

位置サーボ系における電流フィードバックループ欠損時の 等価伝達関数を用いたリライアブル制御

石川 薫* 中村 太郎* 大隅 久*

A reliable control method is proposed for multiple loop control system. If a feedback loop fails, such as case of the sensor break down, the control system becomes unstable and has a big fluctuation. To cope with this problem, the proposed method uses an equivalent transfer function (ETF) as an active redundancy compensation after the loop failure. The ETF is designed so that it does not change the transfer function of the whole system before and after the loop failure. In this paper, the characteristic of reliable control system that uses ETF is examined by the experiment that uses the DC servo motor for the current feedback loop failure in the position servo system.

Keywords : Multiple loop control system, Equivalent transfer function, DC servo motor

1. 緒言

精度の高さが求められる制御システムにおいて、センサは必要不可欠な要素のひとつである。そのため、各種センサを用いた制御手法への需要は今後も高まり、デバイスの量は増えていくと考える。すでに、制御システムは、デバイスの増加に伴い、より高度で複雑なものになってきている。それゆえ、一部の故障がシステム全体の機能に大きな影響を与える。たとえば、センサー一つが故障しただけで、全体の制御系の特性が不安定化する可能性もある。また、各デバイス機器の信頼性は格段に向上してきたものの、システムの安全性への要求は以前にも増して厳しくなっている。したがって、デバイスのリスクを考慮した制御システム構成が必要となる。

これまで、簡易的な故障対策として、システムが故障した場合、装置を停止させる処置がとられてきた。工場の生産ラインなどで用いられる自動機械の場合は、故障が生じたらシステム全体を停止させるだけでよいだろう。しかし、自動車や介護ロボットなど人が関わる機械の場合、故障が発生したら停止させるのでは不都合が生じる可能性がある。たとえば、介護ロボットが介護中に突然停止してしまった場合、介護を受けている人は停止したロボットのせいで身動きが取れず、外部に連絡さえ出来ない状態に陥ることもあり得る。また、エレベータシステムは、緊急停止さ

せると、内部に人を閉じ込めてしまうだけでなく、修理するまで停止状態が続くことにより利便性が大きく損なわれることとなる。特に建造物の高層化が進む現代社会において、エレベータの故障停止は建造物内での移動手段を断たれることにひとしい。したがって、人の関わる機械には、多少性能が劣化しても継続して動きつづけるようなシステムが今後は必要となるだろう。

現在まで、故障検出^{1)~7)}や故障対策についての研究は盛んに行われている。故障対策については、ハードウェアによる対策とソフトウェアによる対策とに分けられる。ハードウェアによる対策とは、簡単に言えばデバイスを冗長に装備させることである。たとえば、R. Ribeiroらはインバータのスイッチ故障について検討している⁸⁾⁹⁾。また、Q. Zhaoらはセンサ故障について冗長センサによる対応を検討している¹⁰⁾。しかしながら、これらのアプローチは単純かつ非常に有効ではあるものの、コストやスペースの増加を招くという欠点がある。現在のメカトロニクス機器のニーズは小型化や低コスト化となっており、これらのニーズを満足する故障対策が必要となる。それに対して、ソフトウェアによる対策とは、制御アルゴリズムを実行させるソフトウェアの工夫によって行われる。そのため機器の小型化を妨げない故障対策といえる。たとえば、D. DelgadoらはH ∞ 制御を用いたタコジェネ故障対策について検討している¹¹⁾。また、X. Zhangらはニューラルネットワークを用いた非線形システムの故障対策について検討している¹²⁾。さらにM. Polycarpouらは学習制御を用いたMIMO系への故障対策について検討している¹³⁾。多くの故障対策は設計が複雑だが、故障対策はできるだけ単純なものであるべきだと考える。

* 中央大学理工学部精密機械工学科
〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27
Department of Precision Engineering, Institute of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551
(Received December 9, 2008)

なぜなら、故障対策は副次的なものであり、演算負荷はできるだけ小さくし、正常時の動作に負担をかけないようにすべきだからである。また、コントローラの実装を考慮すると、コストなどの面からコントローラは低次元であることが好ましい。ソフトウェアによる対策の一つとして、リライアブル制御¹⁴⁾がある。リライアブル制御とは、制御系が不安定になることをあらかじめ想定して、その対策を制御設計段階で制御系内部に埋め込んでおくという制御理論である。著者らは、リライアブル制御の一手法として等価伝達関数 (Equivalent Transfer Function : 以下 ETF) を用いた方法を提案している^{15)~17)}。ETF とは、多重ループ系におけるフィードバックループの故障に対応するための冗長補償器であり、故障前後で理論的に入出力関係が等価になるよう設計する。そのため、故障時に用いる補償要素は複雑な設計なしに導出することができ、構造も単純であることから有効だと考える。また、ETF は多重ループ系のコントローラを前提としているため、制御対象に入力される外乱やパラメータ変動の影響を小さく抑えることができる。そのため、前述のような一時的な故障対策として十分な効果が得られると考える。

過去の研究において、著者らは位置サーボ系における速度フィードバックループの断線故障に対する ETF の特性を検討してきた^{15)~16)}。電流フィードバックループの欠損については、低ゲインに調整した一次遅れ系に切り換えることで応答が安定化できることが確認された¹⁷⁾ものの、ETF の適用については検討されていなかった。しかしながら、電流センサの故障対策に ETF が適用できるかを検討することは、ETF の実用面を考える上で重要である。

本論文では、SISO 位置サーボ系における電流フィードバ

ックループの断線故障に対して、ETF を用いたリライアブル制御系の特性を、DC モータを使用した実験により検討する。まず、ETF の機能とその導出法について検討する。つぎに、ループ欠損により不安定になった制御応答が ETF の使用により、安定化することを確かめる。

なお、本論文は 4 章から構成されている。2 章は ETF の一般式の導出方法を示す。3 章は位置制御系に適用した場合の ETF について述べる。ETF の有効性は実験により検討する。4 章は結言である。

2. 提案方式の一般式

2.1 多重ループ系の基本概念

多重ループ系はフィードバックループを複数持つ制御系のことである。多重ループ系を構成すると、速応性が高くなり、外乱に対する耐性が向上する。そのため、多くの制御系で多重ループ系は採用されている。多重ループ系の一番外側のフィードバックループをメジャーループと呼ぶ。メジャーループより内側のフィードバックループをマイナーループと呼ぶ。

Fig. 1 のような n 個のフィードバックループを持つ多重ループ系は(1)式で表すことができる。 G_C は補償要素を、 G_P は制御対象を表す。ここで、ラプラス演算子 s は式、図において省略する。

$$\frac{x_n}{r_n} = \frac{\prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi}}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj}} \dots \dots \dots (1)$$

一般に多重ループ制御系は、外乱に強く、外乱が入力された場合も安定性を確保することができる。また、速応性を

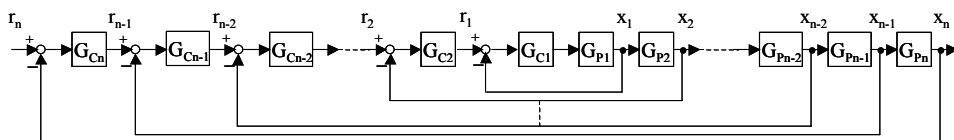


Fig. 1. Block diagram of multiple feedback loop control system.

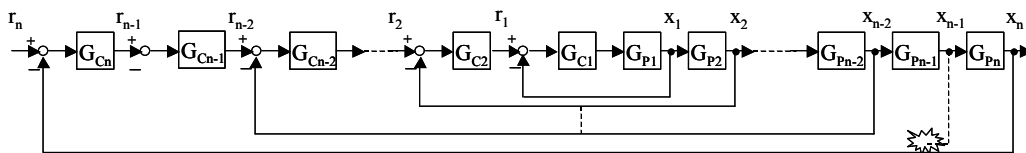


Fig. 2. Block diagram with a feedback loop failure.

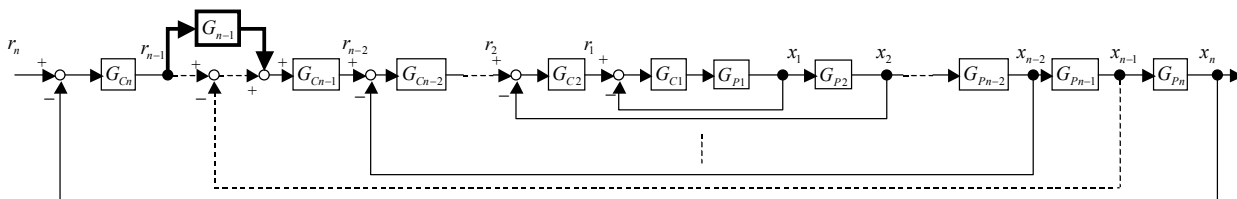


Fig. 3. Block diagram before and after switching to ETF.

向上させるために前向き補償ゲインを大きく設定できる。しかし、センサ故障により、間違ったフィードバック信号のせいで高ゲインによって信号が増幅される場合がある。そして、制御系は外乱の有無に関わらず不安定な状態に陥り、応答は振動的に発散する可能性がある。これらを改善するために、一時的な故障対策としてETFを使用する。

2.2 故障の定義

センサ故障には様々な症状が考えられる。たとえば、センサのあるビットが反転した結果、真値が得られなかったり、信号線が瞬時に断線したり、徐々に不具合が生じて結果的に断線したりする場合が考えられる。さらに、いったん故障だと判断したにもかかわらず、再度何らかの原因で（断線した線の接触による導通）復帰する場合も考えられる。

ETFは故障したセンサの出力は使用しない構造になっているため、故障の症状にかかわらず使用できる。ただし、ETFを適用するには故障を検出する構造が必要となる。本論文ではETF使用時の特性に主眼を置いているため、検出については論じないものとする。以後の文章では、故障の一例として、断線故障を取り扱う。断線故障は、Fig. 2のように故障後の出力が0になる状態を言う。また、いったん断線した後は正常時に復帰しないものとする。実験においては、故障の検出は可能であると仮定して、任意時間にETFに切り換えるものとする。

2.3 ETFの提案

Fig. 3に示すように、内側から $n-1$ 番目のマイナーループにおいてセンサ故障が発生した場合、系全体の伝達関数は、正常時と同様の機能を保つ必要がある。本研究では、フィードバックループにおける入出力比較箇所にETF G_{n-1} を挿入することによって、この問題を解決する。なお、ETFは理論的にはマイナーループだけでなく、メジャーループの

センサ故障にも対応できる可能性があるが、本論文ではマイナーループのセンサ故障を対象に検討する。

ここで、ETFの求め方について検討する。故障前後それぞれにおける r_n から x_n までの伝達関数を等式で結んで、ETF G_{n-1} を求める。まず、故障前の r_n から x_n までの伝達関数は、(1)式で表される。つぎに、故障後にETF G_{n-1} に切り換えた時の r_n から x_n までの伝達関数を求める。Fig. 4において、 r_{n-2} から x_{n-2} までの伝達関数は、(1)式で n を $n-2$ としたものであるので、Fig. 4はFig. 5のように表すことができる。

Fig. 5より、 r_n から x_n までの伝達関数を求めると、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{x_n}{r_n} &= \frac{G_{Cn} \cdot G_{n-1} \cdot G_{Cn-1} \cdot \frac{\prod_{i=1}^{n-2} G_{Ci} G_{Pi}}{1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj}} \cdot G_{Pn-1} \cdot G_{Pn}}{1 + G_{Cn} \cdot G_{n-1} \cdot G_{Cn-1} \cdot \frac{\prod_{i=1}^{n-2} G_{Ci} G_{Pi}}{1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj}} \cdot G_{Pn-1} \cdot G_{Pn}} \\ &= \frac{G_{n-1} \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi}}{1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} + G_{n-1} \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi}} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

(1)式の右辺=(2)式の右辺においてETF G_{n-1} を求めると、次のようになる。

$$G_{n-1} = \frac{\prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi}}{1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} + \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi}}$$

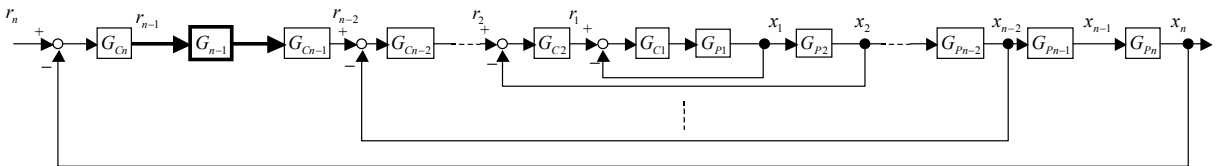


Fig. 4. Block diagram after switching ETF G_{n-1} .

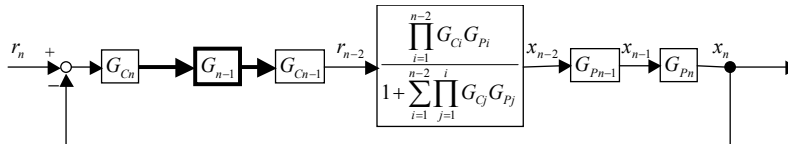


Fig. 5. Block diagram to change from Fig. 4.

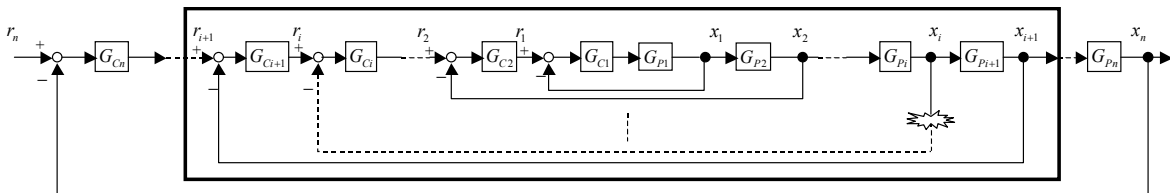


Fig. 6. Approach when i th (i is an arbitrary number) feedback loop fails.

$$\begin{aligned}
& \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} + G_{n-1} \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi} \right) \\
&= G_{n-1} \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi} \left(1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} \right) \\
& 1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} + G_{n-1} \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi} = G_{n-1} \left(1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} \right) \\
& 1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} = G_{n-1} \left(1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} - \prod_{i=1}^n G_{Ci} G_{Pi} \right) \\
& 1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} = G_{n-1} \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj} \right) \\
& G_{n-1} = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj}}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^i G_{Cj} G_{Pj}} \dots \dots \dots (3)
\end{aligned}$$

(3)式より、ETF G_{n-1} には、補償要素のみならず制御対象の特性が影響してくることがわかる。

また、内側から任意の*i*番目のマイナーループが欠損した時のETFは、Fig. 6の太枠に示すように、内側から*i*+1番目のマイナーループまでを取り出して同様に考えれば良い。

なお、切替時において連続性を保つため、ETFは正常時も平行して計算を行なう。

3. 適用例

3.1 位置サーボ系

位置サーボ系はロボット、NC工作機など多くの機械を動かす基本システムである。本論文では、位置サーボ系の例としてFig. 7のようなDCモータを使用したシステムにETF

Table 1. Parameters.

Proportional gain of position control system K_{PP}	100
Proportional gain of speed control system K_{SP}	0.0277
Integral gain of speed control system K_{SI}	1.39
Proportional gain of current control system K_{IP}	82.5
Integral gain of current control system K_{II}	55000
Unit conversion for speed M	9.55 rpm · s/rad
Torque constant K_T	0.119 Nm/A
Induced voltage constant K_E	0.119 Vs/rad
Inertia J	0.0002 kgm ²
Armature inductance L_m	0.0038 H
Armature winding resistance R_m	3.8 Ω
Rated Torque τ_o	0.637 Nm
Instantaneous Peak Torque τ_p	3.64 Nm
Time constant of LPF for current sensor T_l	0.00024 s
Time constant of LPF for tachometer T_s	0.00024 s
Sampling time of position control system $T_{samp,p}$	0.01 s
Sampling time of speed control system $T_{samp,s}$	0.001 s
Sampling time of current control system $T_{samp,c}$	0.0002 s

を適用する。Fig. 7はFig. 8のようなブロック線図で表すことができる。位置指令 θ_c に対し、位置応答 θ_m が出力される。ここで、 τ_L は外乱の負荷トルクである。各パラメータはTable 1に示す。

3.2 誘起電圧ループの等価変換

Fig. 8の位置サーボ系には誘起電圧のループが含まれているため、Fig. 1のような一般的な多重ループ系と一致しない。そのため、このままでは一般式からETFを導出できない。そこで、Fig. 8をFig. 9のような一般的な三重ループ系に等価変換する。具体的には、誘起電圧のループを G_{p1} に組み入れるような変換を行なう。ただし、ETF導出の際は、外乱 τ_L を無視する。

等価変換した後の、Fig. 9における各伝達関数は以下の式で与えられる。

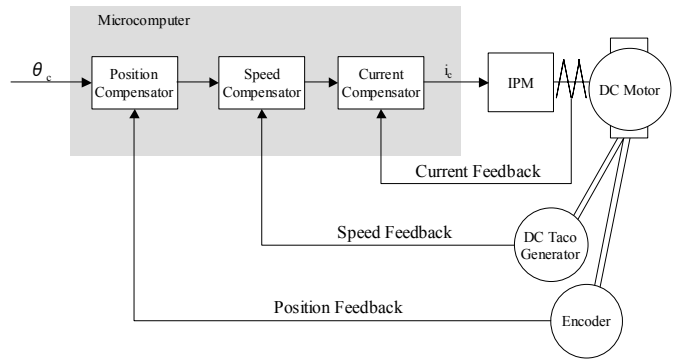


Fig. 7. Position servo system.

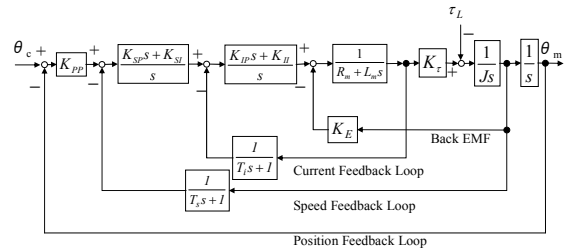


Fig. 8. Block diagram of position servo system.

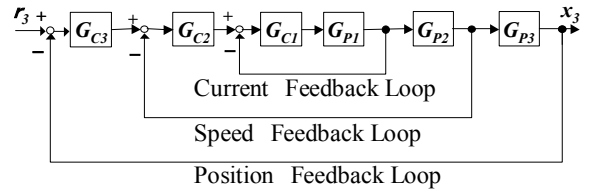


Fig. 9. Block diagram to have 3 feedback loops.

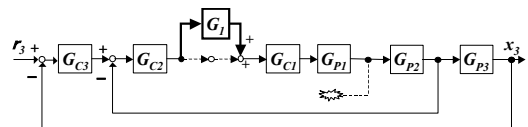


Fig. 10. Block diagram using ETF G_1 .

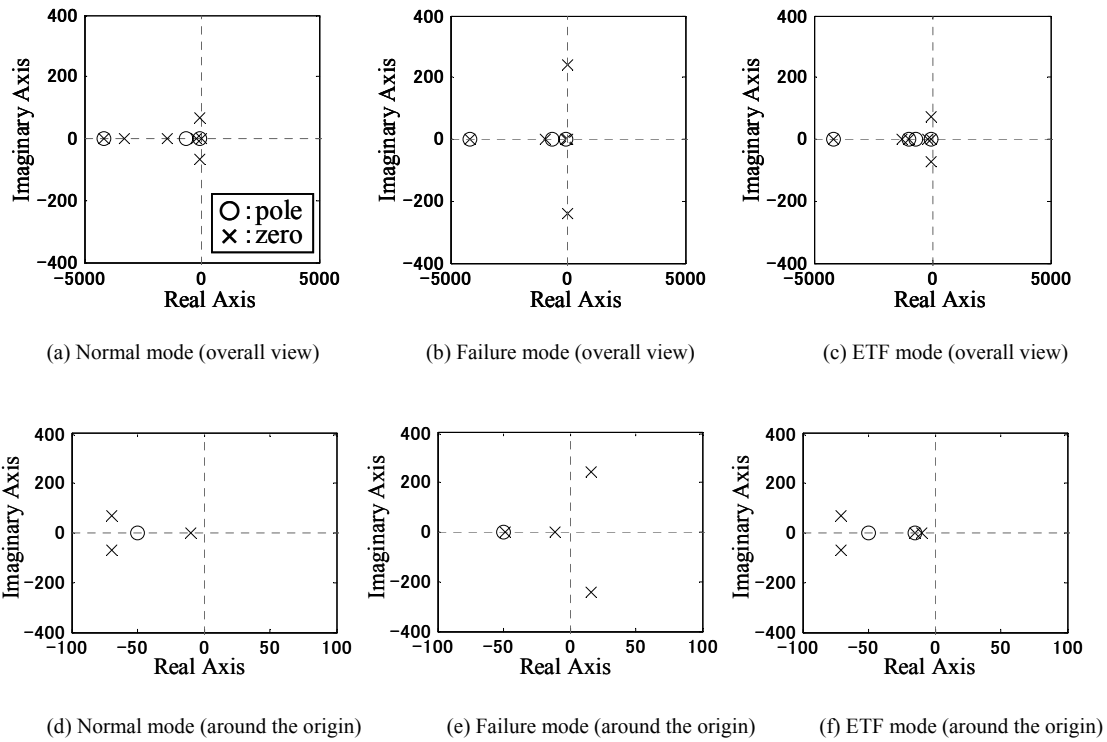


Fig. 11. Zeros and poles on the S-plane

$$G_{C1} = \frac{K_{IP}s + K_{II}}{s} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_{C2} = \frac{K_{SP}s + K_{SI}}{s} \dots\dots\dots (5)$$

$$G_{C3} = K_{PP} \dots\dots\dots (6)$$

$$G_{P1} = \frac{Js}{JL_m T_i s^3 + J(R_m T_i + L_m)s^2 + (K_E K_r T_i + J R_m)s + K_E K_r} \dots\dots\dots (7)$$

$$G_{P2} = \frac{K_r (T_i s + 1)}{Js (T_s s + 1)} \dots\dots\dots (8)$$

$$G_{P3} = \frac{T_s + 1}{s} \dots\dots\dots (9)$$

3.3 ETF の導出

等価変換した位置サーボ系に電流センサ故障用の ETF を適用すると、Fig. 10 のようになる。

電流フィードバックループは内側から 1 番目のループである。そこで、ETF を求めるには、Fig. 6 のように内側から 2 番目のループである速度フィードバックループまでを取り出して考えればよい。

(3)式において $n=2$ とすると、 G_1 は(10)式のように求められる。ただし、制御にはほとんど影響しないフィルタの特性 T_i , T_s は無視する。フィルタを無視することで、ETF は低次元になる。

$$G_1 = \frac{1}{1 + G_{C1} G_{P1}} \dots\dots\dots (10)$$

(10)式に Table 1 のパラメータを適用すると、 G_1 は下式のようになる。

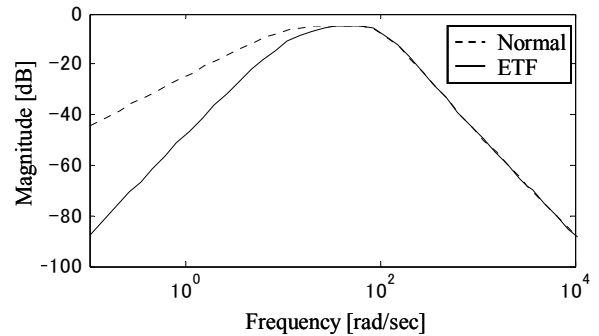


Fig. 12. Bode diagrams from the disturbance torque to output

$$G_1 = \frac{9.31 \times 10^{-7} s^2 + 9.31 \times 10^{-4} s + 1.41 \times 10^{-2}}{9.31 \times 10^{-7} s^2 + 1.52 \times 10^{-3} s + 4.08 \times 10^{-1}} \dots\dots (11)$$

3.4 ETF の特性

(11)式で示される ETF について、安定性と外乱抑圧性能について、シミュレーションによって検討する。

まず、ETF 使用時の内部安定性について論じる。制御系内部で不安定な極と不安定な零点が極零相殺を起こしていると、外乱と雑音の影響により、制御系が不安定化する。不安定な極または零点が ETF の使用により発生するかを検討する。正常時の位置制御系は(4)~(9)式で、ETF は(10)式で表される伝達関数で構成されている。(4)~(10)式をみると、不安定な極や零点は存在しない。また、各伝達関数の安定性を解析したところ、すべての伝達関数が安定であった。よって、ETF 使用時の内部安定性は保証される。ただし、検討にはモデル化誤差を考慮していない。今後はモデ

ル化誤差の影響で極と零点の位置がどのくらい変動するかを検査する必要がある。また、不安定な極零相殺が存在する場合にETFが有効かどうかは今後の検討課題である。

つぎに、フィードバックループ欠損前後の安定性を極配置によって検討する。Fig. 11は、正常時、電流フィードバックループ欠損時、ETF使用時の極と零点を示している。ただし、Fig. 11(a)~(c)はすべての極と零点を示している。しかし、原点から遠い位置に存在している極はほとんど応答に影響しないため、原点近傍について拡大したFig. 11(d)

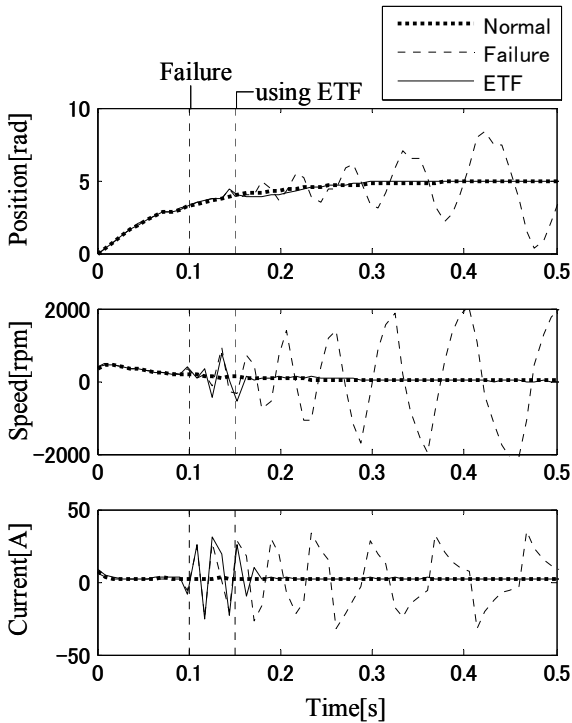


Fig. 13. Step responses without disturbance torque.

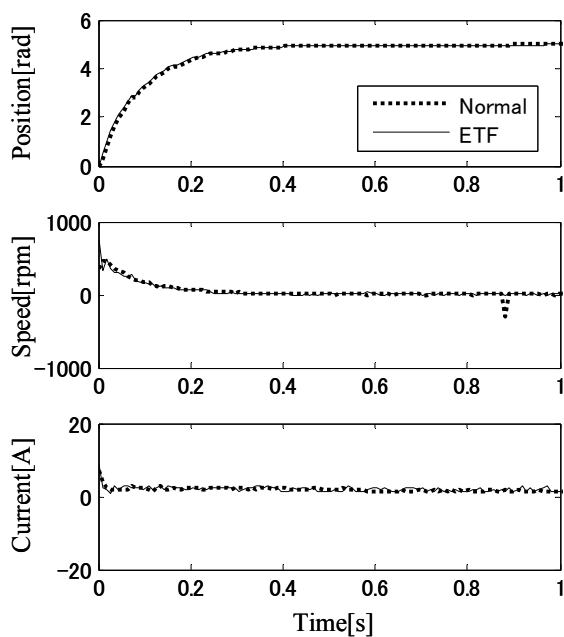


Fig. 14. Control performance of ETF

~(f)を用いて論じることにする。Fig. 11(d)を見ると、すべての極は左半面に存在するため、制御系は安定である。しかし、Fig. 11(e)を見ると、右半面に極が存在する。よって、電流フィードバックループが欠損すると制御系は不安定になる。Fig. 11(f)は、電流フィードバックループが欠損した状態でETFを使用した場合を表している。Fig. 11(f)を見ると、すべての極が左半面に存在しており、制御系は安定である。また、零極相殺を考慮すると、Fig. 11(d)の正常時とほぼ一致する。完全に一致しない原因は、フィルタを無視してETFを導出しているためである。

最後に、外乱抑圧性能の変化について検討する。(11)式で示されるETFは指令から出力までの入出力関係においてループ欠損前後で制御系が等価になるように設計されている。しかし、外乱入出力の関係においては正常時と等価にならない。そのため、外乱抑圧性能が正常時とは異なるものになると思われる。たとえば、Fig. 8に示される位置サーボ系には外乱トルク τ_L が外乱として想定される。そこで、外乱トルク τ_L から位置出力 θ_m までの周波数特性について検討する。Fig. 12は外乱入出力のボード線図を示している。Fig. 12より、ピークは正常時、ETF使用時の両方が0 dB以下となっており、ピークより高い周波数帯域において、両者は同じ特性を示す。しかし、低周波帯域においては、ETF使用時のほうが正常時よりも低い値を示している。以上のことから、ETF使用時は正常時とは異なる外乱抑圧特性を示すことがわかる。本論文で用いた条件では、ETF使用時において外乱抑圧性能は悪化しなかった。しかしながら、条件を変えた場合、外乱抑圧性能が悪化する可能性がある。そのような状況に備えて、今後は外乱オブザーバと併用するなど、外乱を陽に扱ったシステムで議論する必要がある。

3.5 実験結果

はじめに、無負荷時においてETFの有効性を検討する。

Fig. 13は正常時と電流フィードバックループの断線故障時、そしてETF使用時の応答を示している。位置指令として5radのステップ入力を用いた。故障時とは、0.1秒後に電流フィードバック値が0になった状態を指す。ETF使用時とは、0.1秒後に故障が発生し、0.15秒後にETFに切り換えた状態を指す。Fig. 13をみると、正常時は指令値に追従しており、定常偏差を生じないことがわかる。故障時は、波形が振動しており、不安定な状態になっている。故障後にETFを使用すると、波形の振動は収まる。定常偏差も生じない。Fig. 13の結果について以下に考察する。断線故障によって応答は不安定化したことから、故障の症状によっては、制御系全体の応答に影響が発生する。そのため、センサ故障に対して何らかの対策を講じる必要があるといえる。また、故障後においてETFを使用することで応答が安定化できたことから、ETFはセンサ故障に対して無負荷時は有効だといえる。ここで、フィードバックループ欠損が発生してから、ETFに切り換えるまでの時間である検出遅れ時間は、0.05秒である。フィードバックループ欠損が発

生したまま放っておくのは、安全性の面からよくない。そのため、検出遅れ時間はできるだけ小さくすべきである。

つぎに、ETF の追従特性について検討する。Fig. 14 は、無負荷時において、はじめから ETF を使用した場合の応答を正常時の応答と比較したものである。Fig. 14 を見ると、位置応答はほぼ一致していることがわかる。

最後に、外乱の入力によってセンサが破壊されるという現実的な状況を想定し、Fig. 15 のように 0.05 秒後に外乱トルク 1Nm を入力したときの応答について検討する。モータの定格トルクは Table 1 より 0.637Nm であるため、定格トルクの約 1.6 倍の負荷をかけていることになる。ETF 使用時の応答は、0.1 秒後に故障が発生し、0.15 秒に ETF へ切り換えた場合の波形である。Fig. 15 を見ると、正常時の位置応答は定常偏差を残さず収束している。ETF 使用時において、電流は 0.4 秒からに負方向に流れるが、最終的には正常時と同様の値が流れる。ETF 使用時の位置応答は、正常時と同様に定常偏差を残さず収束している。Fig. 15 の結果について以下に考察する。外乱が入力された後、正常時の位置応答が定常偏差を残さず収束したことから、正常時の制御系は 1Nm の外乱トルクに対して安定を保つことができるといえる。ETF 使用時において、一時的に負方向に電流が流れたのは、位置応答においてオーバーシュートが発生したためと考えられる。ETF 使用時において、位置応答が定常偏差なく収束したことから、外乱入力によりセンサが故障するような現実的な条件下においても、ETF により安定性を保つことができるといえる。

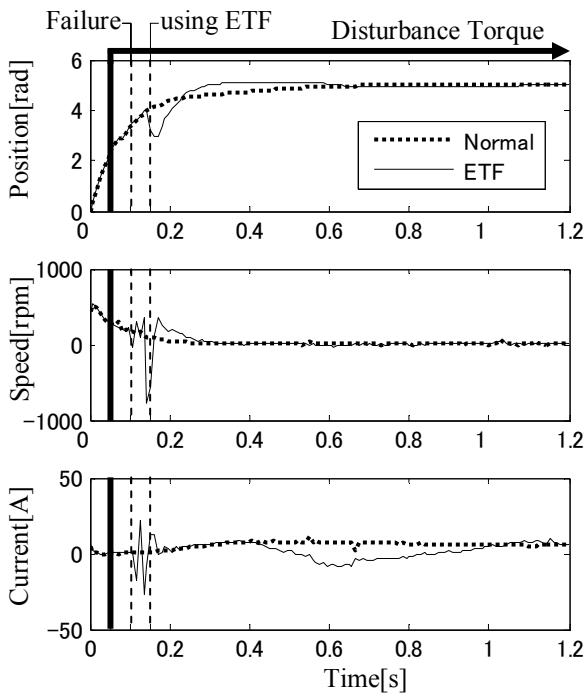


Fig. 15. Influence of the disturbance torque at the ETF mode

4. 結言

フィードバックループ欠損の対策として ETF を提案し、DC モータを用いた実験によりその特性を検討した。結果は以下のとおりである。

(1) 多重ループ系における ETF の一般式を導いた。ETF には制御対象の特性が反映されることが分かった。また、誘起電圧を持つ系のように多重ループ系の一般形と一致しない制御系は等価変換することで、ETF を導出できる。

(2) ETF の特性についてシミュレーションにより検討した。ETF は故障により不安定になった制御系を安定化できることが分かった。

(3) 位置制御系において電流フィードバックループが欠損すると応答が不安定化するが、ETF を適用することで応答を安定化できることを実験により確認した。

(4) フィードバックループ欠損は制御対象に負担をかけるため、検出遅れ時間はできるだけ小さくすべきである。

今後は、切換後の安定性や過渡特性についての本質的な設計基準について明らかにする。また、メジャーループのセンサ故障への ETF 適用、ETF の切換条件となるフィードバックループの欠損判定方法を確立する。

謝辞

本研究にあたっては、中央大学理工学研究所 2008 年度研究プロジェクト共同研究第 2 類の援助により推進されましたことを述べ、謝意に代えます。

また、中央大学理工学部教授・故大前力先生に懇切なる御指導と御助言を賜り、励ましをいただきました。故人からは技術的な着眼点や論理的な検証法はもとより、人としての生き方に至るまで、多くの教訓を与えていただきました。深い薫陶を受けた故人に、感謝と哀悼の意を表し、本論文を捧げたいと思います。

[参考文献]

- 1) Y. Murphey, M. Masrur, Z. Chen and B. Zhang : Model-Based Fault Diagnosis in Electric Drives Using Machine Learning, IEEE Trans. Mechatronics, **11**-3, 290/303 (2006)
- 2) T. Kowalska, M. Dybkowski and K. Szabat : Adaptive Neuro-Fuzzy Control of the Sensorless Induction Motor Drive System, EPE-PEMC2006, 1836/1841 (2006)
- 3) Y. Izumikawa and K. Yubai : Fault-Tolerant Control System of Flexible Arm for Sensor Fault by Using Reaction Force Observer, IEEE Trans. Mechatronics, **10**-4, 391/396 (2005)
- 4) F. Tahami and A. Sjjjaei : A Novel Fault Tolerant Reconfigurable Concept for Vector Control of Induction Motors, EPE-PEMC2006, 1199/1204 (2006)
- 5) P. Kabore, H. Wang : Design of Fault Diagnosis Filters and Fault-Tolerant Control for a Class of Nonlinear Systems, IEEE, Trans. automatic control, **46**-11, 1805/1810 (2001)
- 6) M. Polycarpou and A. Trunov : Learning Approach to Nonlinear Fault Diagnosis: Delectability Analysis, IEEE Trans. automatic control, **45**-4, 806/812 (2000)
- 7) M. Hajiaghajani, H. Toliyat and I. Panahi : Advanced Fault Diagnosis of a

- DC Motor, IEEE Trans. energy conversion, **19-1**, 60/65 (2004)
- 8) R. Ribeiro, C. Jacobina, E. Silva and A. Lima : A Fault Tolerant Induction Motor Drive System by Using a Compensation Strategy on the PWM-VSI Topology, IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1191/1196 (2001)
 - 9) R. Ribeiro, C. Jacobina, E. Silva and A. Lima : Fault-Tolerant Voltage-Fed PWM Inverter AC Motor Drive Systems, IEEE Trans. industrial electronics, **51-2**, 439/446(2004)
 - 10) Q. Zhao, Y. Weng, J. Jiang : Design of the Reliable Control System with Multiple Snsors, IEEE Electrical and Computer Engineering Conference, 225/228(1998)
 - 11) D. Delgado, S. Martinez and K. Zhou : Integrated Fault-Tolerant Scheme for a DC Speed Drive, IEEE Trans. Mechatronics, **10-4**, 491/427 (2005)
 - 12) X. Zhang, T. Parisini and M. Polycarpou : Adaptive Fault-Tolerant Control of Nonlinear Uncertain Systems: An Information-Based Diagnostic Approach, IEEE Trans, automatic control, **49-8**, 1259/1274 (2004)
 - 13) M. Polycarpou : Fault Accomodation of a Class of Multivarialve Nonlinear Dynamical Systems Using a Learning Approach, IEEE Trans. automatic control, **46-5**, 736/742 (2001)
 - 14) D. Siljak, : Reliable control using multiple control systems, Int.J.Contr., **31-2**, 303/329 (1980)
 - 15) T. Imaizumi and T. Ohmae : Reliable Control using Equivalent Transfer Function for Control System with Multiple Minor-Loop, The 29th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 611/616 (2003)
 - 16) T. Imaizumi and T. Ohmae : Experiment Evaluation of Reliable Control Using Equivalent Transfer Function for Speed Feedback Loop Failure, SICE Annual Conference, 955/959 (2004)
 - 17) K. Ishikawa and T. Ohmae : Reliable Control using Equivalent Transfer Function for Position Servo System, EPE-PEMC2006, 1184/1189 (2006)

[著者紹介]

石川 薫 (学生会員)



1982年5月28日生。2005年中央大学理工学部精密機械工学科卒業。2007年同大学大学院理工学研究科精密工学専攻博士課程前期過程終了。現在、同大学博士課程後期過程在籍。制御の研究に従事。電気学会、日本ロボット学会、IEEEの会員。

中村 太郎



1975年生まれ。信州大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。現在、中央大学理工学部精密機械工学科准教授。バイオメカトロニクスの研究に従事。博士(工学)。日本機械学会、日本ロボット学会、IEEE等の会員。

大隅 久 (正会員)



1962年3月5日生。1988年東京大学大学院工学系研究科博士課程中退。同年東京大学精密工学科助手。1991年同講師。1993年同助教授、1994年中央大学理工学部精密機械工学科助教授。現在、同大学教授、ロボットの機構、制御の研究に従事。工学博士。精密工学会、日本機械学会、IEEE等の会員。