

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5017984号
(P5017984)

(45) 発行日 平成24年9月5日(2012.9.5)

(24) 登録日 平成24年6月22日(2012.6.22)

(51) Int.Cl.

H02P 29/00 (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)

F 1

H02P 5/00
G05B 13/02X
C

請求項の数 2 (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2006-258515 (P2006-258515)
 (22) 出願日 平成18年9月25日 (2006.9.25)
 (65) 公開番号 特開2008-79478 (P2008-79478A)
 (43) 公開日 平成20年4月3日 (2008.4.3)
 審査請求日 平成21年4月16日 (2009.4.16)

(73) 特許権者 000006622
 株式会社安川電機
 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
 (72) 発明者 張 文農
 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
 株式会社 安川電機内
 (72) 発明者 沢村 光次郎
 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
 株式会社 安川電機内
 (72) 発明者 竹井 康行
 福岡県北九州市八幡西区黒崎城石2番1号
 株式会社 安川電機内
 審査官 営間 庸裕

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 サーボ制御装置とその速度追従制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

速度指令に基づいてトルク指令基本信号を算出するPI制御部を備え、電動機および負荷機械を含む実プラントを駆動制御するサーボ制御装置において、

ノミナルプラントの逆システムと第1ローパスフィルタとを有し、前記実プラントを駆動制御するためのトルク指令から、モータ速度を前記ノミナルプラントの逆システムに通した値を減算し、該減算した値を前記第1ローパスフィルタに通し、該通した値を前記トルク指令基本信号に加算して前記トルク指令を出力する外乱オブザーバと、

ノミナルプラントと第2ローパスフィルタとを有し、前記トルク指令基本信号から、前記トルク指令基本信号を前記第2ローパスフィルタに通した値を減算し、該減算した値を前記ノミナルプラントに通し、該通した値を前記モータ速度に加算してフィードバック速度を出力する位相補償器と、を備え、

前記ノミナルプラントのイナーシャを、前記実プラントのイナーシャ変動幅における最小値以下とすると共に、

前記実プラントのイナーシャ変動幅における最大値を前記ノミナルプラントのイナーシャで除算した値に、前記第1ローパスフィルタの時定数を乗算した値を前記第2ローパスフィルタの時定数とすることを特徴とするサーボ制御装置。

【請求項 2】

前記外乱オブザーバに代わり、前記ノミナルプラントの逆システムと前記第1ローパスフィルタとを有し、前記実プラントを駆動制御するための前記トルク指令から、前記モータ

速度を前記ノミナルプラントの逆システムに通した値を減算し、該減算した値を前記トルク指令基本信号に加算し、該加算した値を前記第1ローパスフィルタに通して前記トルク指令を出力する他の外乱オブザーバを備えることを特徴とする請求項1に記載のサーボ制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、イナーシャが大きく変動する負荷機械をフィードバック制御するサーボ制御装置に関する。 10

【背景技術】

【0002】

一般的に、サーボ制御装置の速度制御は、電動機の回転速度をフィードバックしてP I制御を用いて行い、良い制御性能を達成するために、電動機の回転子を含む機械可動部の総イナーシャを正確に知る必要がある。しかしながら、負荷機械のイナーシャの変動や推定誤差が大きくなる場合に、制御系の一巡回ループのゲインが大きく変わるので、制御系の特性が大きく変わりロバストな高性能の制御が実現できないことがある。

【0003】

第1の従来のサーボ制御装置は、速度指令に基づいてトルク指令の基本信号を算出するP I制御部を備え、電動機および負荷機械を駆動制御するサーボ制御装置であって、外乱やパラメータ変動などを抑制できる外乱オブザーバを用いている（例えば、非特許文献1参照）。 20

図4は、第1の従来のサーボ制御装置の構成を示すブロック図である。図において、4は電動機の回転子および負荷機械を含む実際のプラントP(s)で、トルク指令T^{*}から電動機の回転速度ω_mまでの伝達関数が示されている。また、5は外乱オブザーバであり、ノミナルプラント（モデル）の逆システムP_n(s)⁻¹と第1ローパスフィルタL₁を含んでいる。また、2はP I制御部である。また、T^{*}は速度指令、ω_mは電動機の回転速度、T_fはフィードバック速度、T^{*}はトルク指令、T₀^{*}はトルク指令の基本信号、T_fは外乱補償トルク、Jは実際のプラントのイナーシャ、J_nはノミナルプラントのイナーシャ、sはラプラス演算子である。 30

次に、第1の従来のサーボ制御装置の動作原理について説明する。簡単のため、第1ローパスフィルタL₁を式(1)で表される1次ローパスフィルタとする。

【0004】

【数1】

$$L_1(s) = \frac{1}{1 + T_1 s} \quad \cdots (1)$$

【0005】

ここで、T₁は第1ローパスフィルタの時定数である。トルク指令の基本信号T₀^{*}から電動機の回転速度ω_mまでの等価制御対象G_o(s)を求める式(2)となり、また、式(2)における式(3)で表される項を等価ローパスフィルタL_o(s)とすると、図4の制御システムの等価ブロック図を図5のように書き直すことができる。（図5は、図4の等価ブロック図である。） 40

【0006】

【数2】

$$G_o(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_0^*(s)} = \frac{1 + T_1 s}{1 + (J/J_n)T_1 s} \cdot \frac{1}{J_n s} \quad \cdots (2)$$

$$L_o(s) = \frac{1 + T_1 s}{1 + (J/J_n)T_1 s} \quad \cdots (3)$$

【0007】

10

20

30

40

50

式(3)において、第1ローパスフィルタの時定数 T_1 を十分小さく設定すれば、図5のブロック図において、等価ローパスフィルタ7の影響を無視することができるため、等価制御対象 $G(s)$ とノミナルプラント $P_n(s)$ は低周波数域での周波数特性がほぼ同じであるので、イナーシャが変わっても指令に対する追従特性が変わらない。

【0008】

第2の従来のサーボ制御装置は、速度指令に基づいてトルク指令の基本信号を算出するPI制御部を備え、電動機および負荷機械を駆動制御するサーボ制御装置であって、ローパスフィルタなどの遅れ要素の位相遅れを補償する位相補償器を用いている(例えば、特許文献1参照)。

図6は、第2の従来のサーボ制御装置の構成を示すブロック図である。図において、9は実際のローパスフィルタ3と実際のプラント $P(s)$ 4を含む実際の制御対象 $G(s)$ 、6はノミナルプラント $P_n(s)$ 61および第2ローパスフィルタ62を含む位相補償器である。また、図4と同一記号を付している構成は、作用等同じであるためその説明を省略する。

次に、第2の従来のサーボ制御装置動作原理について説明する。図6において、 $J_n = J$ が満たされる場合に、トルク指令の基本信号 T_0^* からフィードバック速度 ω_f までの伝達関数 $G_f(s)$ を求めるとき、式(4)で表される。

【0009】

【数3】

$$G_f(s) = \frac{\omega_f(s)}{T_0^*(s)} = \frac{1 + L(s) - L_2(s)}{J_n s} \quad \cdots (4)$$

10

20

【0010】

式(4)において、すべての周波数において第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ 62の遅れる位相量を、実際のローパスフィルタ $L(s)$ 3の位相量より大きくなるように構成すれば、 $\{1 + L(s) - L_2(s)\}$ の項が位相進みになるので、位相補償器がない場合に実際のローパスフィルタ $L(s)$ 3の位相遅れによる振動や不安定な問題が解消される。

【非特許文献1】三重大学 山田，駒田，石田，堀著「外乱オブザーバの高次数化とロバスト安定性に関する考察」T.IEE Japan, Vol.117-C, No.12, 1997, p.1776-1781

【特許文献1】特WO2000/070739号公報(第7-10頁、図2)

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

第1の従来のサーボ制御装置では、観測された電動機の回転速度 ω_m をノミナルプラントの逆システム $P_n^{-1}(s)$ 53に通して、トルク指令の基本信号 T_0^* に外乱補償トルク T_f をフィードバックしている外乱オブザーバ5を用いているため、通常のPI制御を用いた場合と較べ、観測ノイズの影響が大きくなる。特に、負荷機械のイナーシャが小さい場合にその影響が大きい。

この場合、観測ノイズに対するフィルタリング特性を強く、すなわちノイズ除去特性を良くするため、負荷機械のイナーシャが小さい場合に合わせて第1ローパスフィルタ52の時定数 T_1 を大きく設定する必要がある。しかしながら、負荷機械のイナーシャが小さい場合に合わせて第1ローパスフィルタ52の時定数 T_1 を大きく設定すると、負荷機械のイナーシャが大きくなる場合に制御系の一巡伝達関数の位相遅れが大きくなるため、PI制御器のゲインを上げられなく制御特性を向上させることができない。

したがって、第1の従来のサーボ制御装置は、ロバスト特性とノイズ除去特性を両立させることができないという問題があった。

【0012】

また、第2の従来のサーボ制御装置では、前述のように、フィードバック制御系の位相遅れを補償できる前提条件は、ノミナルプラントのイナーシャと実際のプラントのイナーシャがほぼ同じ($J_n = J$)であった。

40

50

したがって、第2の従来のサーボ制御装置は、負荷機械のイナーシャが大きく変動する場合に、ノミナルプラントのイナーシャが実際のプラントから大きく外れることがあるため、その時のフィードバック速度が電動機の回転速度から大きく外れるので電動機の回転速度が速度指令に対する追従特性が悪くなるという問題があった。

【0013】

本発明はこのような問題点に鑑みてなされたものであり、第1の従来のサーボ制御装置における外乱オブザーバと、第2の従来のサーボ制御装置における位相補償器を組み合わせることにより、ノイズの影響を許容できる範囲に抑え、更に、外乱や負荷変動などの悪影響を抑制し、ロバスト安定性を保証し、指令に対するロバストかつ高性能な追従制御を実現することができるサーボ制御装置を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0014】

上記問題を解決するため、本発明は、次のように構成したのである。

本発明の一の観点によるサーボ制御装置は、速度指令に基づいてトルク指令基本信号を算出するP I制御部を備え、電動機および負荷機械を含む実プラントを駆動制御するサーボ制御装置において、ノミナルプラントの逆システムと第1ローパスフィルタとを有し、前記実プラントを駆動制御するためのトルク指令から、モータ速度を前記ノミナルプラントの逆システムに通した値を減算し、該減算した値を前記第1ローパスフィルタに通し、該通した値を前記トルク指令基本信号に加算して前記トルク指令を出力する外乱オブザーバと、ノミナルプラントと第2ローパスフィルタとを有し、前記トルク指令基本信号から、前記トルク指令基本信号を前記第2ローパスフィルタに通した値を減算し、該減算した値を前記ノミナルプラントに通し、該通した値を前記モータ速度に加算してフィードバック速度を出力する位相補償器と、を備え、前記ノミナルプラントのイナーシャを、前記実プラントのイナーシャ変動幅における最小値以下と共に、前記実プラントのイナーシャ変動幅における最大値を前記ノミナルプラントのイナーシャで除算した値に、前記第1ローパスフィルタの時定数を乗算した値を前記第2ローパスフィルタの時定数とするサーボ制御装置が適用される。

20

【発明の効果】

【0015】

本発明の一の観点によるサーボ制御装置によると、外乱オブザーバおよび位相補償器を組み合わせることにより、外乱や負荷変動などの悪影響を抑制し、制御系のロバスト安定性を保証し、そして指令に対するロバストかつ高性能な追従制御を実現することができる。また、単に、外乱オブザーバのみ、あるいは、位相補償器のみを備えるのではなく、両者の問題点を解決するものであるため、サーボ制御装置としての汎用性が高まる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

以下、本発明の実施の形態について図を参照して説明する。

【実施例1】

40

【0017】

図1は、本発明の第1実施例を示すサーボ制御装置のブロック図である。図において、図4および図6と同一記号を付している構成は、作用等同じであるためその説明を省略する。また、実際のプラントのイナーシャJの最小値をJ_mとし、最大値をJ_Mとする。

【0018】

以下、本発明のサーボ制御装置の動作原理について説明する。

第1の従来のサーボ制御装置と同じように、簡単のために第1ローパスフィルタL₁を式(1)で表される1次ローパスフィルタとし、また、トルク指令の基本信号T₀*から電動機の回転速度ω_mまでの等価制御対象G₁(s)を求める(式(2))、また、式(2)における式(3)で表される項を等価ローパスフィルタL₂(s)とす

50

ると、図1の制御システムの等価ブロック図を図3のように書き直すことができる。（図3は、図1および図2の等価ブロック図である。）図3のように書き直すことことで、等価制御対象 $G_o(s)$ のイナーシャが、一定な値であるノミナルイナーシャ J_n で表すことができる。

【0019】

ここで、図3において、トルク指令の基本信号 T_0^* からフィードバック速度 ω_f までの等価制御対象8の伝達関数 $G_f(s)$ を求めると、式(5)で表される。

【0020】

【数4】

$$G_f(s) = \frac{\omega_f(s)}{T_0^*(s)} = \left\{ 1 + L_o(s) - L_2(s) \right\} \cdot \frac{1}{J_n s} \quad \cdots (5)$$

10

【0021】

図1における実際のプラントP(s)4のイナーシャJが最小値 J_m となった場合、仮に、 $J_n > J_m$ とすると、図3における等価ローパスフィルタ $L_o(s)$ の式である式(3)および図3より、等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の式(7)は、直列位相進み要素になるので、制御系が高周波数振動を起こし易くなる。

そのため、ノミナルプラントのイナーシャ J_n を式(6)とする。

$$J_n \leq J_m \quad \cdots (6)$$

【0022】

20

また、式(6)の条件の場合、観測ノイズの影響が一番大きいので、第1ローパスフィルタ $L_1(s)$ の時定数 T_1 をノイズ除去特性が満たされるように、できるだけ最小値に設定する。ここで、「ノイズ除去特性」とは、センサーからのノイズ信号が制御系に与える影響（騒音など）を抑えることであり、トルク指令を観測しながら時定数 T_1 を設定すればよい。

【0023】

図1における実際のプラントP(s)4のイナーシャJが最大値 J_M となった場合、図3における等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の式(7)で表される。式(7)の条件の場合、等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れが一番大きいので、第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ を式(8)とすると、すべて（最小値 J_m から最大値 J_M まで）の実際のプラントのイナーシャJに対して、等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れが、第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れより小さいため、等価制御対象8の伝達関数 $G_f(s)$ の $\{ 1 + L_o(s) - L_2(s) \}$ の項が位相進みになる。

30

【0024】

【数5】

$$L_o(s) = \frac{1 + T_1 s}{1 + (J_M / J_n) T_1 s} \quad \cdots (7)$$

$$L_2(s) = \frac{1 + T_1 s}{1 + (J_M / J_n) T_1 s} \quad \cdots (8)$$

40

【0025】

したがって、位相補償器がない場合における等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れによる振動や制御系の不安定な問題が解消される。

また、 $J_M > J_n$ が満たされる場合、第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ を近似的に式(9)で表される1次ローパスフィルタとすることができます。ただし、 $T_2 = (J_M / J_n) T_1$ である。

【0026】

【数6】

$$L_2(s) \approx \frac{1}{1 + T_2 s} \quad \cdots (9)$$

50

【0027】

このように、第1の従来のサーボ制御装置における外乱オブザーバ5を用いて、イナーシャが変動する実際のプラントから等価的にイナーシャが一定であるノミナルプラントのイナーシャに制御対象を変換し、時定数が実際のプラントのイナーシャによって変わる等価ローパスフィルタに第1ローパスフィルタを変換し、

また、第2の従来のサーボ制御装置における位相補償器6を用いて、等価ローパスフィルタの位相遅れを補償することにより、実際のプラントのイナーシャが大きく変わっても、ロバストかつ高性能な速度制御を実現することができる。

【0028】

ここで、外乱オブザーバ5と位相補償器6とを備えた、第1実施例における本発明のサーボ制御装置の特徴となる部分を整理すると、次の通りである。 10

- ・ノミナルプラントのイナーシャ J_n を、実際のプラントのイナーシャ J の最小値 J_m 以下とすること。（式（6））

- ・第1ローパスフィルタの時定数 T_1 を、ノイズ除去特性が満たされるように、小さな値に設定すること。

- ・第2ローパスフィルタの時定数 T_2 を、実際のプラントのイナーシャ J の最大値とノミナルプラントのイナーシャ J_n との比と、第1ローパスフィルタの時定数 T_1 とを乗算した値とすること。 $(T_2 = (J_m / J_n) T_1)$

【実施例2】

【0029】

20

図2は、本発明の第2実施例を示すサーボ制御装置のブロック図である。本実施例が第1実施例と異なる部分は、減算器51の出力に接した第1ローパスフィルタ52を、加算器54の出力に移し替えたことである。なお、図2も図1と同様に、図3にある等価ブロック図で表すことができる。

第1ローパスフィルタ52を移し替えたことにより、トルク指令の基本信号 T_0^* から電動機の回転速度 ω_m までの等価制御対象8の伝達関数 $G_o(s)$ は、式（10）で表される。また、等価ローパスフィルタ7を式（11）で表されるものとする。

【0030】

【数7】

$$G_o(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_0^*(s)} = \frac{1}{1 + (J/J_n)T_1 s} \cdot \frac{1}{J_n s} \quad \dots (10)$$

30

$$L_o(s) = \frac{1}{1 + T_o s} \quad \dots (11)$$

【0031】

ここで、 $T_o = (J / J_n) T_1$ は、図3における等価ローパスフィルタ7の時定数である。

また、第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ を、式（12）で表される1次ローパスフィルタとする。ただし、 $T_2 = (J_m / J_n) T_1$ である。

【0032】

40

【数8】

$$L_2(s) = \frac{1}{1 + T_2 s} \quad \dots (12)$$

【0033】

トルク指令の基本信号 T_0^* からフィードバック速度 ω_f までの伝達関数 $G_f(s)$ を求め、整理すると、式（13）で表せられる。なお、式（13）は第1実施例における式（5）と同じものとなる。

【0034】

【数9】

$$G_f(s) = \frac{\omega_f(s)}{T_0^*(s)} = \{1 + L_o(s) - L_2(s)\} \cdot \frac{1}{J_n s} \quad \cdots (13)$$

【0035】

したがって、すべて（最小値 J_m から最大値 J_M まで）の実際のプラントのイナーシャ J に対して、 $T_0 = (J / J_n) T_1$ 、 $T_2 = (J_M / J_n) T_1$ 、 $J < J_M$ の条件から $T_0 > T_2$ が満たされ、すなわち、等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れが第2ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れより小さいため、等価制御対象 8 の伝達関数 $G_f(s)$ の $\{1 + L_0(s) - L_2(s)\}$ の項が位相進みになる。

よって、位相補償器がない場合における等価ローパスフィルタ $L_2(s)$ の位相遅れによる振動や制御系の不安定な問題が解消される。 10

【0036】

このように、第2実施例は第1実施例と比べ、等価ローパスフィルタ 7 は位相遅れが少し大きくなるが、PI制御器 2 から入って来たノイズ成分を除去することができる。なお、第2実施例における第1ローパスフィルタ 5 2 の時定数 T_1 の値は、第1実施例における第1ローパスフィルタ 5 2 の時定数 T_1 と値が異なる。

【0037】

次に、本発明の効果を具体例を用いて説明する。

図7は負荷イナーシャが20倍変動（1倍から20倍）する実際のプラントに対して、通常のPI制御を用いたサーボ制御装置のシミュレーション結果、図8は負荷イナーシャが20倍変動（1倍から20倍）する実際のプラントに対して、第1の従来のサーボ制御装置のシミュレーション結果、図9は負荷イナーシャが20倍変動（1倍から20倍）する実際のプラントに対して、本発明のサーボ制御装置のシミュレーション結果である。 20

本発明のサーボ制御装置は、通常のPI制御または第1の従来のサーボ制御装置と比べて、イナーシャが大きく変動してもオーバーショットが少なく、更に、整定時間が短いという指令に対する高性能な追従特性が殆ど変わらないことが分かる。

【0038】

このように、本発明のサーボ制御装置は、外乱オブザーバ 5 と位相補償器 6 を備え、特定の条件を設定することで、負荷イナーシャが大きく変動しても、モータ速度応答がほぼ一致するのである。なお、モータ速度とは、電動機の回転速度 ω_m を示すものである。また、特定の条件を設定するというのは、第1実施例及び第2実施例での説明のように、（段落27）および（段落35）に記載の事項である。 30

【産業上の利用可能性】

【0039】

通常のPI制御系にノミナルプラントの逆システムを含む外乱オブザーバと、ノミナルプラントを含む位相補償器とを組み合わせることで、実際のプラントのパラメータ変動を補償することによって、ロバストかつ高性能な制御を実現することができるので、サーボ用途のみならず、いわゆるノミナルプラントが非最小位相システムで表されパラメータが大きく変動するシステムに対して、ロバストかつ高性能に指令に追従するという用途にも適用できる。 40

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1】本発明の第1実施例を示すサーボ制御装置のブロック図

【図2】本発明の第2実施例を示すサーボ制御装置のブロック図

【図3】図1および図2の等価ブロック図

【図4】第1の従来のサーボ制御装置の構成を示すブロック図

【図5】図3の等価ブロック図

【図6】第2の従来のサーボ制御装置の構成を示すブロック図

【図7】通常のPI制御を用いたサーボ制御装置のシミュレーション結果を示す図

【図8】第1の従来のサーボ制御装置のシミュレーション結果を示す図

10

20

30

40

50

【図9】本発明のサーボ制御装置のシミュレーション結果を示す図

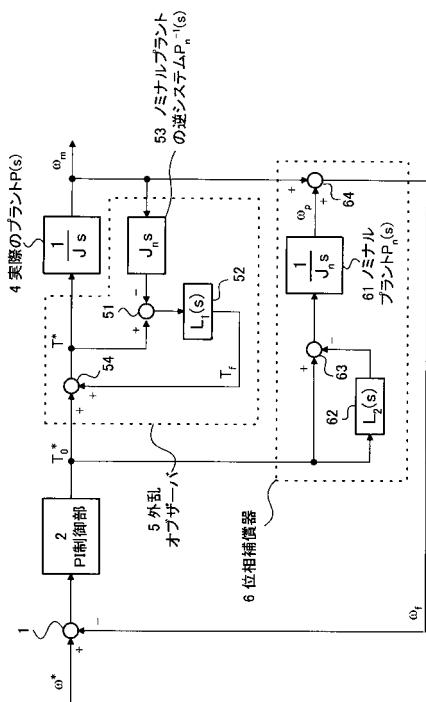
【符号の説明】

【 0 0 4 1 】

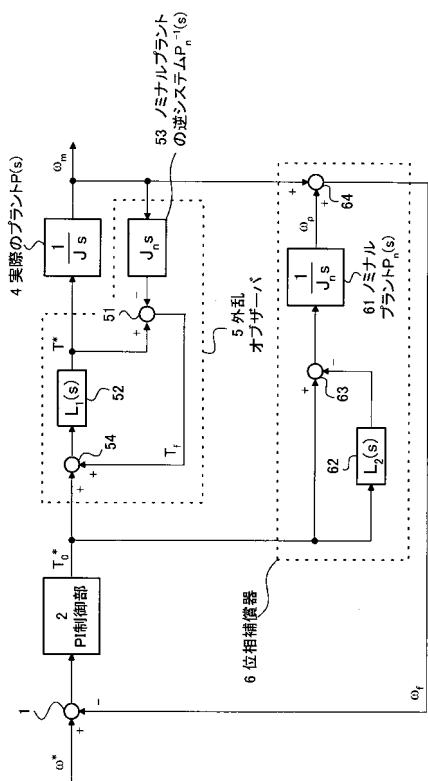
- 1、5 1、6 3 減算器
 - 2 P I 制御部
 - 3 実際のローパスフィルタ
 - 4 実際のプラント
 - 5 外乱オブザーバ
 - 5 2 第1ローパスフィルタ
 - 5 3 ノミナルプラントの逆システム
 - 5 4、6 4 加算器
 - 6 位相補償器
 - 6 1 ノミナルプラント
 - 6 2 第2ローパスフィルタ
 - 7 等価ローパスフィルタ
 - 8 等価制御対象
 - 9 実際の制御対象

10

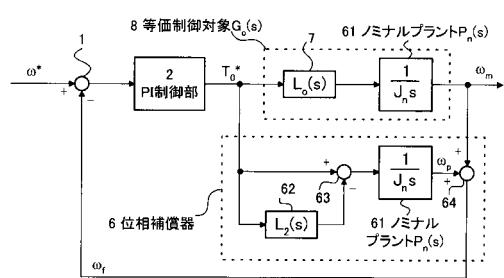
【 図 1 】



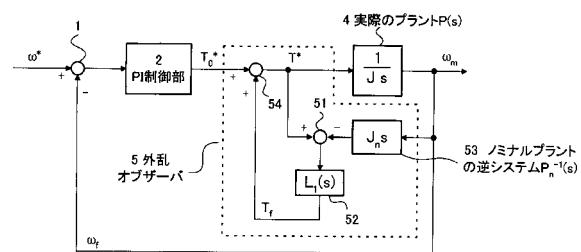
【 図 2 】



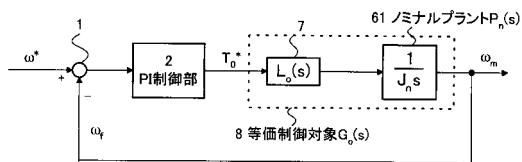
【図3】



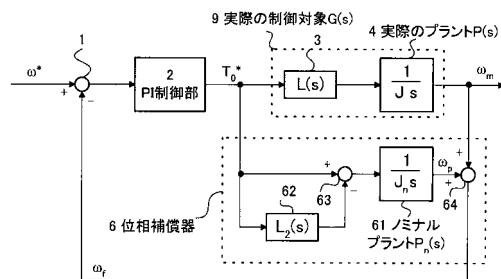
【図4】



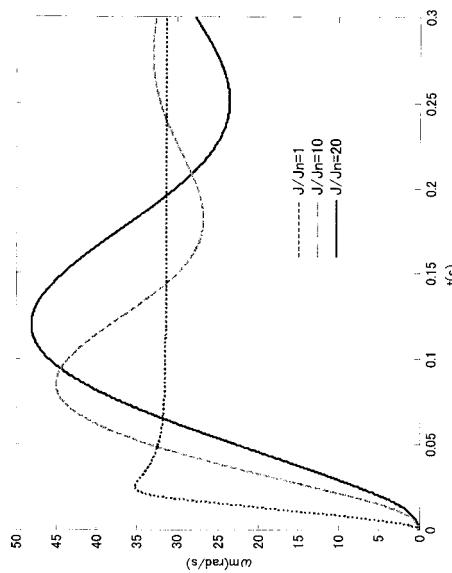
【 囧 5 】



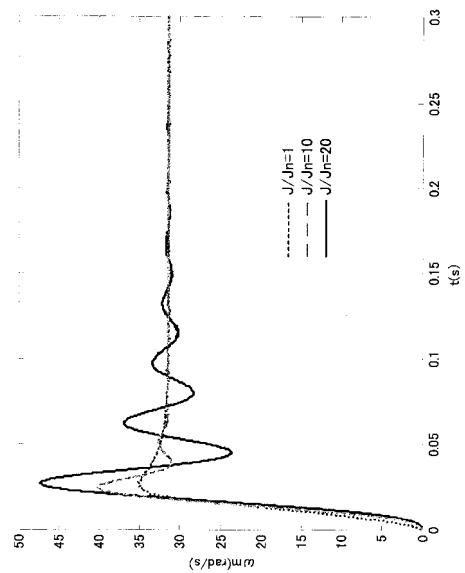
【図6】



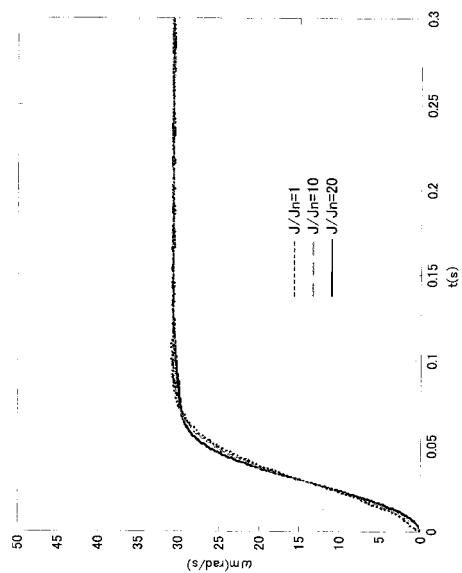
【図7】



【 四 8 】



【図9】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2005/093939(WO,A1)

国際公開第00/070739(WO,A1)

山田耕嗣、駒田諭、石田宗秋、堀孝正、外乱オブザーバの高次数化とロバスト安定性に関する考察、電気学会論文誌C、日本、社団法人電気学会、1997年11月20日、第117-C巻、第12号、第1776-1781ページ

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H02P 29/00

G05B 13/02