては、プラントの特性  $B$  と関係なく制御パラメータだけで決めることができるので、制御器設計時に必ず正しく確認できる指標である。 $J_n$  に関してはより複雑な解析が必要になる。

以上の結果から、ロバスト安定性を確保するためには二つの時定数  $\tau_i, \tau_o$  は同じ値に、またフィードバックゲイン、 $B_M, B_n$  に関しては式 (12) に注意しながら設計を行えばよいことがわかった。

3.2 制御性能の解析 アシスト制御の性能に関する解析を行うため、制御性能の定義が必要となる。本稿では所望のモデルインピーダンスの周波数特性と実際の FSPAC で得られた周波数特性の差を、数値計算により全周波数領域で見ることにして性能解析を行う。いくつかの制御パラメータを変えながら、周波数特性の差を全周波数領域で確かめることで、各パラメータの制御性能への寄与度を見ることにする。

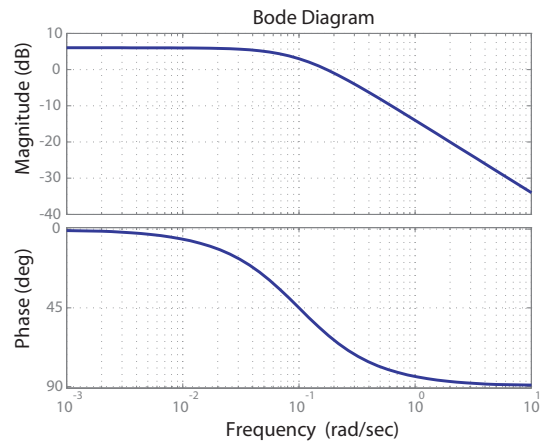


図 14 モデルインピーダンス特性 ( $\frac{1}{5s+0.5}$ )

図 14 をモデルインピーダンスとする FSPAC を設計、まずフィードバックゲインを変えながら得られたシステムの周波数特性とモデルとの比較を行なった結果が図 15 である。

ゲインが高くなるほど低周波部の追従特性が良くなることがわかる。しかし、モデルインピーダンスには存在しない  $1\text{rad/sec}$  の周波数付近での強い反共振特性が現れている。これはフィードバック制御を P 制御だけでなく、PD 制御にすることで解決することができる。本稿で例題にしている図 1 の問題に対して、式 (4) の分子多項式を計算してみると

$$N_{cl}(s) = J_M \tau_{dob} s^2 + B_M \tau_{dob} s + N_{FB} \dots \dots (13)$$

となり、 $N_{FB}$  が P ゲインだけだと  $J_M > B_M$  で反共振が起こることがわかる。そこで D 制御も行うようにし、そのゲインを変えてみながら制御性能特性を計算した結果が図

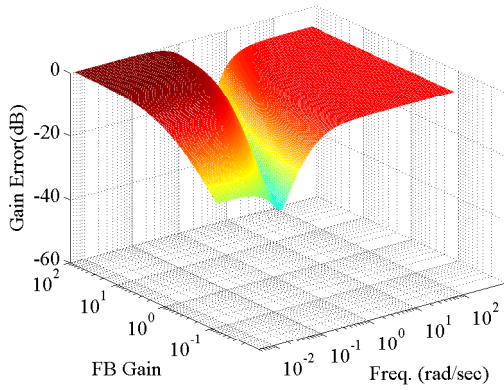


図 15 FB ゲインによるゲイン特性誤差

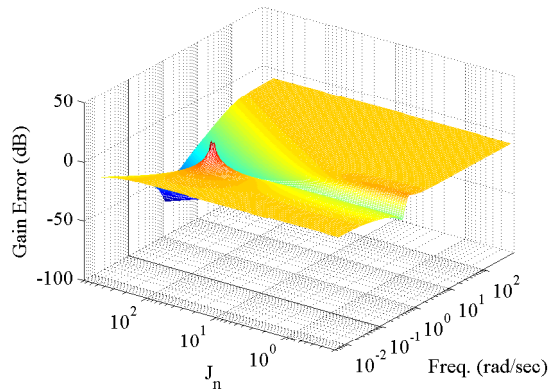


図 17  $J_n$  によるゲイン特性誤差

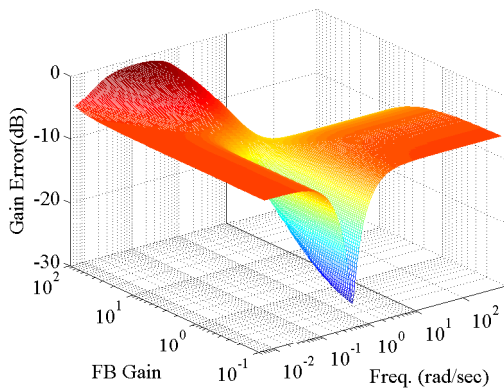


図 16 D ゲインによるゲイン特性誤差

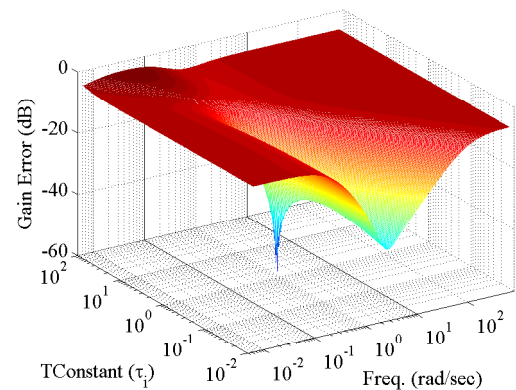


図 18  $\tau_i$  によるゲイン特性誤差

16 である。適切な D ゲインによって反共振特性がなくなっていることがわかる。

他の制御パラメータの値を変えながら制御性の特性を計算してみた結果、 $J_n, B_n, \tau_o$  はその値がある程度より小さくなると、 $\tau_i$  はある領域から大きくなるとそれぞれ周波数特性上の追従特性が一定に良くなることがわかった。特に  $\tau_i$  に関しては、式 (13) の高次項に関わっていてそれが大きくなると反共振特性が小さくなることから、図 18 のような特性を見せていた。

#### 4. 結 論

本研究では人間親和方モーションコントロールの重要な技術である力センサーレスパワーアシスト制御設計を、1) ロバスト安定性、2) アシスト制御性能の面から分析した。FSPAC をいくつかのブロックに分けて整理し、既約分解表現も利用することで、制御理論の様々な解析ができる土台を提供している。この土台にたったよりシステムティックな設計法の提案が今後の課題である。

#### 文 献

- (1) S. Oh, Y. Hori, "Sensor free power assisting control based on velocity control and disturbance observer", in *Proc. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June, 2005. vol.4, pp. 1709- 1714
- (2) S. Katsura, K. Ohnishi, "Human Cooperative Wheelchair for Haptic Interaction Based on Dual Compliance Control", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 221-228, Feb. 2004.
- (3) 原 進、山田 陽滋、「サーボ自動搬送から力覚センサーレスインピーダンス制御による手動位置決め切り替わる制御手法」、平成 19 年電気学会産業計測制御研究会、IIC-07-73、2007.
- (4) 堀 洋一、「負荷トルクオブザーバを用いた慣性シミュレータの設計」、昭和 62 年電気学会産業応用部門全国大会、pp. 91-94, 1987.
- (5) T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi, "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, Apr. 1993.
- (6) S. Kodama, K. Nomura, M. Ishida, T. Hori, "Robust Force Control Based on Compensation for Parameter Variations of Dynamic Environment", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 89-95, Feb. 1993.
- (7) T. Umeno, Y. Hori, "Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degrees-of-Freedom Controller Design", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 363-368, Oct. 1991.
- (8) W.K. Ho, O.P. Gan, E.B. Tay, E.L. Ang, "Performance and Gain and Phase Margins of Well-Know PID Tuning Formulas", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 473-477, Jul. 1996.