

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2017年12月28日(28.12.2017)



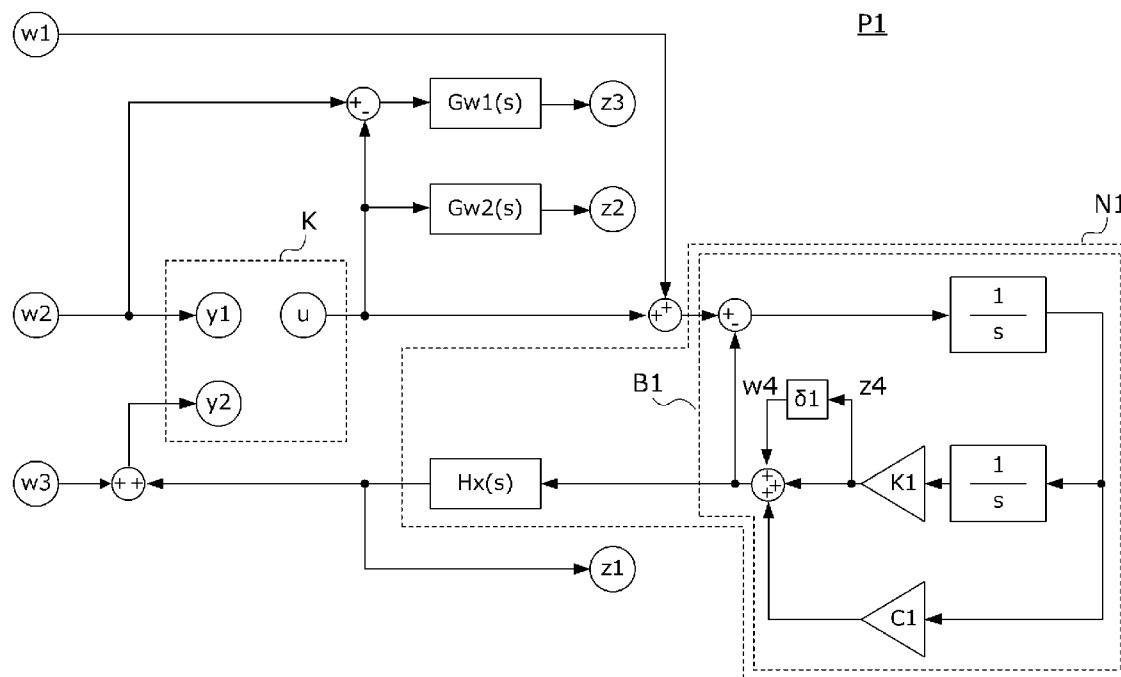
(10) 国際公開番号

WO 2017/221876 A1

- (51) 国際特許分類:
G01M 13/02 (2006.01) *G05B 13/04* (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/022496
- (22) 国際出願日: 2017年6月19日(19.06.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-123682 2016年6月22日(22.06.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社明電舎 (MEIDENSHA CORPORATION) [JP/JP]; 〒1416029 東京都品川区大崎2丁目1番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 秋山 岳夫 (AKIYAMA, Takao); 〒1416029 東京都品川区大崎2丁目1番1号 株式会社明電舎内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 正林 真之, 外(SHOBAYASHI, Masayuki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内1-7-12 サビアタワー Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

(54) **Title:** RESONANCE SUPPRESSION CONTROL CIRCUIT AND TESTING SYSTEM EMPLOYING SAME, AND METHOD OF DESIGNING RESONANCE SUPPRESSION CONTROL CIRCUIT

(54) 発明の名称: 共振抑制制御回路及びこれを用いた試験システム並びに共振抑制制御回路の設計方法



(57) **Abstract:** The objective of the present invention is to provide a resonance suppression control circuit capable of providing operation that is stable with respect to variations with a low order mode of vibration while at the same time suppressing spill-over due to a high order mode of vibration. This resonance suppression control circuit controls a physical system having two or more modes of vibration, and suppresses resonance in a low order mode of vibration that is the lowest order mode of vibration from among the plurality of modes of vibration. The resonance suppression control circuit

NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

is provided with a controller that is designed by means of a μ design method, using a generalized plant P1 provided with a nominal model N1, and a structured perturbation to the generalized plant. The nominal model N1 is represented by the product of a low order vibration mode transfer function M1 (s) having the low order mode of vibration to be suppressed, and a high order vibration mode transfer function Hx (s) having a high order mode of vibration. The structured perturbation includes a first parameter perturbation term $\delta 1$ which imparts a multiplicative error to a spring constant K1 included in the vibration mode transfer function M1 (s) to be suppressed.

(57) 要約: 目的は、低次の振動モードの変動に対して安定した動作を与えつつ同時に高次の振動モードによるスピルオーバーを抑制できる共振抑制制御回路を提供すること。共振抑制制御回路は、2以上の振動モードを有する物理系を制御対象とし、複数の振動モードのうち最も低次の低次振動モードにおける共振を抑制する。共振抑制制御回路は、ノミナルモデルN1を備える一般化プラントP1と、一般化プラントに対する構造化摂動と、を用いて μ 設計法によって設計されたコントローラを備える。ノミナルモデルN1は、抑制対象である低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数M1 (s)と、高次振動モードを有する高次振動モード伝達関数Hx (s)と、の積によって表され、構造化摂動は、抑制対象振動モード伝達関数M1 (s)に含まれるばね定数K1に対し乗法的誤差を与える第1パラメータ摂動項 $\delta 1$ を含む。

明 細 書

発明の名称：

共振抑制制御回路及びこれを用いた試験システム並びに共振抑制制御回路の設計方法

技術分野

[0001] 本発明は、複数の振動モードを有する物理系を制御対象とし、これら複数の振動モードのうち少なくとも1つの振動モードにおける共振を抑制する共振抑制制御回路と、この共振抑制制御回路を用いた試験システムと、この共振抑制制御回路の設計方法と、に関する。

背景技術

[0002] ドライブトレインとは、エンジンで発生したエネルギーを駆動輪に伝達するための複数の装置の総称をいい、エンジン、クラッチ、トランスミッション、ドライブシャフト、プロペラシャフト、デファレンシャルギヤ、及び駆動輪などで構成される。ドライブトレインの性能評価試験では、実際にエンジンでトランスミッションを駆動し続けることにより、その耐久性能や品質などが評価される。近年では、このようなドライブトレインの試験を行うシステムとして、ワークに入力する駆動トルクを、実エンジンの代わりにモータで発生させるものが提案されている（例えば、特許文献1参照）。

[0003] 実エンジンでは各気筒における燃焼工程に起因して周期的なトルク変動が生じるところ、上記特許文献1に示されたシステムでは、一定の駆動トルクを発生させるための直流成分に正弦波による交流成分を合算することにより、モータで発生する駆動トルクを擬似的に変動させている。

[0004] しかしながら供試体とダイナモメータとを軸で結合して構成される上記のような試験システムには所定の共振周波数で特徴付けられる固有の振動モードが存在するため、モータへのトルク電流指令信号を周期的に変動させると、その周波数が試験システムに固有の共振周波数を通過するときに、共振振動を起こしてしまうおそれがある。そこで特許文献2の試験システムでは、

H ∞ 制御や μ 設計などの制御系設計方法を用いて設計された共振抑制制御回路を利用してトルク電流指令信号を発生することによって、このような共振の発生を抑制している。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2002-71520号公報

特許文献2：国際公開第2015/136626号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] ここで特許文献2に示された共振抑制制御回路には、幾つかの課題がある。1つ目に、抑制対象とする振動モードの共振周波数は、様々な要因によって若干変動するが、特許文献2の共振抑制制御回路は、その設計段階において上記のような共振周波数の変動を考慮していない。ここで抑制対象とする共振周波数の変動を引き起こす要因としては、供試体が交換されることによってその機械特性が設計段階で想定していたものから変化する場合や、供試体の状態（例えば、トルクコンバータを備えるAT車のドライブトレインを供試体とした場合、そのロックアップ動作の有無）によってその慣性モーメントが変化する場合等が挙げられる。このため特許文献2の共振抑制制御回路では、上記のような共振周波数の変動に起因して制御が不安定になる場合がある。

[0007] 2つ目に、特許文献2に示された共振抑制制御回路は、物理系を2つの剛体をばねで連結して構成される所謂2慣性系で近似したものをノミナルモデルとして設計されるが、この2慣性系は理論的には1つの振動モードしか有していない。しかしながら実際の物理系には複数の振動モードが存在しているため、このような2慣性系をノミナルモデルとして設計された共振抑制制御回路を実際の物理系に適用すると、設計時に無視された高次の複数の振動モードの影響によって制御が不安定になるスピルオーバーが生じる場合がある

。

[0008] もっとも第1の課題を解決するには、ノミナルモデルを構成する複数のパラメータのうち共振周波数の変動に影響を及ぼすものに対して摂動項を規定しておき、 μ 設計法によってこのような共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することが考えられる。また第2の課題を解決するには、ノミナルモデルを複数の振動モードを有する3以上の多慣性系に拡張することが考えられる。しかしながら、これら2つの課題を同時に解決することは困難であると考えられる。すなわち、特許文献2で規定されている2慣性系では、振動モードの共振周波数はばね剛性又は慣性モーメントによって変動するため、第1の課題を解決すべく共振周波数の変動を想定した摂動項を導入することは比較的容易である。しかしながら第2の課題を解決すべくノミナルモデルを3以上の多慣性系に拡張すると、各振動モードの共振周波数の変動は多慣性系を構成する多くのパラメータと相関があるため、共振周波数の変動を想定した摂動項の導入は容易でなくなり、第1の課題を解決することが困難になる。

[0009] 本発明は、上記のような課題に鑑みてなされたものであり、低次の振動モードの変動に対して安定した動作を与えつつ同時に高次の振動モードによるスピルオーバを抑制できる共振抑制制御回路と、この共振抑制制御回路を備える試験システムと、この共振抑制制御回路の設計方法と、を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0010] (1) 共振抑制制御回路（例えば、後述の共振抑制制御回路5）は、電動機（例えば、後述の駆動モータ2）と供試体（例えば、後述の供試体W）とを軸で結合して構成され2以上の複数の振動モードを有する物理系を制御対象とし、前記電動機への入力を与えることによって前記複数の振動モードのうち少なくとも1つの振動モードにおける共振を抑制するものであって、前記共振抑制制御回路は、前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの前記制御対象の入出力特性を模したノミナルモデル（例えば、後述のノ

ミナルモデル $N_1 \sim N_{12}$)を備える一般化プラント(例えば、後述の一般化プラント $P_1 \sim P_{12}$)と、当該一般化プラントに対する構造化摂動(例えば、後述の構造化摂動 Δ)と、を用いて μ 設計法と称される制御系設計方法によって設計されたコントローラ(例えば、後述の $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$)を備え、前記ノミナルモデルは、前記複数の振動モードのうちの1つを抑制対象とし、当該抑制対象の振動モード(例えば、後述の低次振動モード R_1)を有する抑制対象振動モード伝達関数(例えば、後述の低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$, $M_2(s)$)と、前記抑制対象の振動モードよりも高次の振動モード(例えば、後述の高次振動モード R_2 , R_3)を有する高次振動モード伝達関数(例えば、後述の高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$)と、の積によって表され、前記構造化摂動は、前記抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータ(例えば、後述のばね定数 K_1 , K_2 、単位慣性モーメント J 、第1慣性モーメント J_1 、及び第2慣性モーメント J_2)に対する摂動項(例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 及び第2パラメータ摂動項 δ_2)を少なくとも1つ含む。

[0011] (2) この場合、前記抑制対象振動モード伝達関数には、所定の慣性モーメント(例えば、後述の単位慣性モーメント J)を有する慣性体と固定壁とを所定のばね定数(例えば、後述のばね定数 K_1)及び減衰定数(例えば、後述の減衰定数 C_1)を有する軸要素で連結して構成される1自由度振動系における前記慣性体への入力から前記軸要素における出力までの伝達関数(例えば、後述の低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$)が用いられることが好ましい。

[0012] (3) この場合、前記構造化摂動は、前記ばね定数(例えば、後述のばね定数 K_1)に対する摂動項(例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1)を含むことが好ましい。

[0013] (4) この場合、前記構造化摂動は、前記慣性モーメント(例えば、後述の単位慣性モーメント J)に対する摂動項(例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1)を含むことが好ましい。

[0014] (5) この場合、前記抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とした場合、前記ばね定数 K_1 、前記減衰定数 C_1 、及び前記抑制対象振動モード伝達関数 $M_1(s)$ は、下記式(1)によって表されることが好ましい。

[数1]

$$K_1 = p_R \cdot p_R^*, \quad C_1 = -(p_R + p_R^*), \quad M_1(s) = \frac{C_1 \cdot s + K_1}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (1)$$

[0015] (6) この場合、前記抑制対象振動モード伝達関数には、所定の第1慣性モーメント（例えば、後述の第1慣性モーメント J_1 ）を有する第1慣性体と所定の第2慣性モーメント（例えば、後述の第2慣性モーメント J_2 ）を有する第2慣性体とを所定のばね定数（例えば、後述のばね定数 K_2 ）及び減衰定数（例えば、後述の減衰定数 C_2 ）を有する軸要素で連結して構成される2慣性系において前記第1慣性体への入力から前記軸要素における出力までの伝達関数（例えば、後述の低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ ）が用いられることが好ましい。

[0016] (7) この場合、前記構造化摂動は、前記ばね定数（例えば、後述のばね定数 K_2 ）に対する摂動項（例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 ）を含むことが好ましい。

[0017] (8) この場合、前記構造化摂動は、前記第2慣性モーメント（例えば、後述の第2慣性モーメント J_2 ）に対する摂動項（例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 ）を含むことが好ましい。

[0018] (9) この場合、前記構造化摂動は、前記第1慣性モーメント（例えば、後述の第1慣性モーメント J_1 ）に対する摂動項（例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 ）を含むことが好ましい。

[0019] (10) この場合、前記構造化摂動は、前記ばね定数（例えば、後述のばね定数 K_2 ）に対する摂動項（例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 ）と前記第2慣性モーメント（例えば、後述の第2慣性モーメント J_2 ）に対する摂動項（例えば、後述の第2パラメータ摂動項 δ_2 ）とを含むことが好

ましい。

[0020] (11) この場合、前記抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とし、前記第1慣性モーメントを“ J_1 ”とし、前記第2慣性モーメントを“ J_2 ”とした場合、前記ばね定数 K_2 、前記減衰定数 C_2 、及び前記抑制対象振動モード伝達関数 $M_2(s)$ は、下記式(2)によって表されることが好ましい。

[数2]

$$K_2 = \frac{p_R \cdot p_R^*}{\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}}, \quad C_2 = -\frac{p_R + p_R^*}{\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}}, \quad M_2(s) = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{C_2 \cdot s + K_2}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (2)$$

[0021] (12) この場合、前記高次振動モード伝達関数は、当該高次振動モード伝達関数及び前記抑制対象振動モード伝達関数を乗算して得られる伝達関数と前記制御対象における前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの伝達関数とが一致するように同定されることが好ましい。

[0022] (13) 試験システム（例えば、後述の試験システムS）は、供試体（例えば、後述の供試体W）と軸（例えば、後述の連結軸S1）を介して連結された電動機（例えば、後述の駆動モータ2）と、前記軸で発生する軸トルクを検出する軸トルクメータ（例えば、後述の軸トルクメータ6）と、前記電動機に電力を供給するインバータ（例えば、後述のインバータ3）と、前記電動機の発生トルクに対する指令信号及び前記軸トルクメータの検出信号を用いて、前記軸における共振が抑制されるように前記電動機に対するトルク電流指令信号を生成し、当該トルク電流指令信号を前記インバータに入力する共振抑制制御回路（例えば、後述の共振抑制制御回路5）と、を備えるものであって、前記共振抑制制御回路には、(1)から(12)の何れかに記載のものが用いられる。

[0023] (14) 共振抑制制御回路（例えば、後述の共振抑制制御回路5）は、電動機（例えば、後述の駆動モータ2）と供試体（例えば、後述の供試体W）とを軸（例えば、後述の連結軸S1）で結合して構成され2以上の複数の振

動モードを有する物理系を制御対象とし、前記電動機への入力を与えることによって前記複数の振動モードのうち少なくとも1つの振動モードにおける共振を抑制する機能を有する。このような機能を有する共振抑制制御回路の設計方法は、前記複数の振動モードのうちの1つを抑制対象とし、当該抑制対象の振動モードを有する抑制対象振動モード伝達関数（例えば、後述の低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$ 、 $M_2(s)$ ）と、前記抑制対象の振動モードよりも高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数（例えば、後述の高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ ）との積によって、前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの前記制御対象の入出力特性を模したノミナルモデル（例えば、後述のノミナルモデル $N_1 \sim N_{12}$ ）を備える一般化プラント（例えば、後述の一般化プラント $P_1 \sim P_{12}$ ）を規定し、前記一般化プラントのうち前記抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータに対する摂動項（例えば、後述の第1パラメータ摂動項 δ_1 及び第2パラメータ摂動項 δ_2 ）を少なくとも1つ含む構造化摂動（例えば、後述の構造化摂動 Δ ）を規定し、前記規定された一般化プラント及び構造化摂動を用いて μ 設計法と呼称される制御系設計方法によって前記共振抑制制御回路を設計する。

発明の効果

[0024] （1）本発明では、複数の振動モードを有する制御対象における電動機への入力から軸トルクにおける出力までの入出力特性を模したノミナルモデルを、抑制対象とする振動モードを有する抑制対象振動モード伝達関数と、この抑制対象振動モードより高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数と、の積によって表す。そしてこのように抑制対象振動モードと高次振動モードとの両方を包含したノミナルモデルを有する一般化プラントと、この一般化プラントに対する構造化摂動と、を用いて μ 設計法によって共振抑制制御回路を設計する。これにより本発明の共振抑制制御回路によれば、高次振動モードによるスピルオーバを抑制できる。また本発明では、上述のようにノミナルモデルを抑制対象振動モード伝達関数と高次振動モード伝達関数

とに分離した上で、構造化摂動には、これら2つの伝達関数のうち抑制対象振動モードを包含する抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータに対する摂動項を少なくとも1つ含める。このような摂動項を導入することにより、本発明によれば、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0025] ここでノミナルモデルを2つの伝達関数に分離することの意義について説明する。一般的には、制御対象とする物理系の入出力特性は、既知のシステム同定法を利用すれば単一の伝達関数で表現することができる。しかしながら制御対象が複数の振動モードを有する場合、このようにして同定された伝達関数の関数形は次数が高くなりまた伝達関数を構成する複数のパラメータと抑制対象振動モードの共振周波数との相関関係は複雑になる。このため、抑制対象振動モードの共振周波数の変動を考慮するために、この共振周波数と相関があるパラメータのみを抽出し当該パラメータに摂動項を設定することは困難である。これに対し本発明では、上記のようにノミナルモデルを抑制対象振動モード伝達関数と高次振動モード伝達関数との積で表現することにより、抑制対象振動モード伝達関数の関数形を次数の低い簡易なもので表現できるので、抑制対象振動モードの共振周波数と相関のあるパラメータを抽出しやすく、したがって摂動項の設定も容易になる。以上より本発明の共振抑制制御回路によれば、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対して安定した動作を与えつつ同時に高次振動モードによるスピルオーバを抑制することもできる。

[0026] (2) 本発明では、抑制対象振動モード伝達関数には、慣性体と固定壁とを所定のばね定数及び減衰定数を有する軸要素で連結して構成される1自由度振動系における慣性体への入力から軸要素における出力までの伝達関数を用いる。これにより抑制対象振動モード伝達関数を次数の低い簡易な関数形で表現できるので、抑制対象とする抑制対象振動モードの共振周波数の変動を考慮するための摂動項の設定を容易にできる。

[0027] (3) 上述の1自由度振動系における共振周波数の大きさは、ばね定数の

大きさと相関があるところ、本発明では、このようなばね定数に対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0028] (4) 上述の1自由度振動系における共振周波数の大きさは、慣性モーメントの大きさと相関があるところ、本発明では、このような慣性モーメントに対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0029] (5) 本発明では、抑制対象振動モードの共振点に対応する抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とし、これらを用いて抑制対象振動モード伝達関数 $M_1(s)$ 、ばね定数 K_1 、及び減衰定数 C_1 を上記式(1)のように構成する。本発明では、抑制対象振動モード伝達関数をこのような簡易な構成にすることにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動を考慮するための摂動項の設定を容易にできる。

[0030] (6) 本発明では、抑制対象振動モード伝達関数には、第1慣性体と第2慣性体とを所定のばね定数及び減衰定数を有する軸要素で連結して構成される2慣性系における第1慣性体への入力から軸要素における出力までの伝達関数を用いる。これにより抑制対象振動モード伝達関数を次数の低い簡易な関数形で表現できるので、抑制対象とする抑制対象振動モードの共振周波数の変動を考慮するための摂動項の設定を容易にできる。

[0031] (7) 上述の2慣性系における共振周波数の大きさは、ばね定数の大きさと相関があるところ、本発明では、このようなばね定数に対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0032] (8) 上述の2慣性系における共振周波数の大きさは、第2慣性モーメントの大きさと相関があるところ、本発明では、このような第2慣性モーメントに対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築する

ことができる。

[0033] (9) 上述の2慣性系における共振周波数の大きさは、第1慣性モーメントの大きさと相関があるところ、本発明では、このような第1慣性モーメントに対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0034] (10) 上述の2慣性系における共振周波数の大きさは、ばね定数と第2慣性モーメントとの両方と大きさと相関があるところ、本発明では、これらばね定数及び第2慣性モーメント各々に対して摂動項を設定する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築することができる。

[0035] (11) 本発明では抑制対象振動モードの共振点に対応する抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とし、第1慣性モーメントを“ J_1 ”とし、さらに第2慣性モーメントを“ J_2 ”とし、これらを用いて抑制対象振動モード伝達関数 $M_2(s)$ 、ばね定数 K_2 、及び減衰定数 C_2 を上記式(2)のように構成する。本発明では、抑制対象振動モード伝達関数をこのような簡易な構成にすることにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動を考慮するための摂動項の設定を容易にできる。

[0036] (12) 本発明では、未知である高次振動モード伝達関数及び既知である抑制対象振動モード伝達関数を乗算して得られる伝達関数と、制御対象における電動機への入力から軸における軸トルクまでの伝達関数であって実測できるものとが一致するように、高次振動モード伝達関数を同定する。これにより、実際の制御対象の入出力特性を精度良く模したノミナルモデルを規定することができる。

[0037] (13) 本発明では、上記(1)～(12)の何れかの共振抑制制御回路を用いて電動機に対するトルク電流指令信号を生成し、これをインバータに入力する。これにより、供試体が交換されたり供試体の状態が変化したりすることによって試験システムの抑制対象振動モードの共振周波数に変動が生

じた場合であっても、安定した制御を実現しつつ、同時に高次振動モードの影響によるスピルオーバーも抑制できる。

[0038] (14) 本発明では、複数の振動モードを有する制御対象における電動機への入力から軸トルクにおける出力までの入出力特性を模したノミナルモデルを、抑制対象とする振動モードを有する抑制対象振動モード伝達関数と、この抑制対象振動モードより高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数と、の積によって表す。また本発明では、上述のようにノミナルモデルを抑制対象振動モード伝達関数と高次振動モード伝達関数とに分離した上で、構造化摂動には、これら2つの伝達関数のうち抑制対象振動モードを包含する抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータに対する摂動項を少なくとも1つ含める。そしてこのようなノミナルモデルを有する一般化プラントと、上述のような摂動項を含んだ構造化摂動と、を用いて μ 設計によって共振抑制制御回路を設計する。これにより、抑制対象振動モードの共振周波数の変動に対して安定した動作を与えつつ同時に高次振動モードによるスピルオーバーを抑制できる共振抑制制御回路を設計できる。

図面の簡単な説明

[0039] [図1]本発明の一実施形態に係る共振抑制制御回路及びこれを備える試験システム（3軸タイプのドライブレインベンチシステム）の構成を示す図である。

[図2]2軸タイプのドライブレインベンチシステムの構成を示す図である。

[図3] μ 設計法でコントローラを設計する際に用いられるフィードバック制御系の構成を示すブロック図である。

[図4]図3のフィードバック制御系に μ 設計法を適用して導出されるコントローラの構成を示すブロック図である。

[図5]実施例1の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図6]実施例2の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図7]実施例 1, 2 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図8]実施例 1, 2 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

[図9]実施例 3 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図10]実施例 4 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図11]実施例 3, 4 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図12]実施例 3, 4 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

[図13]実施例 5 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図14]実施例 6 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図15]実施例 5, 6 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図16]実施例 5, 6 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

[図17]実施例 7 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図18]実施例 8 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図19]実施例 7, 8 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図20]実施例 7, 8 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

[図21]実施例 9 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図22]実施例 10 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図23]実施例 9, 10に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図24]実施例 9, 10の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

[図25]実施例 11の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図26]実施例 12の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントの具体的な構成を示す図である。

[図27]実施例 11, 12に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。

[図28]実施例 11, 12の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。

発明を実施するための形態

[0040] 以下、本発明の一実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。

図1は、本実施形態に係る共振抑制制御回路5及びこれを備える試験システムSの構成を示す図である。なお以下では、図1に示すように供試体WをFF駆動方式の車両に搭載される3軸タイプのドライブトレインとした、所謂ドライブトレインベンチシステムについて説明するが、本発明はこれに限るものではない。例えば図2に示すように、供試体W'は、FR駆動方式の車両に搭載される2軸タイプのドライブトレインとしてもよい。

[0041] 試験システムSは、供試体Wと連結軸S1で連結された駆動モータ2と、この駆動モータ2に電力を供給するインバータ3と、連結軸S1で発生する軸トルクを検出する軸トルクメータ6と、駆動モータ2で発生させるトルクに対する指令に相当するトルク電流指令信号を生成する共振抑制制御回路5と、上記トルク電流指令信号のベースとなるベーストルク指令信号を生成するベーストルク指令生成回路7と、を備える。

[0042] 駆動モータ2の出力軸は、供試体Wの入力軸と連結軸S1を介して連結されており、駆動モータ2から供試体Wへ動力を伝達することが可能となっている。また、供試体Wの出力軸に相当するドライブシャフトS2の両端には

、供試体Wに対する負荷を発生する回生モータ8L、8Rが接続されている。なお図2の供試体W'では、その出力軸に相当するプロペラシャフトには、供試体W'に対する負荷を発生する回生モータ8が接続されている。軸トルクメータ6は、連結軸S1に発生する軸トルクを検出し、これに応じた軸トルク検出信号を共振抑制制御回路5に入力する。インバータ3は、共振抑制制御回路5から入力されるトルク電流指令信号に応じて駆動モータ2を駆動する。

[0043] ベーストルク指令生成回路7は、駆動モータ2を車両のドライブトレインである供試体Wに接続されるエンジンと見立てて、エンジントルクを模したベーストルク指令信号を生成する。ベーストルク指令生成回路7は、所定の大きさの直流信号に、エンジントルクに含まれるトルク脈動を模した所定の加振周波数の交流信号を重畳することによってベーストルク指令信号を生成する。

[0044] 共振抑制制御回路5は、ベーストルク指令生成回路7によって生成されたベーストルク指令信号と、軸トルクメータ6から入力される軸トルク検出信号と、に基づいてトルク電流指令信号を生成し、これをインバータ3に入力する。

[0045] 以上のような構成により、試験システムSでは、エンジンのトルク脈動を模した変動を含む擬似的なエンジントルクを駆動モータ2で発生させ、このトルクを供試体Wに入力することによって、この供試体Wの耐久性能や品質等が評価される。

[0046] ここで、共振抑制制御回路5の機能について説明する。試験システムSにおいてインバータ3、駆動モータ、供試体W、連結軸S1、及び軸トルクメータ6によって構成される物理系には、2以上の複数の振動モード（例えば、後述の図7における振動モードR1、R2、R3等を参照）が存在する。一方、上記のようにベーストルク指令信号はトルク脈動を模した加振周波数の交流信号を含んだものとなっている。このため、ベーストルク指令生成回路7で生成されたベーストルク指令信号を、共振抑制制御回路5を経ずにそ

のままインバータ 3 に入力すると、連結軸 S 1 において共振が発生する場合がある。共振抑制制御回路 5 は、上記物理系において想定される複数の振動モードのうち少なくとも 1 つ、より具体的には最も低次の振動モード（例えば、後述の図 7 における低次振動モード R 1）を抑制対象とし、この低次振動モードにおける共振が抑制されるようにベーストルク指令信号からトルク電流指令信号を生成する。換言すれば、共振抑制制御回路 5 は、図 1 に示すようにベーストルク指令生成回路 7 とインバータ 3 との間に組み込まれたときに、上記物理系への入力に相当するベーストルク指令信号から上記物理系の出力に相当する軸トルク検出信号までの入出力特性において、抑制対象とする低次振動モードにおけるゲインを下げるようにトルク電流指令信号を生成し、インバータ 3 へ入力する。以下では、このような共振抑制制御回路 5 の機能を共振抑制機能ともいう。

[0047] 以上のような共振抑制機能を備えた共振抑制制御回路 5 は、図 3 に示すようなフィードバック制御系に μ 設計法と呼称されるロバスト制御系設計方法によって設計されたコントローラを電子計算機に実装して構成されたものが用いられる。

[0048] 図 3 のフィードバック制御系は、外部入力 $w_1, \dots, w_n$ (n は、2 以上の整数) 及び制御入力 u で構成される複数の入力と制御出力 $z_1, \dots, z_n$ 及び観測出力 y_1, y_2 で構成される複数の出力との間で所定の入出力特性を有する一般化プラント P と、一般化プラント P の観測出力 y_1, y_2 を用いて一般化プラント P に対し制御入力 u を与えるコントローラ K と、一般化プラント P の制御出力 $z_1, \dots, z_n$ を用いて一般化プラント P に対し外部入力 $w_1, \dots, w_n$ を与える構造化摂動 Δ と、を組み合わせで構成される。

[0049] 一般化プラント P は、後述の各実施例で説明するように、図 1 の試験システム S におけるインバータ 3、駆動モータ 2、連結軸 S 1、供試体 W 、及び軸トルクメータ 6 によって構成される物理系を制御対象とし、この制御対象のインバータ 3 へのトルク電流指令信号から軸トルクメータ 6 における軸トルク検出信号までの入出力特性を模したノミナルモデルと、上述の共振抑制

機能を制御性能として反映させるための複数の重み関数と、によって構成される。

[0050] 図4は、図3のフィードバック制御系に μ 設計法を適用して導出されるコントローラKの構成を示す図である。コントローラKは、ベーストルク指令信号に相当する観測出力 y_1 及び軸トルク検出信号に相当する観測出力 y_2 から成る2つの入力からトルク電流指令信号に相当する制御入力 u を出力する2自由度制御系とし、具体的には図4に示すように2つの伝達関数 $G_{c1}(s)$ 及び $G_{c2}(s)$ を組み合わせる構成する。

[0051] 図3に戻り構造化摂動 Δ は、制御出力 $z_1, \dots, z_n$ から外部入力 $w_1, \dots, w_n$ への間で摂動を与える複素行列である。この構造化摂動 Δ は、その対角要素として、一般化プラントPに含まれる1以上のパラメータに対し変動を与える1以上のパラメータ摂動項 $\delta_1, \delta_2, \dots$ と、ロバスト制御性能の評価を μ 設計の枠組みに組み込むために導入される仮想摂動項 δ_F とを含み、その他の非対角要素は0である。

[0052] μ 設計法では、図3に示すような一般化プラントPとコントローラKによって構成される閉ループ系に対して構造化摂動 Δ が設定されたフィードバック制御系を定義し、所望のロバスト安定性及びロバスト制御性能を達成するコントローラK（すなわち、伝達関数 $G_{c1}(s)$ 及び $G_{c2}(s)$ ）を数値計算によって設計し、これを共振抑制制御回路5として用いる。より具体的には、 μ 設計法では、一般化プラントP、構造化摂動 Δ 、及びコントローラKを用いて定義される構造化特異値 μ の値が所定の条件を満たすようなコントローラKを、例えばD-Kイタレーションと呼称されるアルゴリズムを利用して求めることにより、ロバスト安定性及びロバスト制御性能を達成するコントローラKを導出する。なお、 μ 設計法によってコントローラKを数値的に導出するさらに具体的な手順については、例えば劉康志著、「線形ロバスト制御」、コロナ社、2002年や、野波健蔵編著、西村秀和、平田光男共著、「MATLABによる制御系設計」、東京電機大学出版局、1998年等に詳しく説明されているので、ここでは詳細な説明を省略する。以下

、共振抑制制御回路と、これを μ 設計法に基づいて導出する際に必要となる一般化プラントと、について実施例毎に説明する。

実施例 1

[0053] 次に、実施例 1 の共振抑制制御回路とその設計方法について説明する。

図 5 は、実施例 1 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P 1 の具体的な構成を示す図である。

[0054] 実施例 1 の一般化プラント P 1 は、制御対象におけるトルク電流指令信号から軸トルクセンサの軸トルク検出信号までの入出力特性を模したノミナルモデル N 1 と、複数の重み関数 $G_{w1}(s)$ 、 $G_{w2}(s)$ と、を組み合わせ構成される。

[0055] ノミナルモデル N 1 の伝達関数 $G(s)$ は、上述のように制御対象が有する複数の振動モードのうち最も低次の振動モードを抑制対象とし、この低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ と、抑制対象の低次振動モードよりも高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数 $Hx(s)$ との積 ($G(s) = Hx(s) \cdot M1(s)$) によって表現される。

[0056] 低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ には、単位慣性モーメント J (以下では、 $J = 1$ とし、その図示等を省略する) を有する慣性体と固定壁とを所定のばね定数 $K1$ 及び減衰定数 $C1$ を有する軸要素で連結して構成される 1 自由度振動系における、慣性体に作用するトルクから軸要素で発生するトルクまでの伝達関数であって、抑制対象の振動モードに対応する極を有するものが用いられる。より具体的には、伝達関数 $M1(s)$ における極を " p_R " とし、その複素共役を " p_R^* " とした場合、ばね定数 $K1$ 、減衰定数 $C1$ 、及び低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ は、下記式 (3) のように表される。またこの低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ は、図 5 のブロック図では、ブロック B 1 によって表される。

[数3]

$$K1 = p_R \cdot p_R^*, \quad C1 = -(p_R + p_R^*), \quad M1(s) = \frac{C1 \cdot s + K1}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (3)$$

[0057] 高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ には、抑制対象の低次振動モードよりも高次の振動モードを複数有する伝達関数が用いられる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ は、実際の制御対象におけるトルク電流指令信号から軸トルク検出信号までの伝達関数を測定しておき、これと2つの伝達関数の積 $H_x(s) \cdot M_1(s)$ とが一致するように、既知のシステム同定法を利用することによって同定される。

[0058] なお、上記のようにして高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ を同定する際、その関数形は、例えば下記式(4)に示す $H_1(s)$ 又は $H_2(s)$ で仮定する。ここで下記式(4)において“ $b(s)$ ”及び“ $a(s)$ ”は、それぞれ最高次数係数を1とした任意の次数の多項式である。また下記式(4)において“ g ”は、ノミナルモデル N_1 の伝達関数 $G(s)$ の分母多項式の最高次数係数を1とした場合の、分子多項式の最高次数係数である。下記式(4)における分母多項式 $a(s)$ 及び分子多項式 $b(s)$ の各係数、及び最高次数係数 g の値は、伝達関数 $M_1(s)$ の極を表す複素数 p_R の値と併せて、上記のように既知のシステム同定法を利用して同定される。なお以下では、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の具体的な関数形は $H_1(s)$ とした場合について説明するが、これに限らず $H_x(s)$ の関数形は $H_2(s)$ としてもよい。なお、関数形を $H_1(s)$ とした場合、ノミナルモデル N_1 の再現性が向上するという利点があり、関数形を $H_2(s)$ とした場合、 $H_1(s)$ と比べて次数が低い分だけ演算及び実装が容易になるという利点がある。

[数4]

$$H1(s) = \frac{g}{Cs + K} \cdot \frac{b(s)}{a(s)}, \quad H2(s) = \frac{g}{K} \cdot \frac{b(s)}{a(s)} \quad (4)$$

[0059] 第1外部入力 w_1 は、インバータのトルク制御誤差を評価するための入力信号であり、第1制御出力 z_1 は、軸トルク検出信号を評価するための出力信号である。ノミナルモデル N_1 には、第1外部入力 w_1 とコントローラ K から出力される制御入力 u とを合算したものが入力される。また第1制御出

力 z_1 には、ノミナルモデル N_1 の出力信号が用いられる。第 1 外部入力 w_1 によってノミナルモデル N_1 に含まれる振動モードが励起される。また第 1 制御出力 z_1 によって振動モードが評価されることで、ノミナルモデル N_1 に含まれる振動モードが低下するような共振抑制制御回路が得られる。

[0060] 第 2 外部入力 w_2 は、ベーストルク指令信号に相当する入力信号であり、第 1 観測出力 y_1 としてコントローラ K に入力される。第 2 制御出力 z_2 は、コントローラ K から出力される制御入力 u に所定の第 2 重み関数 $G_{w_2}(s)$ を乗じて得られる出力信号である。この第 2 重み関数 $G_{w_2}(s)$ の具体的な関数形は、共振抑制制御回路の高域のゲインが低下するように設定される。

[0061] 第 3 外部入力 w_3 は、軸トルク検出信号に対するノイズに相当する入力信号である。第 3 外部入力 w_3 とノミナルモデル N_1 の出力信号とを合算したものは、第 2 観測出力 y_2 としてコントローラ K に入力される。第 3 制御出力 z_3 は、コントローラ K から出力される制御入力と第 2 外部入力 w_2 の偏差に所定の第 1 重み関数 $G_{w_1}(s)$ を乗じて得られる出力信号である。この第 1 重み関数 $G_{w_1}(s)$ の具体的な関数形は、抑制対象とする低次振動モードより低域では積分特性を持つように設定される。これにより、抑制対象の低次振動モードよりも低域の共振抑制制御回路のゲインを低下させることができる。

[0062] 第 4 外部入力 w_4 及び第 4 制御出力 z_4 は、実際の制御対象とノミナルモデル N_1 との間の様々な誤差（以下、「モデル誤差」ともいう）のうち、抑制対象とする低次振動モードの共振周波数の変動による影響を評価するためにノミナルモデル N_1 に対して設定される入出力信号である。これら第 4 外部入力 w_4 及び第 4 制御出力 z_4 は、図 5 に示すように低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のあるばね定数 K_1 の出力端において、このばね定数 K_1 に対して乗法的誤差を与えるように設定される。

[0063] また低次振動モードの共振周波数に直接的に変動を及ぼすばね定数 K_1 の乗法的誤差に対してロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第4制御出力 z_4 と第4外部入力 w_4 との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の1つを構成する第1パラメータ摂動項 δ_1 が設定される（図3参照）。またこのような変動プラントに対する制御性能を保証するため、第1～第3制御出力 $z_1 \sim z_3$ と第1～第3外部入力 $w_1 \sim w_3$ の間には、構造化摂動 Δ の対角要素の1つを構成する仮想摂動項 δ_F が設定される。実施例1の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_1 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 2

[0064] 図6は、実施例2の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P_2 の具体的な構成を示す図である。

[0065] 実施例2に係る一般化プラント P_2 は、ノミナルモデル N_2 の構成が実施例1に係る一般化プラント P_1 と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$ と乗算する順序が実施例1に係るノミナルモデル N_1 と逆である点で異なり、他の構成は同じである。実施例2の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_2 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

[0066] 図7は、実施例1, 2に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図7には、図5及び図6に示すように第1パラメータ摂動項 δ_1 が設定されたノミナルモデルにおいて、第1パラメータ摂動項 δ_1 の値（以下、単に「摂動量」という）を0としたものを実線で示し、摂動量を+0.2とし、ばね定数 K_1 を20%増加させたものを破線で示し、摂動量を-0.2とし、ばね定数 K_1 を-20%減少させたものを一点鎖線で示す。なお図7では、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形は式(4)で定義される $H_1(s)$ とした。

[0067] 図7に示すように、実施例1, 2に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までの特性には、低次側から順に振動モ

ードR 1, R 2, R 3が存在する。また図7に示すように摂動量を変化させると、これら3つの振動モードR 1～R 3のうち最も低次の低次振動モードR 1の共振周波数は変化するが、低次振動モードR 1より高次の高次振動モードR 2, R 3の共振周波数は変化しない。より具体的には、摂動量を正側に变化させると、低次振動モードR 1の共振周波数は低周波数側へ変化し、摂動量を負側に变化させると、低次振動モードR 1の共振周波数は高周波数側へ変化する。したがって、実施例1, 2の一般化プラントによれば、図5及び図6に示すように、低次振動モード伝達関数 $M_1(s)$ に含まれるばね定数 K_1 に対して乗法的誤差を与えるように第1パラメータ摂動項 δ_1 を設定することにより、抑制対象とする低次振動モードR 1の共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0068] 図8は、実施例1, 2の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図8には、標準偏差が1の正規分布ノイズをベーストルク指令信号として共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図8において左側の列は、図5のノミナルモデル N_1 において摂動量を0として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。また図8において右側の列は、上述のノミナルプラントモデルから低次振動モードの共振周波数に変動が生じた場合を想定して得られるモデル、より具体的には図5のノミナルモデル N_1 において摂動量を+0.6として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。

[0069] また図8における最上段は、無制御状態、すなわち上述のようなランダムなベーストルク指令信号をそのまま上記ノミナルプラントモデル又は変動プラントモデルに入力した場合の軸トルク検出信号の変化を示す。図8における上から2段目は、本願出願人による国際公開第2015/136626号公報に記載の共振抑制制御回路（以下、これを「先行技術の共振抑制制御回路」ともいう）を上記ノミナルプラントモデル又は変動プラントモデルに接続した場合の軸トルク検出信号の変化を示す。図8の上から3, 4段目は、実施例1又は実施例2の一般化プラントを用いて導出される共振抑制制御回

路を上記ノミナルプラントモデル又は変動プラントモデルに接続した場合の軸トルク検出信号の変化を示す。すなわち、実施例 1 又は実施例 2 の共振抑制制御回路の効果を示す図である。なお図 8 の上から 3 段目は、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形を $H_1(s)$ とした場合に得られる共振抑制制御回路の結果を示し、図 8 の上から 4 段目は、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形を $H_2(s)$ とした場合に得られる共振抑制制御回路の結果を示す。

[0070] 図 8 の最上段に示すように、ランダムなベーストルク指令信号を、共振抑制制御回路を経ずにそのままモデルに入力すると、軸トルク検出信号も大きく変動する。これに対し、図 8 の上から 2 段目の左側に示すように、先行技術の共振抑制制御回路を用いると、摂動が無い（すなわち、低次振動モードの共振周波数に変動が無い）ノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能が発揮され、軸トルク検出信号の振動が抑制される。しかしながら図 8 の上から 2 段目の右側に示すように、先行技術の共振抑制制御回路では、摂動が生じ、低次振動モードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた場合には、その共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になってしまう。

[0071] これに対し、実施例 1 又は実施例 2 の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図 8 の左側）及び変動プラントモデル（図 8 の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

実施例 3

[0072] 図 9 は、実施例 3 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P_3 の具体的な構成を示す図である。

[0073] 図 9 に示すように、実施例 3 に係る一般化プラント P_3 は、ノミナルモデ

ルN3のうち低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ を表したブロックB3の構成が実施例1に係る一般化プラントP1と異なる。より具体的には、ノミナルモデルN3は、低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ に対し第4外部入力 $w4$ 、第4制御出力 $z4$ 、及び第1パラメータ摂動項 $\delta1$ を設定する位置が実施例1に係るノミナルモデルN1と異なり、他の構成は同じである。

[0074] 第4外部入力 $w4$ 及び第4制御出力 $z4$ は、図9に示すように低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のある単位慣性モーメント $J(=1)$ に対して乗法的誤差を与えるように設定される。また低次振動モードの共振周波数に直接的に変動を及ぼす単位慣性モーメント J の乗法的誤差に対してロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第4制御出力 $z4$ と第4外部入力 $w4$ との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の1つを構成する第1パラメータ摂動項 $\delta1$ が設定される（図3参照）。実施例3の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラントP3を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 4

[0075] 図10は、実施例4の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントP4の具体的な構成を示す図である。

[0076] 実施例4に係る一般化プラントP4は、ノミナルモデルN4の構成が実施例3に係る一般化プラントP3と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $Hx(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M1(s)$ と乗算する順序が実施例3に係るノミナルモデルN3と逆である点で異なり、他の構成は同じである。実施例4の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラントP4を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

[0077] 図11は、実施例3、4に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図11には、図9及び図10に示すように第1パラメータ摂動項 $\delta1$ が設定されたノミナルモデルにおいて、摂動量を0としたものを実線で示し、摂動量を+0.2とし

、単位慣性モーメント J を 20% 増加させたものを破線で示し、摂動量を -0.2 とし、単位慣性モーメント J を -20% 減少させたものを一点鎖線で示す。なお図 11 では、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形は式 (4) で定義される $H_1(s)$ とした。

[0078] 図 11 に示すように、摂動量を増減すると、3つの振動モード $R_1 \sim R_3$ のうち最も低次の低次振動モード R_1 の共振周波数は変化するが、低次振動モード R_1 より高次の高次振動モード R_2 , R_3 の共振周波数は変化しない。より具体的には、摂動量を正側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は低周波数側へ変化し、摂動量を負側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は高周波数側へ変化する。したがって、実施例 3, 4 の一般化プラントによれば、図 9 及び図 10 に示すように、低次振動モード伝達関数 M_1 に含まれる単位慣性モーメント J に対して乗法的誤差を与えるように第 1 パラメータ摂動項 δ_1 を設定することにより、抑制対象とする低次振動モード R_1 の共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0079] 図 12 は、実施例 3, 4 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図 12 には、図 8 と同様のランダムなベーストルク指令信号を共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図 12 の左側の列は、図 9 のノミナルモデル N_3 において摂動量を 0 として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示し、図 12 の右側の列は、図 9 のノミナルモデル N_3 において摂動量を -0.35 として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。なお、図 12 の最上段は、無制御状態の軸トルク検出信号の変化を示し、図 12 の上から 2 段目は先行技術の共振抑制制御回路の結果を示し、図 12 の上から 3 段目及び 4 段目はそれぞれ $H_x(s)$ の関数形を $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ とした場合の実施例 3 又は実施例 4 の共振抑制制御回路の効果を示す。

[0080] 図 12 に示すように、先行技術の共振抑制制御回路は、摂動が無いノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮するが、低次振動モ

ードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた変動プラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になる。これに対し実施例3又は実施例4の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図12の左側）及び変動プラントモデル（図12の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

実施例 5

- [0081] 図13は、実施例5の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントP5の具体的な構成を示す図である。
- [0082] 実施例5に係る一般化プラントP5は、ノミナルモデルN5の構成が実施例1に係る一般化プラントP1と異なる。ノミナルモデルN5の伝達関数 $G(s)$ は、抑制対象とする低次振動モードR1を有する低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ と、この低次振動モードR1よりも高次の振動モードR2、R3を有する高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ との積（ $G(s) = H_x(s) \cdot M_2(s)$ ）によって表現される。
- [0083] 低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ には、所定の第1慣性モーメント J_1 を有する第1慣性体と所定の第2慣性モーメント J_2 を有する第2慣性体とを所定のばね定数 K_2 及び減衰定数 C_2 を有する軸要素で連結して構成される2自由度振動系における、第1慣性体に作用するトルクから軸要素で発生するトルクまでの伝達関数であって、抑制対象の低次振動モードR1に対応する極を有するものが用いられる。より具体的には、伝達関数 $M_2(s)$ における極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とした場合、ばね定数 K_2 、減衰定数 C_2 、及び低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ は、下記式（5）のように表される。またこの低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ は、図13のブロック図では、ブロックB5によって表される。なお、第1慣性モーメ

ント J 1 及び第 2 慣性モーメント J 2 の具体的な値は、既知の同定方法、例えば本願出願人による特許第 4 7 8 8 5 4 3 号に記載された同定方法によって同定された駆動モータ及び供試体の慣性モーメントの値が用いられる。

[数5]

$$K2 = \frac{P_R \cdot P_R^*}{\frac{1}{J1} + \frac{1}{J2}}, \quad C2 = -\frac{P_R + P_R^*}{\frac{1}{J1} + \frac{1}{J2}}, \quad M2(s) = \frac{1}{J1} \cdot \frac{C2 \cdot s + K2}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (5)$$

[0084] 高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ は、実施例 1 と同様に式 (4) に示す $H1(s)$ 又は $H2(s)$ によってその関数形を特定しておき、伝達関数 $M2(s)$ の極を表す複素数 p_R の値と併せて実施例 1 と同様に既知のシステム同定法を利用して同定される。

[0085] また第 4 外部入力 w_4 及び第 4 制御出力 z_4 は、図 1 3 に示すように低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M2(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のあるばね定数 $K2$ の出力端において、このばね定数 $K2$ に対して乗法的誤差を与えるように設定される。また低次振動モードの共振周波数に直接的に変動を及ぼすばね定数 $K2$ の乗法的誤差に対しロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第 4 制御出力 z_4 と第 4 外部入力 w_4 との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の 1 つを構成する第 1 パラメータ摂動項 δ_1 が設定される。実施例 5 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント $P5$ を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 6

[0086] 図 1 4 は、実施例 6 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント $P6$ の具体的な構成を示す図である。

[0087] 実施例 6 に係る一般化プラント $P6$ は、ノミナルモデル $N6$ の構成が実施例 5 に係る一般化プラント $P5$ と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M2(s)$ と乗算する順序が実施例 5 に係るノミナルモデル $N5$ と逆である点で異なり、他の構成は同じ

である。実施例 6 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_6 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

[0088] 図 15 は、実施例 5, 6 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図 15 には、図 13 及び図 14 に示すように第 1 パラメータ摂動項 δ_1 が設定されたノミナルモデルにおいて、摂動量を 0 としたものを実線で示し、摂動量を +0.2 とし、ばね定数 K_2 を 20% 増加させたものを破線で示し、摂動量を -0.2 とし、ばね定数 K_2 を -20% 減少させたものを一点鎖線で示す。なお図 15 では、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形は式 (4) で定義される $H_1(s)$ とした。

[0089] 図 15 に示すように、摂動量を増減すると、3 つの振動モード $R_1 \sim R_3$ のうち最も低次の低次振動モード R_1 の共振周波数は変化するが、低次振動モード R_1 より高次の高次振動モード R_2, R_3 の共振周波数は変化しない。より具体的には、摂動量を正側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は高周波数側へ変化し、摂動量を負側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は低周波数側へ変化する。したがって、実施例 5, 6 の一般化プラントによれば、図 13 及び図 14 に示すように、低次振動モード伝達関数 M_2 に含まれるばね定数 K_2 に対して乗法的誤差を与えるように第 1 パラメータ摂動項 δ_1 を設定することにより、抑制対象とする低次振動モード R_1 の共振周波数の変動に対するロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0090] 図 16 は、実施例 5, 6 の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図 16 には、図 8 と同様のランダムなベーストルク指令信号を共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図 16 の左側の列は、図 13 のノミナルモデル N_5 において摂動量を 0 として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示し、図 16 の右側の列は、図 13 のノミナルモデル N_5 において摂動量を +0.6 として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。なお、図 16 の最上段は、無

制御状態の軸トルク検出信号の変化を示し、図16の上から2段目は先行技術の共振抑制制御回路の結果を示し、図16の上から3段目及び4段目はそれぞれ $H \times (s)$ の関数形を $H1(s)$ 及び $H2(s)$ とした場合の実施例5又は実施例6の共振抑制制御回路の効果を示す。

[0091] 図16に示すように、先行技術の共振抑制制御回路は、摂動が無いノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮するが、低次振動モードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた変動プラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になる。これに対し実施例5又は実施例6の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図16の左側）及び変動プラントモデル（図16の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H1(s)$ 及び $H2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

実施例 7

[0092] 図17は、実施例7の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントP7の具体的な構成を示す図である。

[0093] 図17に示すように、実施例7に係る一般化プラントP7は、ノミナルモデルN7のうち低次振動モード伝達関数 $M2(s)$ を表したブロックB7の構成が実施例5に係る一般化プラントP5と異なる。より具体的には、ノミナルモデルN7は、低次振動モード伝達関数 $M2(s)$ に対し第4外部入力 $w4$ 、第4制御出力 $z4$ 、及び第1パラメータ摂動項 $\delta1$ を設定する位置が実施例5に係るノミナルモデルN5と異なり、他の構成は同じである。

[0094] 第4外部入力 $w4$ 及び第4制御出力 $z4$ は、図17に示すように低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M2(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のある第2慣性モーメント $J2$ に対して乗法的誤差を与えるように設定される。またこのよう

な第2慣性モーメント J_2 の乗法的誤差に対してロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第4制御出力 z_4 と第4外部入力 w_4 との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の1つを構成する第1パラメータ摂動項 δ_1 が設定される。実施例7の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_7 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 8

[0095] 図18は、実施例8の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P_8 の具体的な構成を示す図である。

[0096] 実施例8に係る一般化プラント P_8 は、ノミナルモデル N_8 の構成が実施例7に係る一般化プラント P_7 と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ と乗算する順序が実施例7に係るノミナルモデル N_7 と逆である点で異なり、他の構成は同じである。実施例8の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_8 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

[0097] 図19は、実施例7, 8に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図19には、図17及び図18に示すように第1パラメータ摂動項 δ_1 が設定されたノミナルモデルにおいて、摂動量を0としたものを実線で示し、摂動量を+0.2とし、第2慣性モーメント J_2 を20%増加させたものを破線で示し、摂動量を-0.2とし、第2慣性モーメント J_2 を-20%減少させたものを一点鎖線で示す。なお図19では、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ の関数形は式(4)で定義される $H_1(s)$ とした。

[0098] 図19に示すように、摂動量を正側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は低周波数側へ変化し、摂動量を負側に变化させると、低次振動モード R_1 の共振周波数は高周波数側へ変化する。したがって、実施例7, 8の一般化プラントによれば、図17及び図18に示すように、低次振動モード伝達関数 M_2 に含まれる第2慣性モーメント J_2 に対して乗法的誤差

を与えるように第1パラメータ摂動項 $\delta 1$ を設定することにより、抑制対象とする低次振動モードR1の共振周波数の変動に対してロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0099] 図20は、実施例7、8の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図20には、図8と同様のランダムなベーストルク指令信号を共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図20の左側の列は、図17のノミナルモデルN7において摂動量を0として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示し、図20の右側の列は、ノミナルモデルN7において摂動量を -0.5 として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。なお図20の最上段は、無制御状態の軸トルク検出信号の変化を示し、図20の上から2段目は先行技術の共振抑制制御回路の結果を示し、図20の上から3段目及び4段目はそれぞれ $H_1(s)$ の関数形を $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ とした場合の実施例7又は実施例8の共振抑制制御回路の効果を示す。

[0100] 図20に示すように、先行技術の共振抑制制御回路は、摂動が無いノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮するが、低次振動モードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた変動プラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になる。これに対し実施例7又は実施例8の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図20の左側）及び変動プラントモデル（図20の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

実施例 9

[0101] 図21は、実施例9の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラントP9の具体的な構成を示す図である。

[0102] 図 2 1 に示すように、実施例 9 に係る一般化プラント P 9 は、ノミナルモデル N 9 のうち低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ を表したブロック B 9 の構成が実施例 7 に係る一般化プラント P 7 と異なる。より具体的には、ノミナルモデル N 9 は、第 4 外部入力 w_4 、第 4 制御出力 z_4 、及び第 1 パラメータ摂動項 δ_1 を設定する位置が実施例 7 に係るノミナルモデル N 7 と異なり、他の構成は同じである。

[0103] 第 4 外部入力 w_4 及び第 4 制御出力 z_4 は、図 2 1 に示すように低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のある第 1 慣性モーメント J_1 に対して乗法的誤差を与えるように設定される。またこのような第 1 慣性モーメント J_1 の乗法的誤差に対してロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第 4 制御出力 z_4 と第 4 外部入力 w_4 との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の 1 つを構成する第 1 パラメータ摂動項 δ_1 が設定される。実施例 9 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P 9 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 10

[0104] 図 2 2 は、実施例 10 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P 10 の具体的な構成を示す図である。

[0105] 実施例 10 に係る一般化プラント P 10 は、ノミナルモデル N 10 の構成が実施例 9 に係る一般化プラント P 9 と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ と乗算する順序が実施例 9 に係るノミナルモデル N 9 と逆である点で異なり、他の構成は同じである。実施例 10 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P 10 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

[0106] 図 2 3 は、実施例 9, 10 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図 2 3 には、図

21及び図22に示すように第1パラメータ摂動項 $\delta 1$ が設定されたノミナルモデルにおいて、摂動量を0としたものを実線で示し、摂動量を+0.2とし、第1慣性モーメント $J 1$ を20%増加させたものを破線で示し、摂動量を-0.2とし、第1慣性モーメント $J 1$ を-20%減少させたものを一点鎖線で示す。なお図23では、高次振動モード伝達関数 $H x(s)$ の関数形は式(4)で定義される $H 1(s)$ とした。

[0107] 図23に示すように、摂動量を正側に变化させると、低次振動モード $R 1$ の共振周波数は低周波数側へ変化し、摂動量を負側に变化させると、低次振動モード $R 1$ の共振周波数は高周波数側へ変化する。したがって、実施例9, 10の一般化プラントによれば、図21及び図22に示すように、低次振動モード伝達関数 $M 2$ に含まれる第1慣性モーメント $J 1$ に対して乗法的誤差を与えるように第1パラメータ摂動項 $\delta 1$ を設定することにより、抑制対象とする低次振動モード $R 1$ の共振周波数の変動に対してロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0108] 図24は、実施例9, 10の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図24には、図8と同様のランダムなベーストルク指令信号を共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図24の左側の列は、図21のノミナルモデル $N 9$ において摂動量を0として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示し、図21の右側の列は、ノミナルモデル $N 9$ において摂動量を-0.3として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。なお、図21の最上段は、無制御状態の軸トルク検出信号の変化を示し、図21の上から2段目は先行技術の共振抑制制御回路の結果を示し、図21の上から3段目及び4段目はそれぞれ $H x(s)$ の関数形を $H 1(s)$ 及び $H 2(s)$ とした場合の実施例9又は実施例10の共振抑制制御回路の効果を示す。

[0109] 図24に示すように、先行技術の共振抑制制御回路は、摂動が無いノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮するが、低次振動モードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた変動プラント

モデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になる。これに対し実施例 9 又は実施例 10 の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図 24 の左側）及び変動プラントモデル（図 24 の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

実施例 11

- [0110] 図 25 は、実施例 11 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P_{11} の具体的な構成を示す図である。
- [0111] 図 25 に示すように、実施例 11 に係る一般化プラント P_{11} は、ノミナルモデル N_{11} のうち低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ を表したブロック B_{11} の構成が実施例 5 に係る一般化プラント P_5 と異なる。より具体的には、このノミナルモデル N_{11} に対し、第 5 外部入力 w_5 、第 5 制御出力 z_5 、及び第 2 パラメータ摂動項 δ_2 がさらに設定されている点において、実施例 5 のノミナルモデル N_5 と異なり、他の構成は同じである。
- [0112] 第 5 外部入力 w_5 及び第 5 制御出力 z_5 は、低次振動モードを有する低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ に含まれる複数のパラメータのうち、低次振動モードの共振周波数の大きさと相関のある第 2 慣性モーメント J_2 の出力端において、この第 2 慣性モーメント J_2 に対して乗法的誤差を与えるように設定される。また低次振動モードの共振周波数に直接的に変動を及ぼす第 2 慣性モーメント J_2 の乗法的誤差に対してロバスト安定な共振抑制制御回路が得られるようにするため、これら第 5 制御出力 z_5 と第 5 外部入力 w_5 との間には、構造化摂動 Δ の対角要素の 1 つを構成する第 2 パラメータ摂動項 δ_2 が設定される。実施例 11 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P_{11} を用いて μ 設計法に基づいて導出される。

実施例 12

- [0113] 図 26 は、実施例 12 の共振抑制制御回路の設計に用いられる一般化プラント P12 の具体的な構成を示す図である。
- [0114] 実施例 12 に係る一般化プラント P12 は、ノミナルモデル N12 の構成が実施例 11 に係る一般化プラント P11 と異なる。より具体的には、高次振動モード伝達関数 $H_x(s)$ と低次振動モード伝達関数 $M_2(s)$ と乗算する順序が実施例 11 に係るノミナルモデル N11 と逆である点で異なり、他の構成は同じである。実施例 12 の共振抑制制御回路は、以上のように構造化摂動 Δ が規定された一般化プラント P12 を用いて μ 設計法に基づいて導出される。
- [0115] 図 27 は、実施例 11, 12 に係るノミナルモデルにおけるベーストルク指令信号から軸トルク検出信号までのボード線図である。なお図 27 には、第 1 パラメータ摂動項 δ_1 の値（以下、「第 1 摂動量」という）及び第 2 パラメータ摂動項 δ_2 の値（以下、「第 2 摂動量」という）をともに 0 としたものを太実線で示す。第 1 摂動量を +0.2 とし、ばね定数 K_2 を 20% 増加させ、かつ第 2 摂動量を +0.2 とし、第 2 慣性モーメント J_2 を 20% 増加させたものを破線で示す。第 1 摂動量を -0.2 とし、ばね定数 K_2 を -20% 減少させ、かつ第 2 摂動量を +0.2 とし、第 2 慣性モーメント J_2 を 20% 増加させたものを一点鎖線で示す。第 1 摂動量を -0.2 とし、ばね定数 K_2 を -20% 減少させ、かつ第 2 摂動量を -0.2 とし、第 2 慣性モーメント J_2 を -20% 減少させたものを二点鎖線で示す。また第 1 摂動量を +0.2 とし、ばね定数 K_2 を 20% 増加させ、かつ第 2 摂動量を -0.2 とし、第 2 慣性モーメント J_2 を -20% 減少させたものを細実線で示す。
- [0116] 図 27 に示すように、第 1 及び第 2 摂動量を増減すると、3 つの振動モード R1 ~ R3 のうち最も低次の低次振動モード R1 の共振周波数は変化するが、高次振動モード R2, R3 の共振周波数は変化しない。したがって実施例 11, 12 の一般化プラントによれば、図 25 及び図 26 に示すように、

低次振動モード伝達関数 M_1 に含まれるばね定数 K_2 及び第2慣性モーメント J_2 に対して乗法的誤差を与えるように第1及び第2パラメータ摂動項 δ_1 , δ_2 を設定することにより、抑制対象とする低次振動モード R_1 の共振周波数の変動に対してロバスト安定性が保証された共振抑制制御回路を構築できる。

[0117] 図28は、実施例11, 12の共振抑制制御回路の性能を比較した図である。図28には、図8と同様のランダムなベーストルク指令信号を共振抑制制御回路に入力した場合の各種応答を示す。図28の左側の列は、図25のノミナルモデル N_{11} において第1及び第2摂動量をともに0として得られるノミナルプラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示し、図25の右側の列は、図25のノミナルモデル N_{11} において第1摂動量を+0.2としかつ第2摂動量を-0.2として得られる変動プラントモデルを制御対象とした場合の各種応答を示す。なお、図28の最上段は、無制御状態の軸トルク検出信号の変化を示し、図28の上から2段目は先行技術の共振抑制制御回路の結果を示し、図28の上から3段目及び4段目はそれぞれ $H_1(s)$ の関数形を $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ とした場合の実施例11又は実施例12の共振抑制制御回路の効果を示す。

[0118] 図28に示すように、先行技術の共振抑制制御回路は、摂動が無いノミナルプラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮するが、低次振動モードの共振周波数にノミナルプラントモデルから変動が生じた変動プラントモデルに対しては十分な共振抑制機能を発揮することなく、制御が不安定になる。これに対し実施例11又は実施例12の共振抑制制御回路によれば、ノミナルプラントモデル（図28の左側）及び変動プラントモデル（図28の右側）の両方において、軸トルク検出信号の標準偏差量は無制御状態から減少しており、したがって十分な共振抑制機能を発揮する。なお、高次振動モード伝達関数の関数形として $H_1(s)$ 及び $H_2(s)$ の何れを選んでも軸トルク検出信号の標準偏差量はほぼ同等であり、したがってほぼ同等の共振抑制機能を発揮するといえる。

[0119] 以上、本発明の一実施形態について説明したが、本発明はこれに限らない。本発明の趣旨の範囲内で、細部の構成を適宜変更してもよい。例えば上記実施形態では、実施例 1 ～ 12 の共振抑制制御回路を、車両のドライブトレインを供試体としたドライブトレインベンチシステムに適用した場合について説明したが、本発明はこれに限らない。すなわち、実施例 1 ～ 12 の共振抑制制御回路は、車両のエンジンを供試体とした所謂エンジンベンチシステムに適用してもよい。

符号の説明

- [0120] S … 試験システム
S 1 … 連結軸（軸）
W, W' … 供試体
2 … 駆動モータ（電動機）
5 … 共振抑制制御回路
6 … 軸トルクメータ
R 1 … 低次振動モード
R 2, R 3 … 高次振動モード
P 1 ～ P 12 … 一般化プラント
N 1 ～ N 12 … ノミナルモデル
M 1 (s), M 2 (s) … 低次振動モード伝達関数（抑制対象振動モード伝達関数）
H x (s) … 高次振動モード伝達関数
G c 1 (s), G c 2 (s) … コントローラ
 Δ … 構造化摂動
 δ 1 … 第 1 パラメータ摂動項（摂動項）
 δ 2 … 第 2 パラメータ摂動項（摂動項）

請求の範囲

[請求項1] 電動機と供試体とを軸で結合して構成され2以上の複数の振動モードを有する物理系を制御対象とし、前記電動機への入力を与えることによって前記複数の振動モードのうち少なくとも1つの振動モードにおける共振を抑制する共振抑制制御回路であって、

前記共振抑制制御回路は、前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの前記制御対象の入出力特性を模したノミナルモデルを備える一般化プラントと、当該一般化プラントに対する構造化摂動と、を用いて μ 設計法と呼称される制御系設計方法によって設計されたコントローラを備え、

前記ノミナルモデルは、前記複数の振動モードのうちの1つを抑制対象とし、当該抑制対象の振動モードを有する抑制対象振動モード伝達関数と、前記抑制対象の振動モードよりも高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数と、の積によって表され、

前記構造化摂動は、前記抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータに対する摂動項を少なくとも1つ含むことを特徴とする共振抑制制御回路。

[請求項2] 前記抑制対象振動モード伝達関数には、所定の慣性モーメントを有する慣性体と固定壁とを所定のばね定数及び減衰定数を有する軸要素で連結して構成される1自由度振動系における前記慣性体への入力から前記軸要素における出力までの伝達関数が用いられることを特徴とする請求項1に記載の共振抑制制御回路。

[請求項3] 前記構造化摂動は、前記ばね定数に対する摂動項を含むことを特徴とする請求項2に記載の共振抑制制御回路。

[請求項4] 前記構造化摂動は、前記慣性モーメントに対する摂動項を含むことを特徴とする請求項2に記載の共振抑制制御回路。

[請求項5] 前記抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とした場合、前記ばね定数 K_1 、前記減衰定数 C_1 、

及び前記抑制対象振動モード伝達関数 $M_1(s)$ は、下記式(1)によって表されることを特徴とする請求項2から4の何れかに記載の共振抑制制御回路。

[数1]

$$K_1 = p_R \cdot p_R^*, \quad C_1 = -(p_R + p_R^*), \quad M_1(s) = \frac{C_1 \cdot s + K_1}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (1)$$

[請求項6] 前記抑制対象振動モード伝達関数には、所定の第1慣性モーメントを有する第1慣性体と所定の第2慣性モーメントを有する第2慣性体とを所定のばね定数及び減衰定数を有する軸要素で連結して構成される2慣性系において前記第1慣性体への入力から前記軸要素における出力までの伝達関数が用いられることを特徴とする請求項1に記載の共振抑制制御回路。

[請求項7] 前記構造化摂動は、前記ばね定数に対する摂動項を含むことを特徴とする請求項6に記載の共振抑制制御回路。

[請求項8] 前記構造化摂動は、前記第2慣性モーメントに対する摂動項を含むことを特徴とする請求項6に記載の共振抑制制御回路。

[請求項9] 前記構造化摂動は、前記第1慣性モーメントに対する摂動項を含むことを特徴とする請求項6に記載の共振抑制制御回路。

[請求項10] 前記構造化摂動は、前記ばね定数に対する摂動項と前記第2慣性モーメントに対する摂動項とを含むことを特徴とする請求項6に記載の共振抑制制御回路。

[請求項11] 前記抑制対象振動モード伝達関数の極を“ p_R ”とし、その複素共役を“ p_R^* ”とし、前記第1慣性モーメントを“ J_1 ”とし、前記第2慣性モーメントを“ J_2 ”とした場合、前記ばね定数 K_2 、前記減衰定数 C_2 、及び前記抑制対象振動モード伝達関数 $M_2(s)$ は、下記式(2)によって表されることを特徴とする請求項6から10の何れかに記載の共振抑制制御回路。

[数2]

$$K_2 = \frac{P_R \cdot P_R^*}{\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}}, \quad C_2 = -\frac{P_R + P_R^*}{\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}}, \quad M_2(s) = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{C_2 \cdot s + K_2}{(s - p_R) \cdot (s - p_R^*)} \quad (2)$$

[請求項12] 前記高次振動モード伝達関数は、当該高次振動モード伝達関数及び前記抑制対象振動モード伝達関数を乗算して得られる伝達関数と前記制御対象における前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの伝達関数とが一致するように同定されることを特徴とする請求項1から11の何れかに記載の共振抑制制御回路。

[請求項13] 供試体と軸を介して連結された電動機と、
前記軸で発生する軸トルクを検出する軸トルクメータと、
前記電動機に電力を供給するインバータと、
前記電動機の発生トルクに対する指令信号及び前記軸トルクメータの検出信号を用いて、前記軸における共振が抑制されるように前記電動機に対するトルク電流指令信号を生成し、当該トルク電流指令信号を前記インバータに入力する共振抑制制御回路と、を備える試験システムであって、
前記共振抑制制御回路には、請求項1から12の何れかに記載のものが用いられることを特徴とする試験システム。

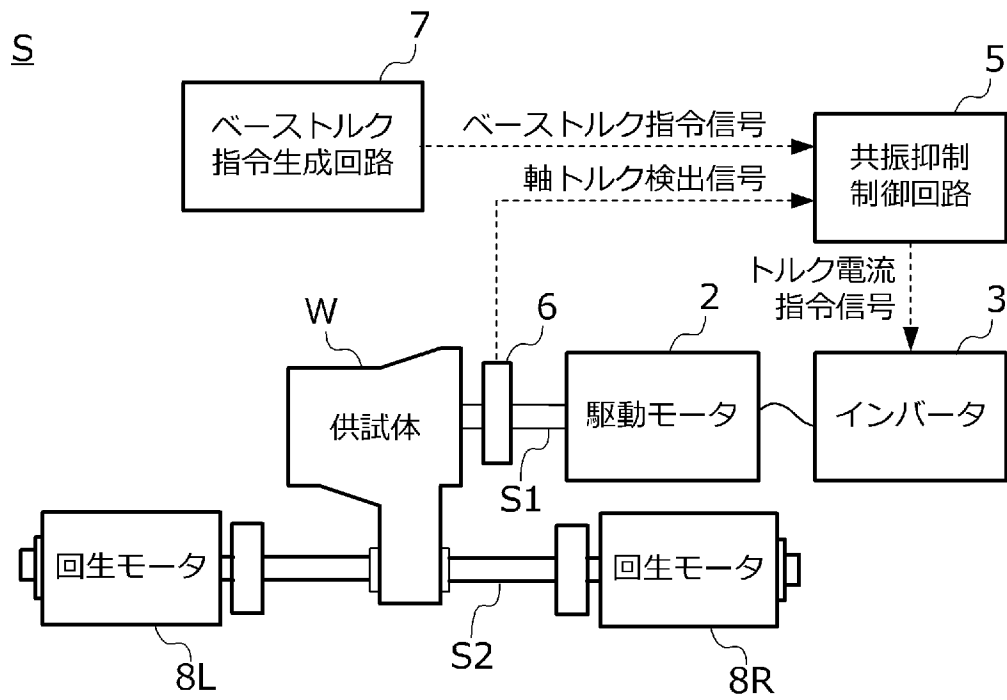
[請求項14] 電動機と供試体とを軸で結合して構成され2以上の複数の振動モードを有する物理系を制御対象とし、前記電動機への入力を与えることによって前記複数の振動モードのうち少なくとも1つの振動モードにおける共振を抑制する共振抑制制御回路の設計方法であって、
前記複数の振動モードのうちの1つを抑制対象とし、当該抑制対象の振動モードを有する抑制対象振動モード伝達関数と、前記抑制対象の振動モードよりも高次の振動モードを有する高次振動モード伝達関数との積によって、前記電動機への入力から前記軸における軸トルクまでの前記制御対象の入出力特性を模したノミナルモデルを備える一

般化プラントを規定し、

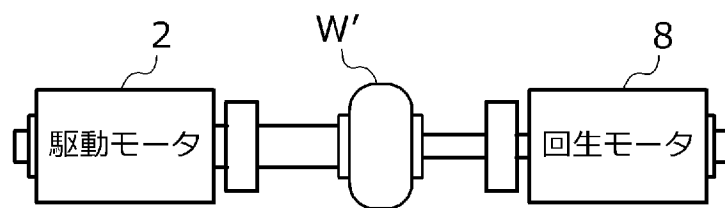
前記一般化プラントのうち前記抑制対象振動モード伝達関数に含まれるパラメータに対する摂動項を少なくとも1つ含む構造化摂動を規定し、

前記規定された一般化プラント及び構造化摂動を用いて μ 設計法と呼称される制御系設計方法によって前記共振抑制制御回路を設計することを特徴とする共振抑制制御回路の設計方法。

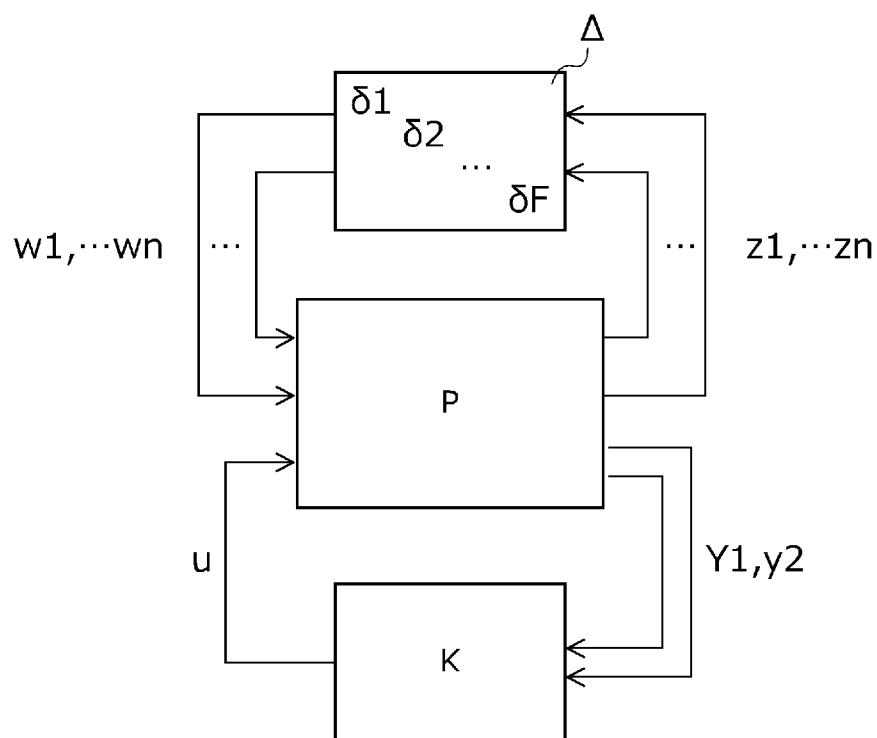
[図1]



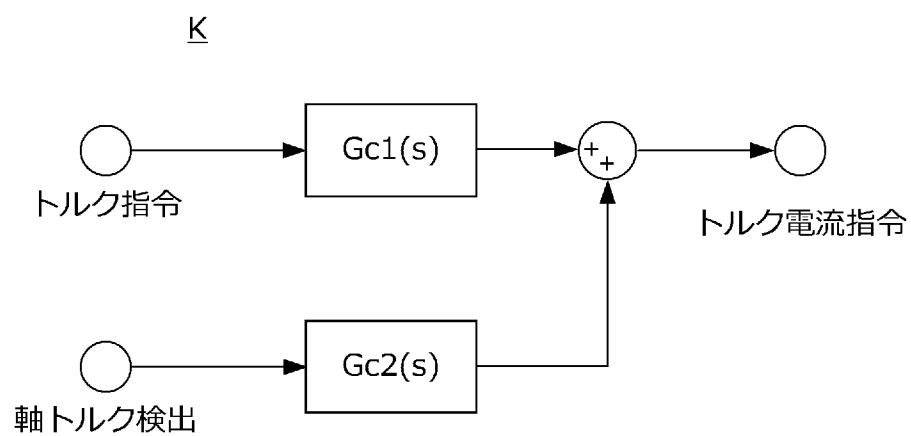
[図2]



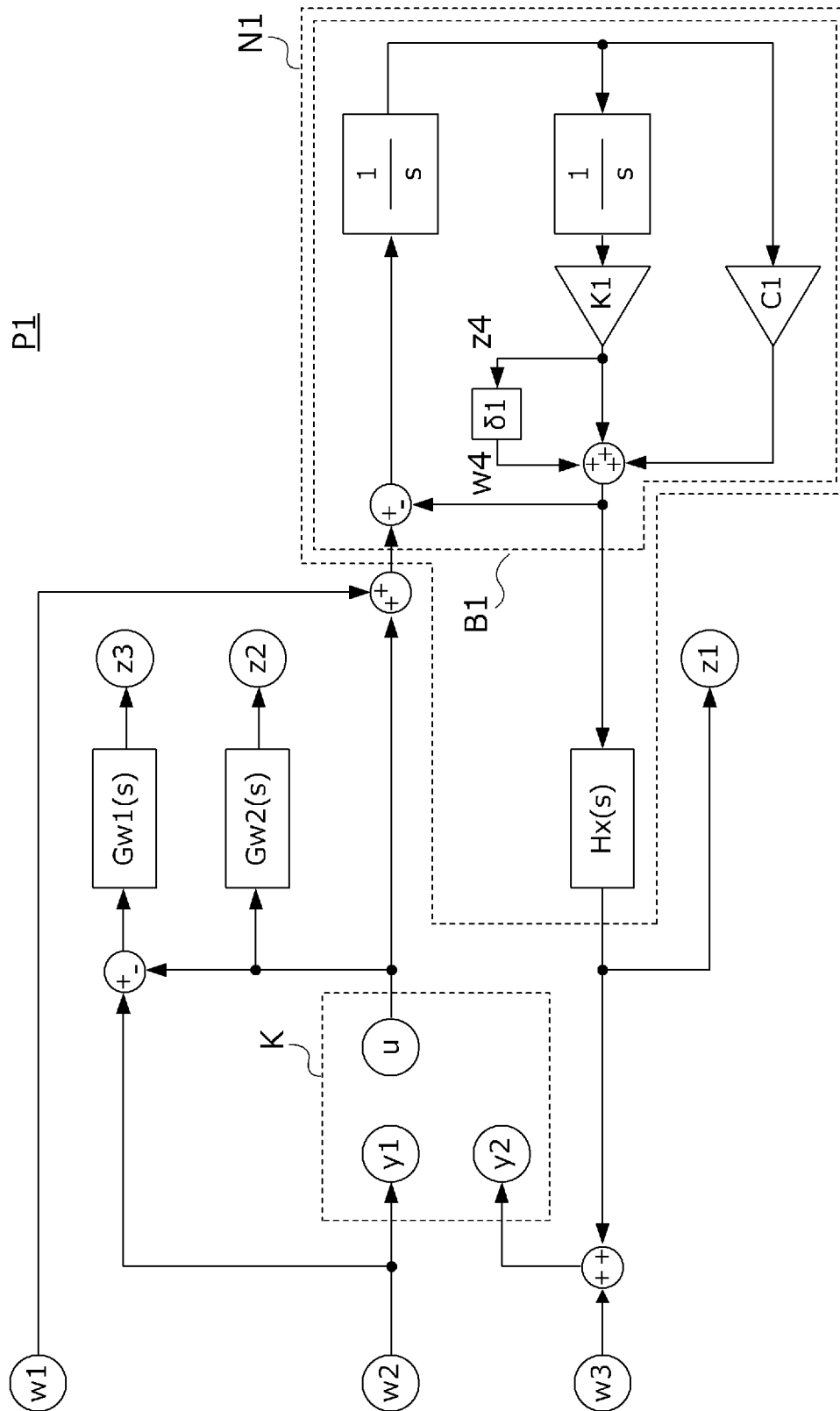
[図3]



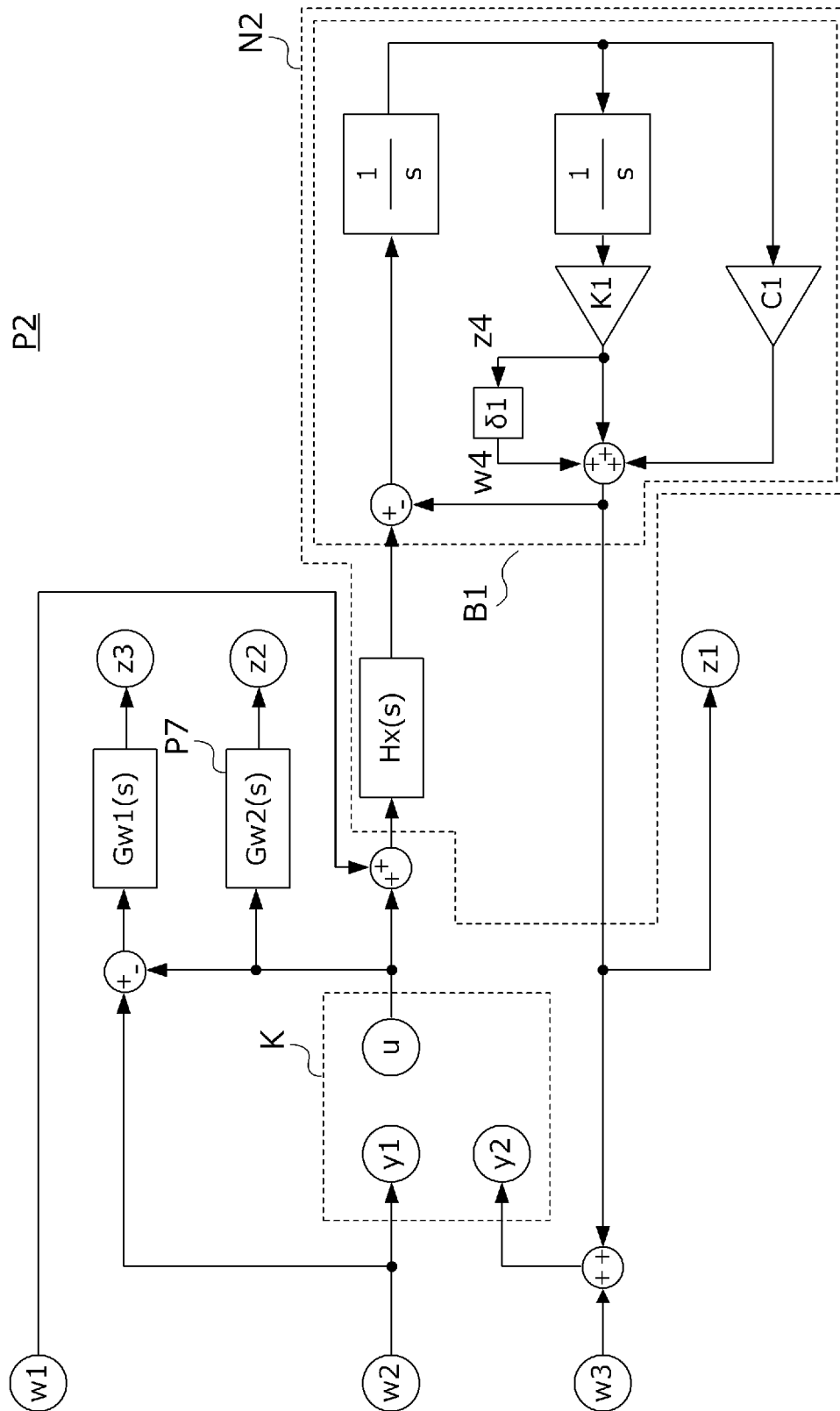
[図4]



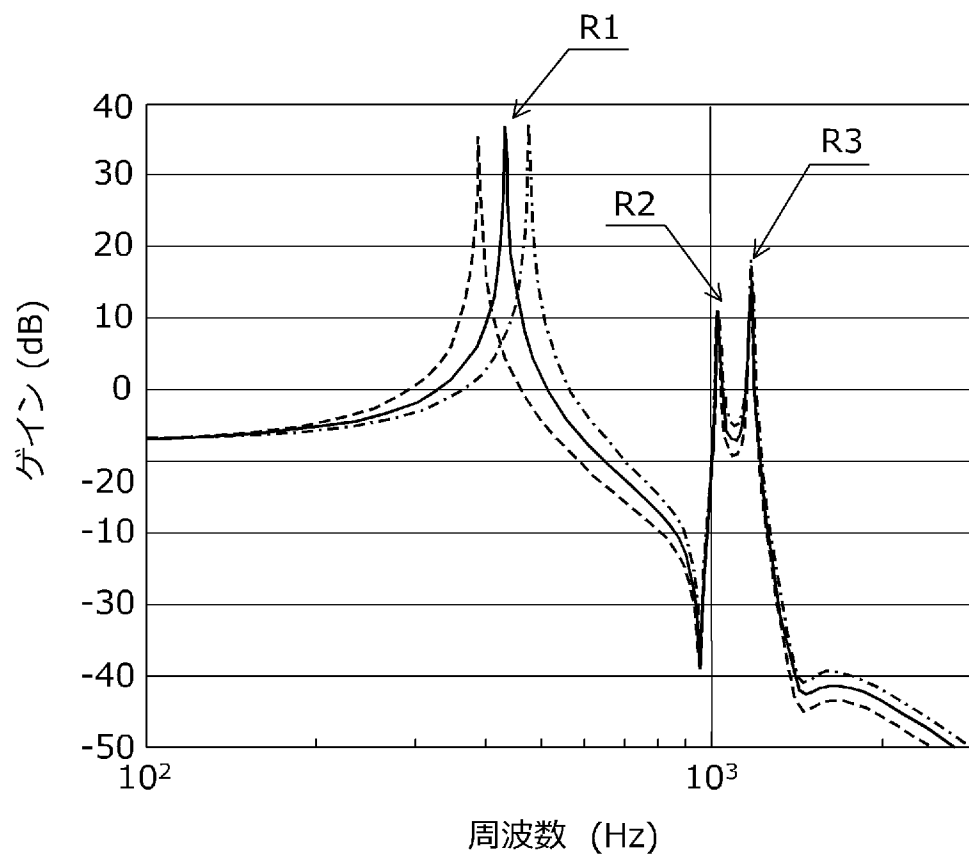
[図5]



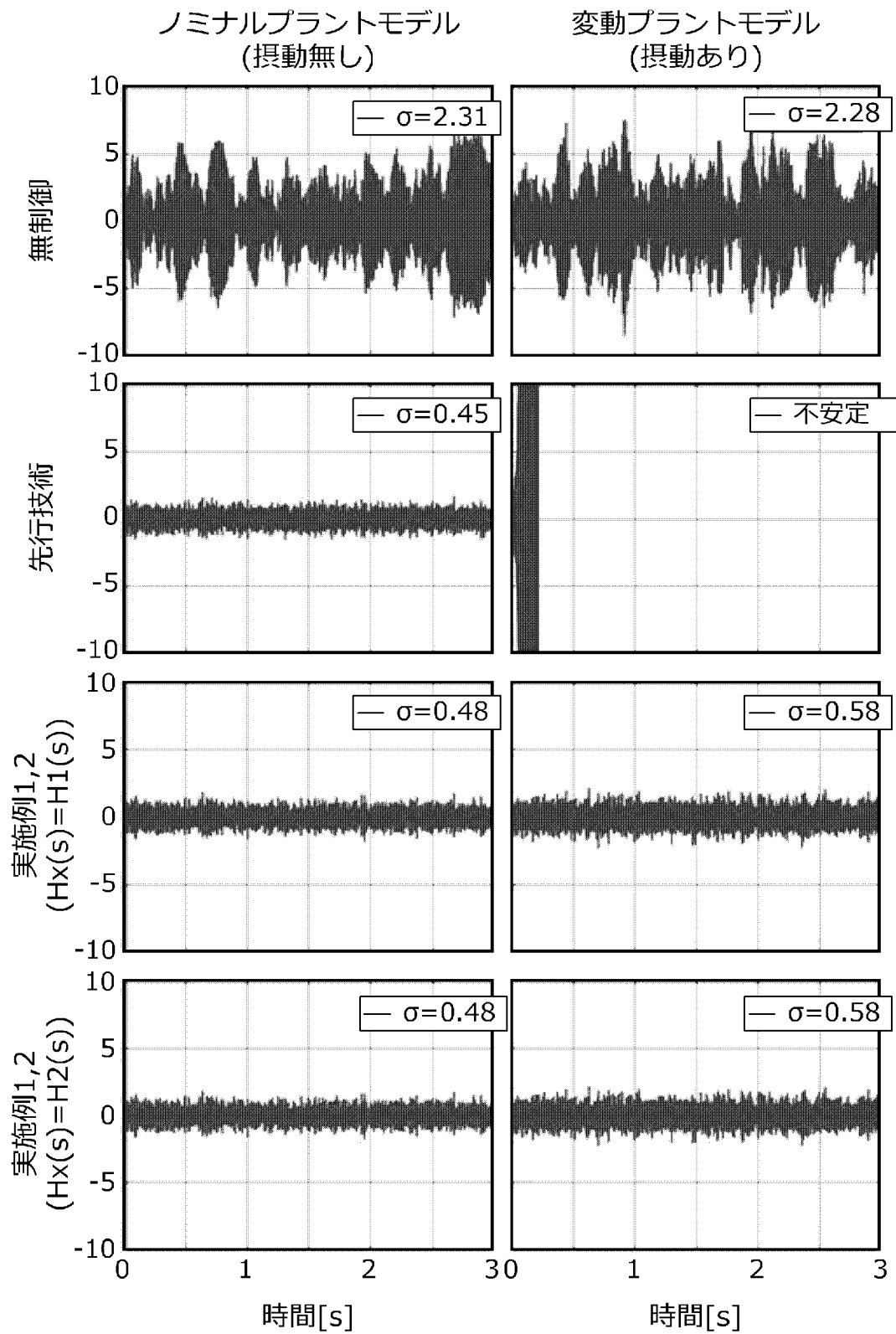
[図6]



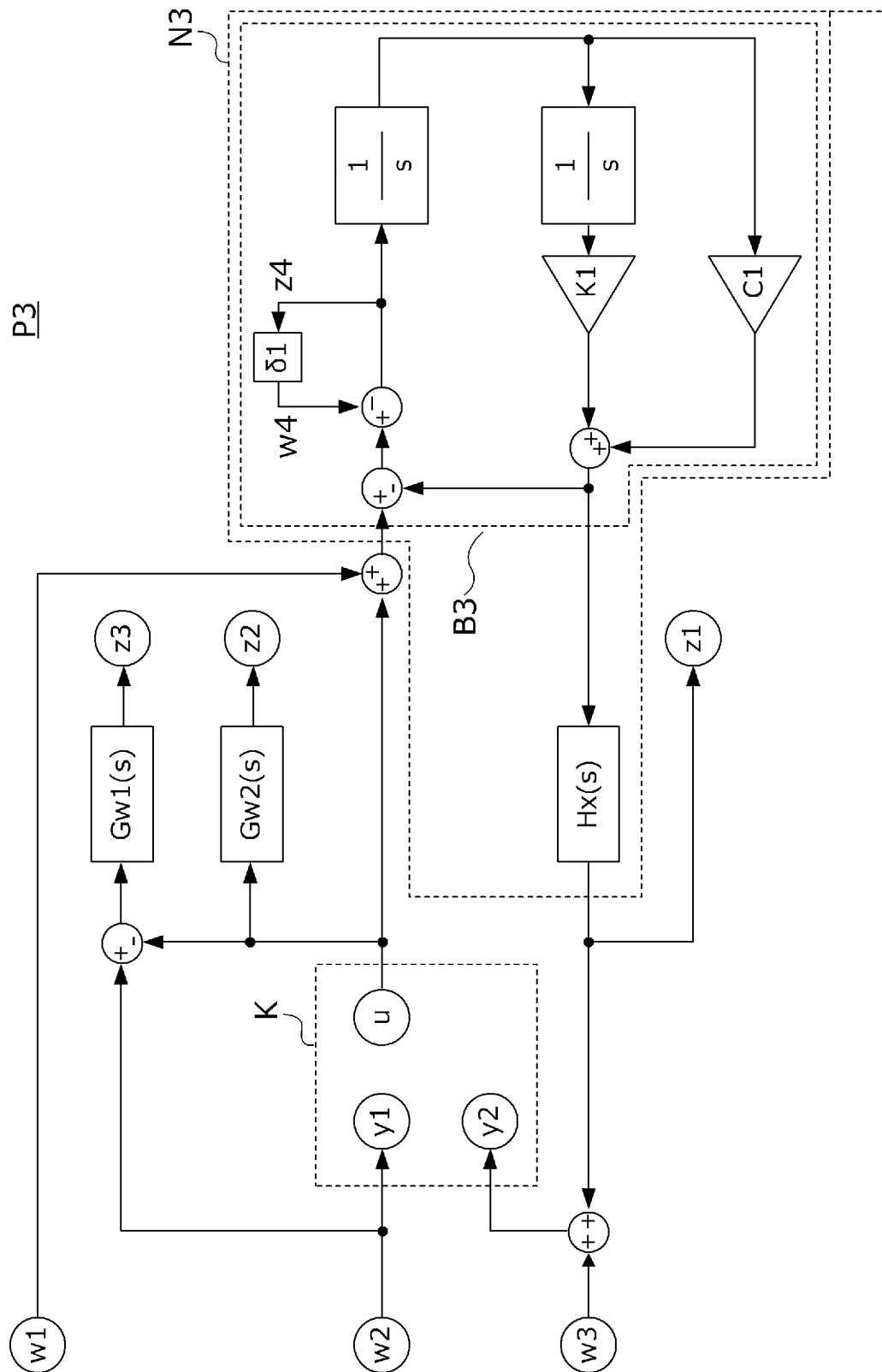
[図7]



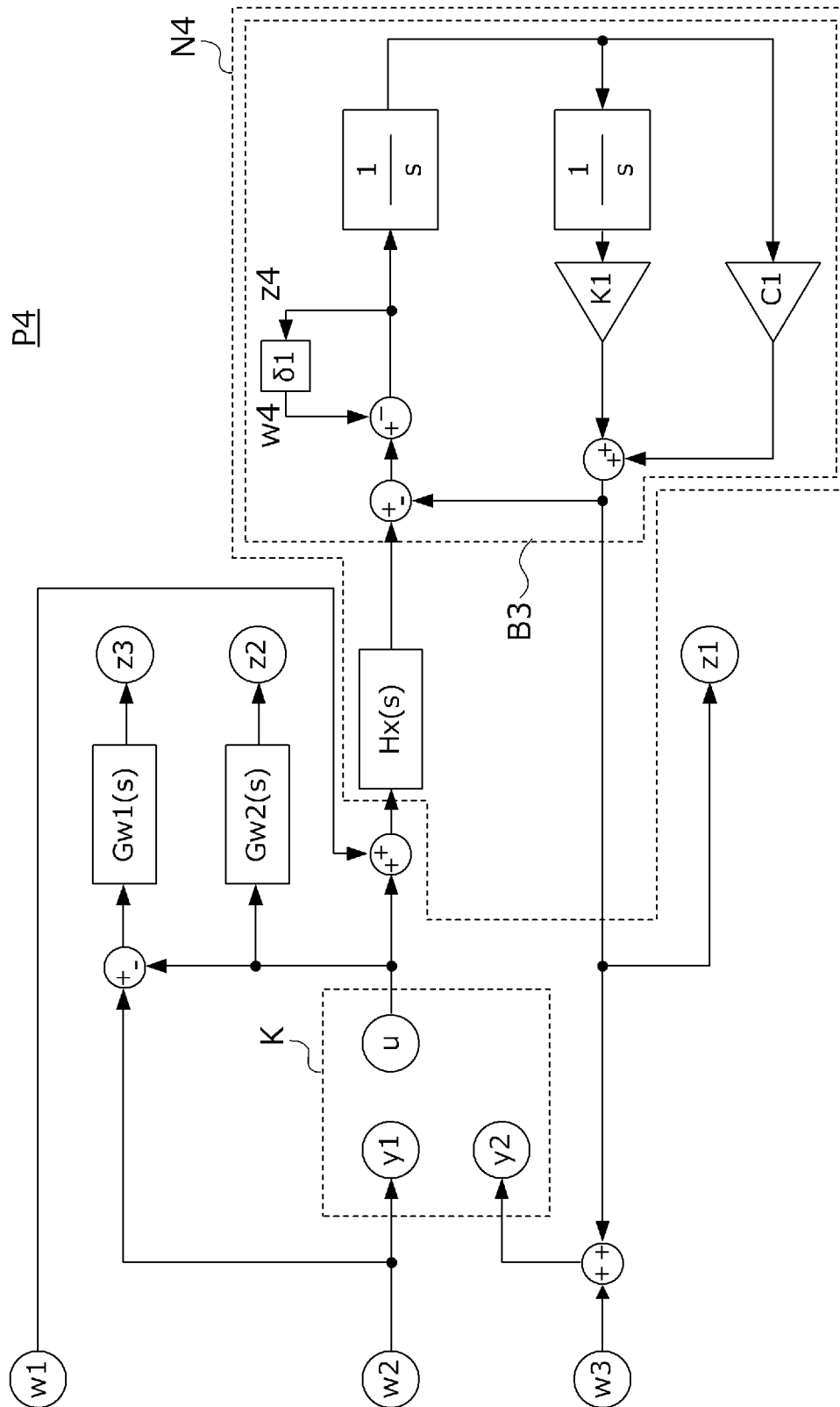
[図8]



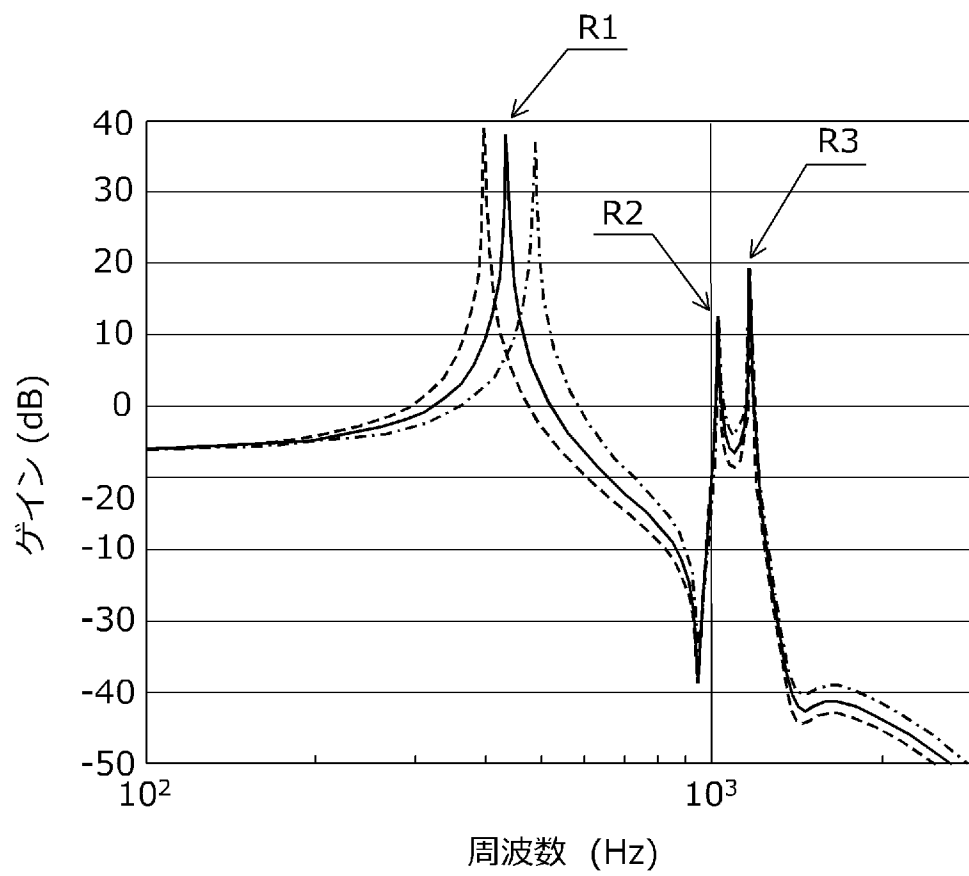
[図9]



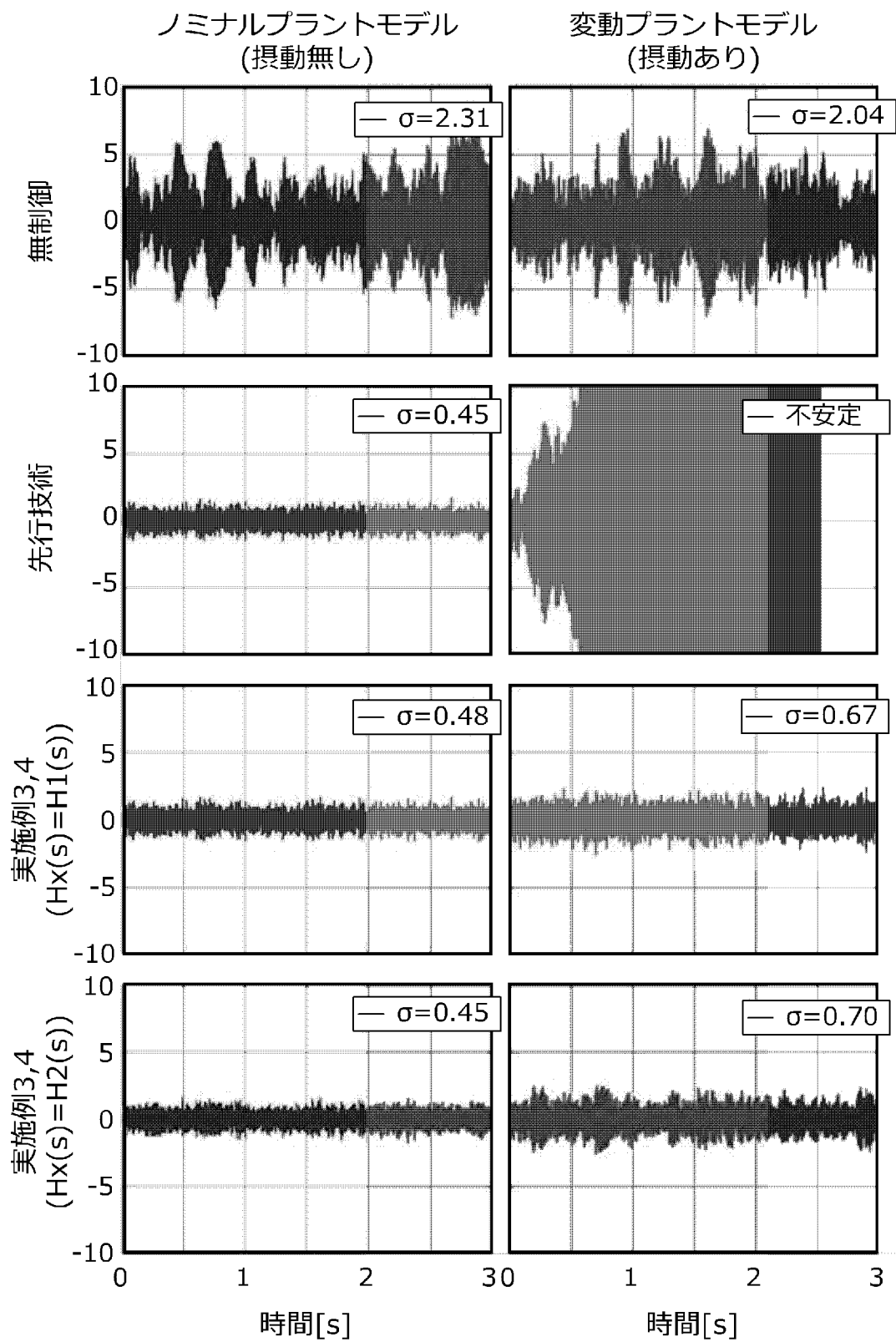
[図10]



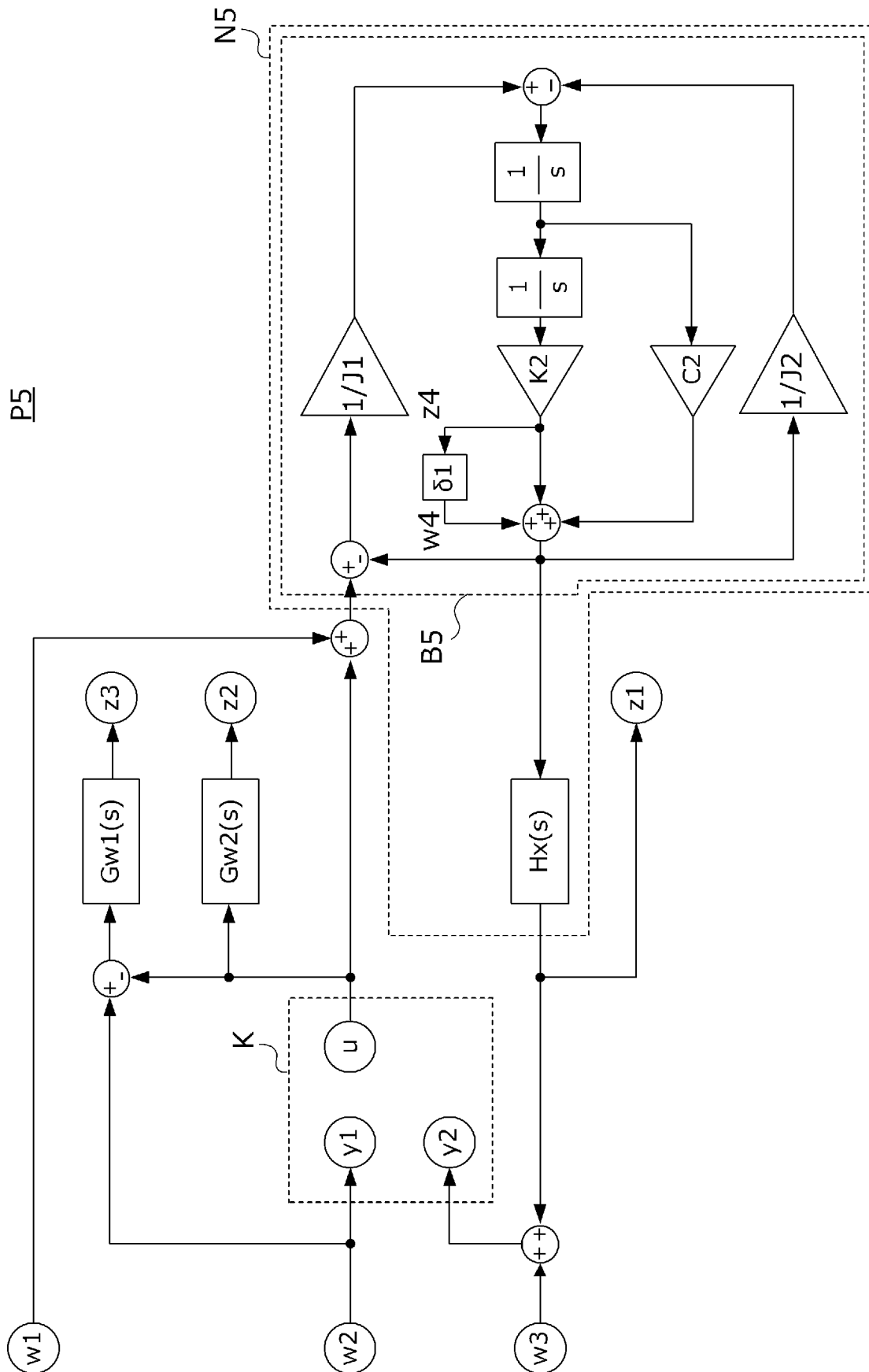
[図11]



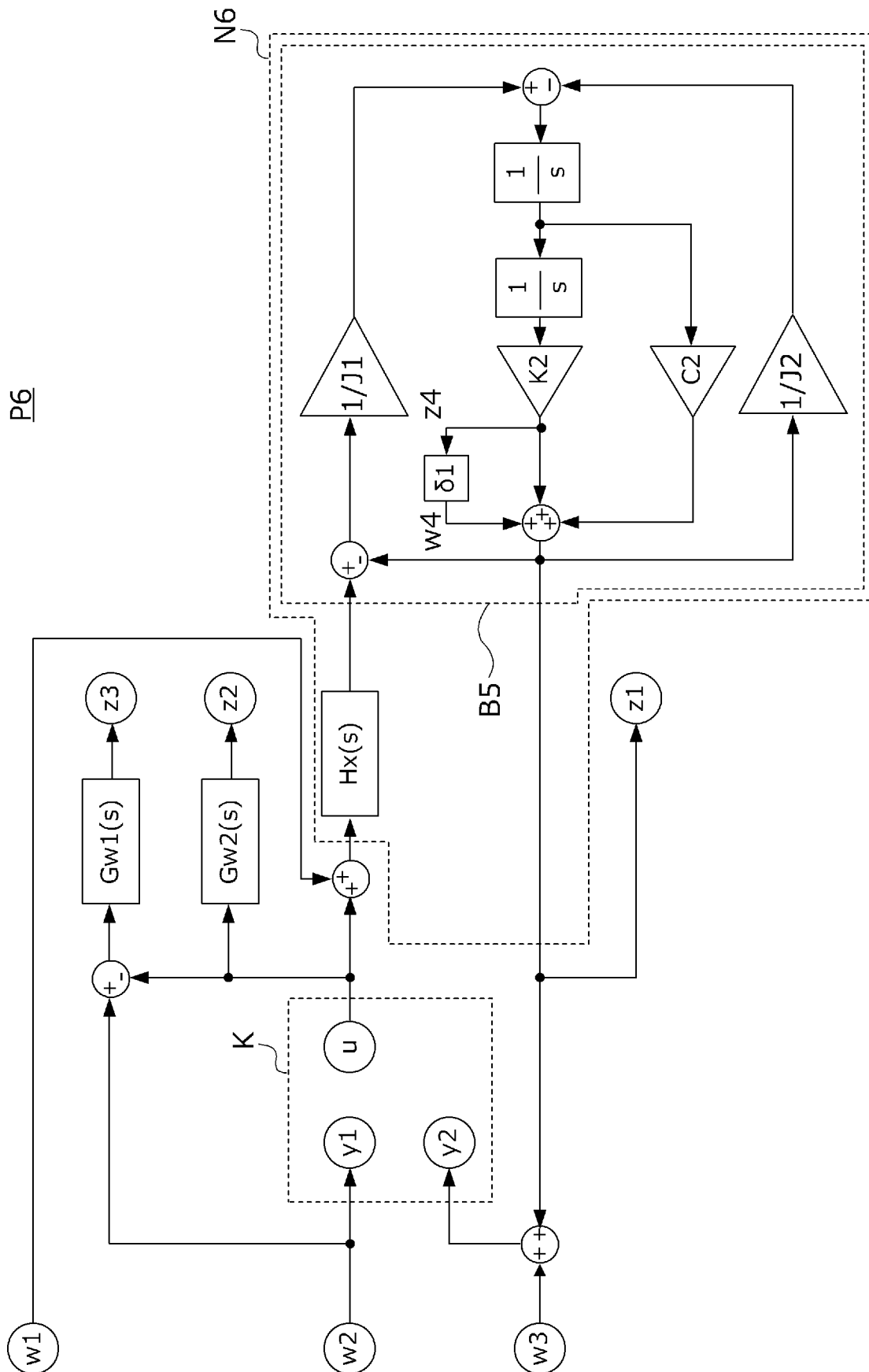
[図12]



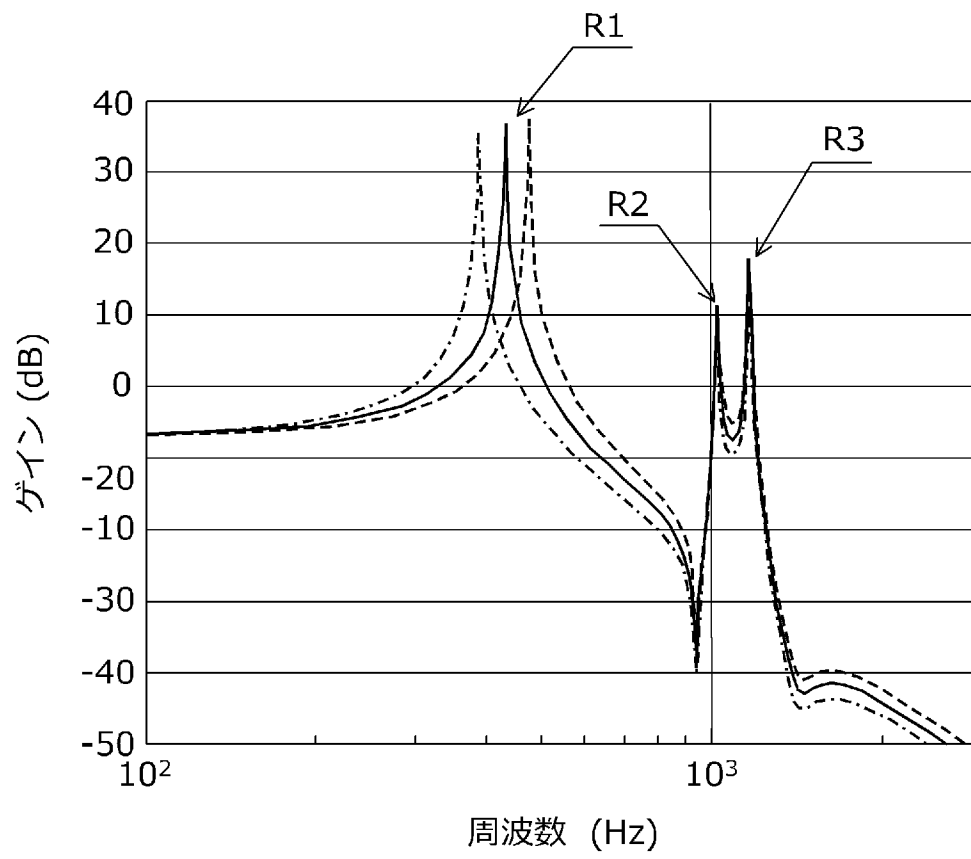
59



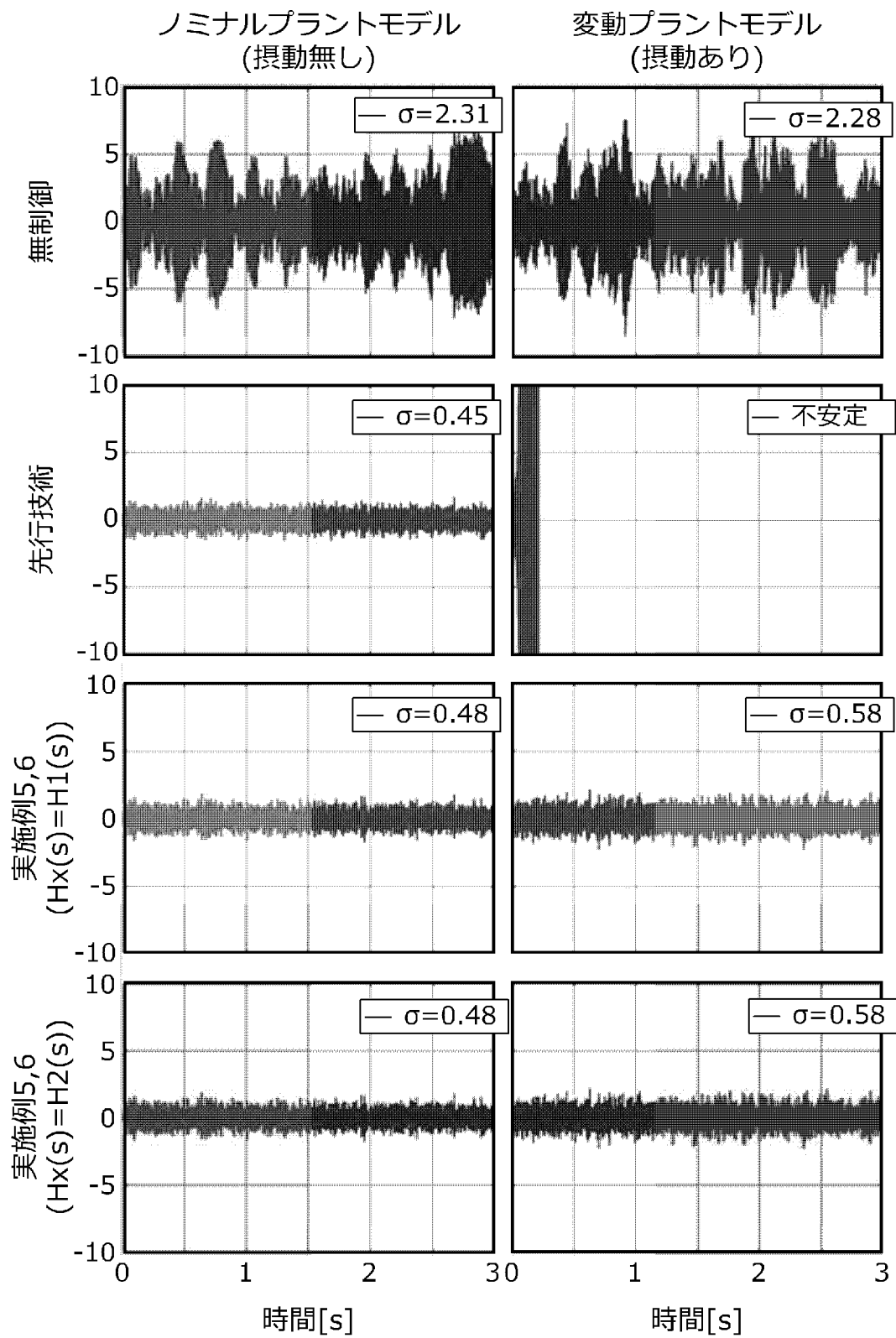
96



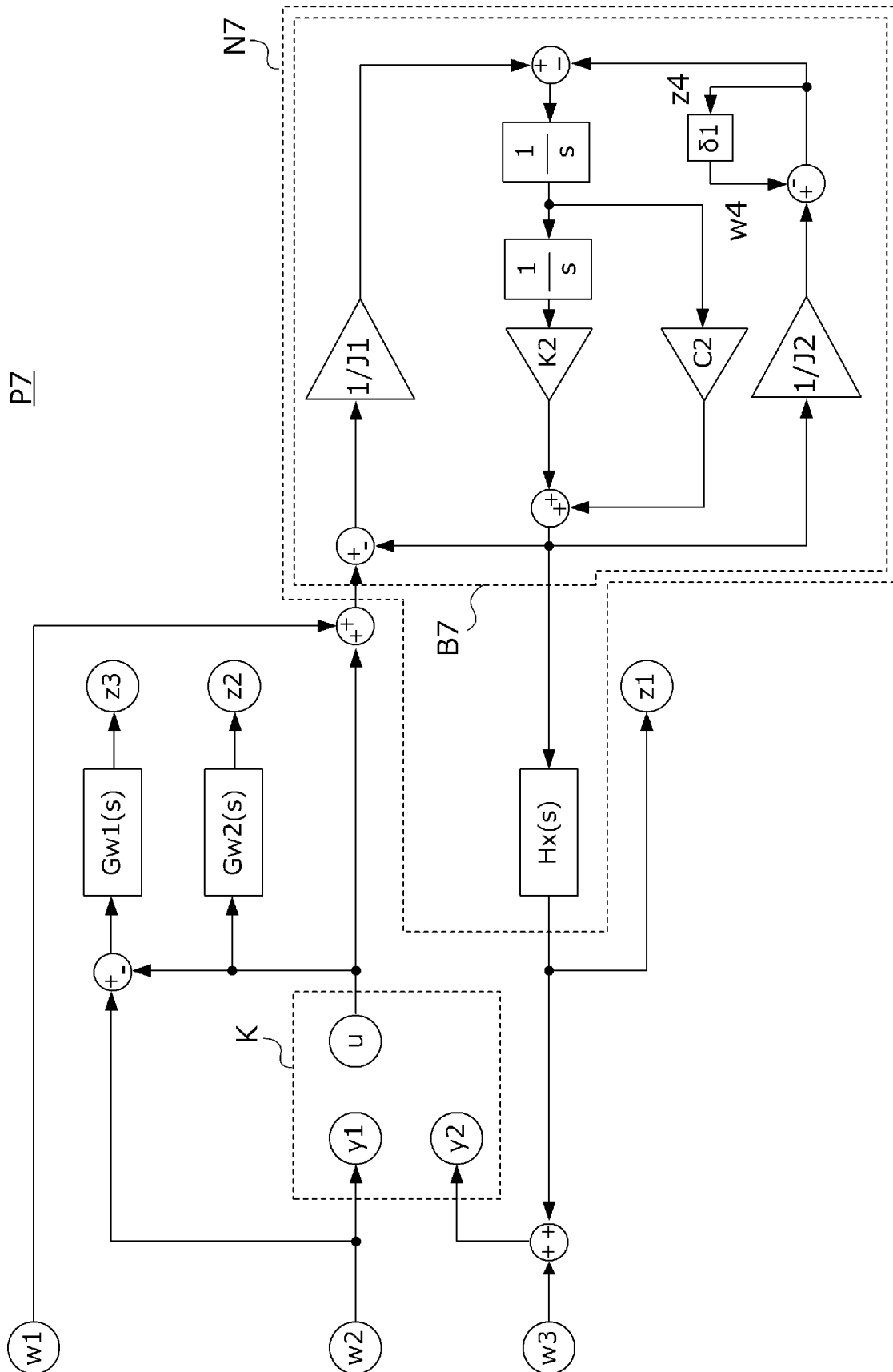
[図15]



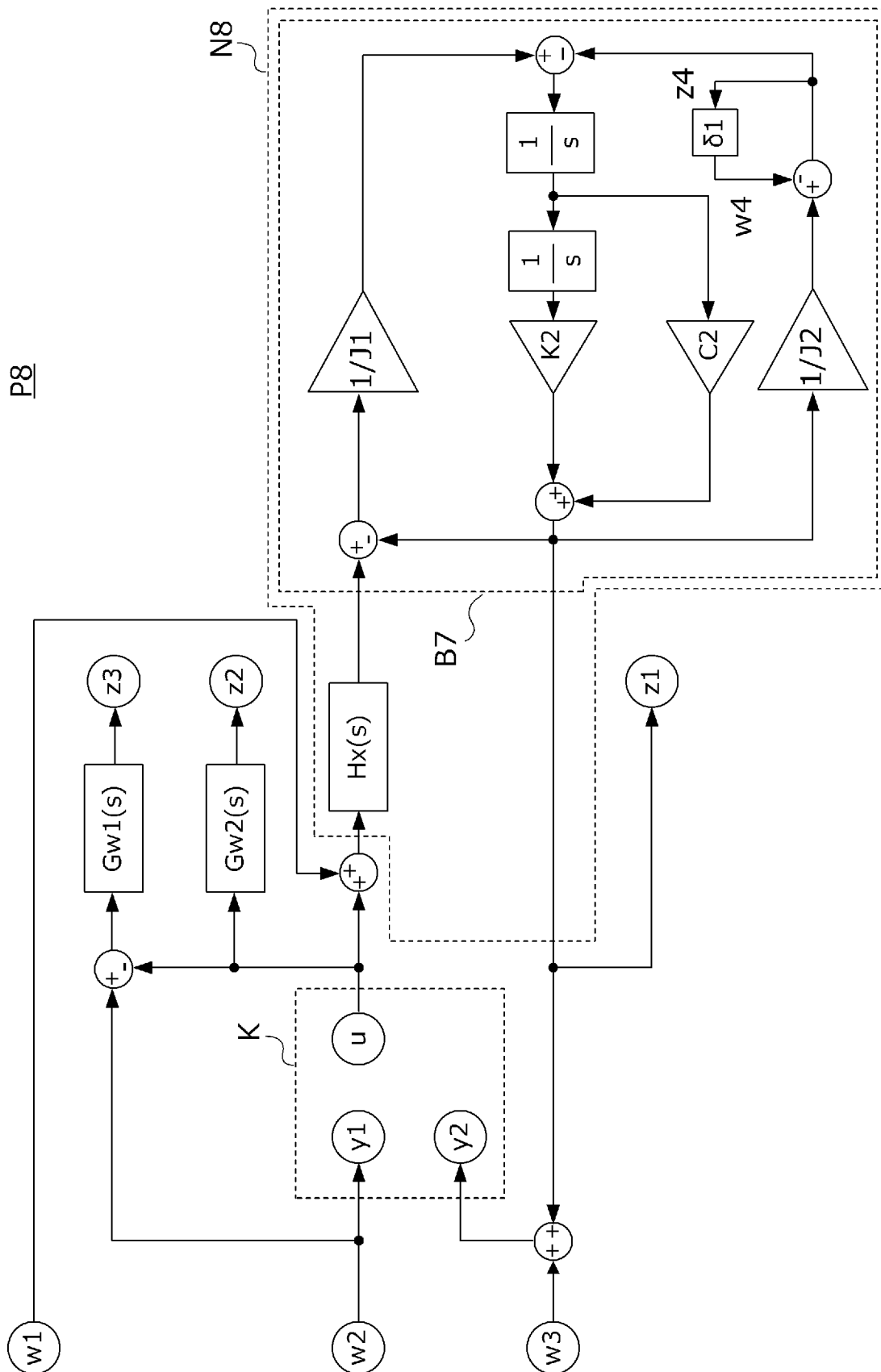
[図16]



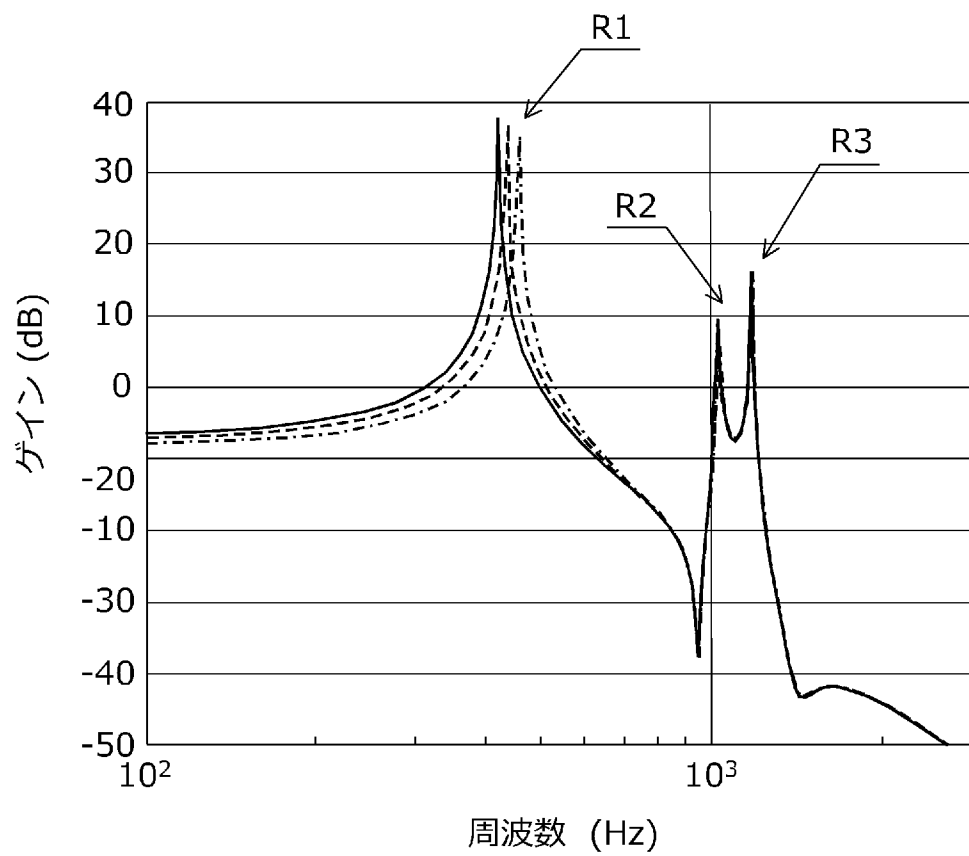
P7



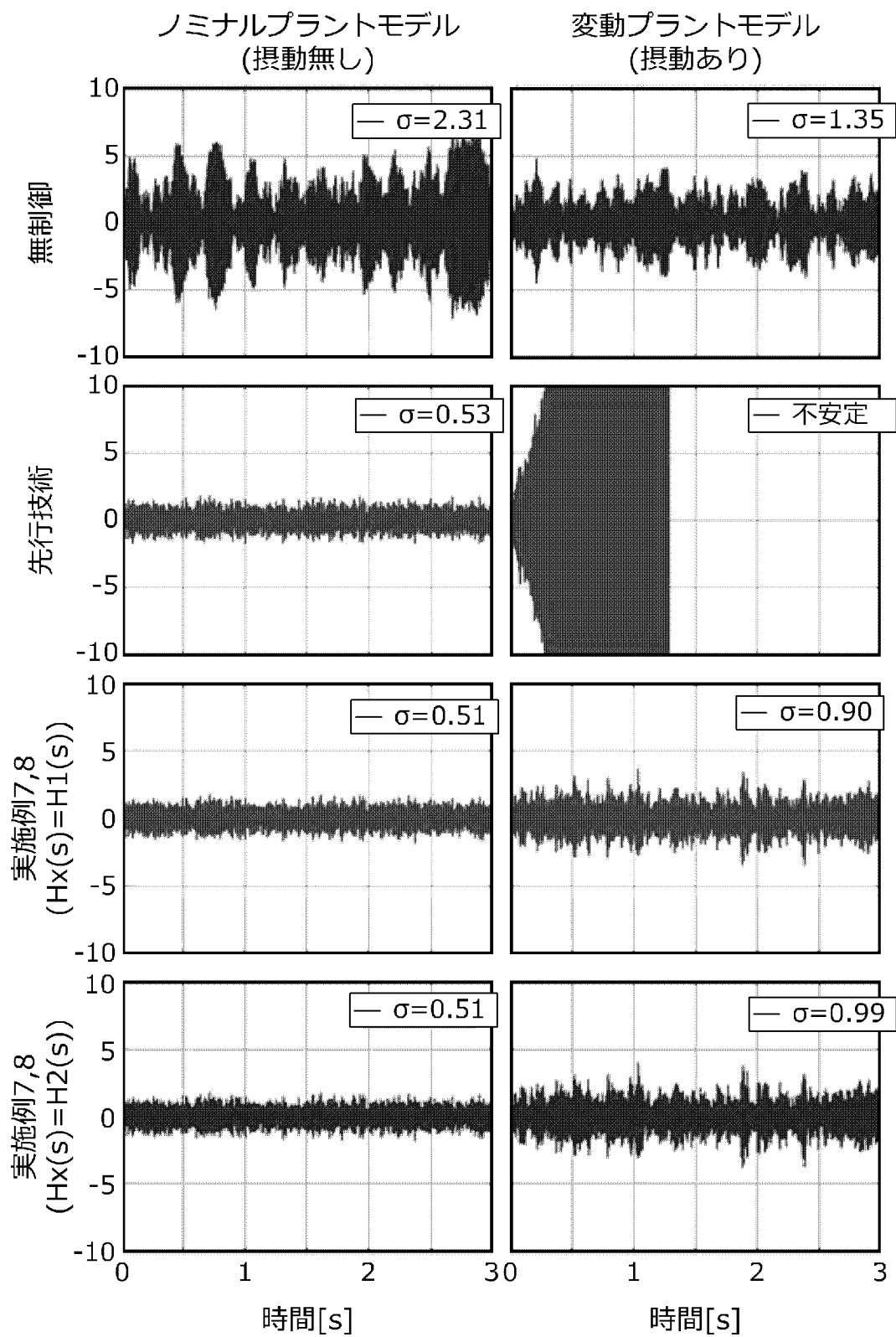
89



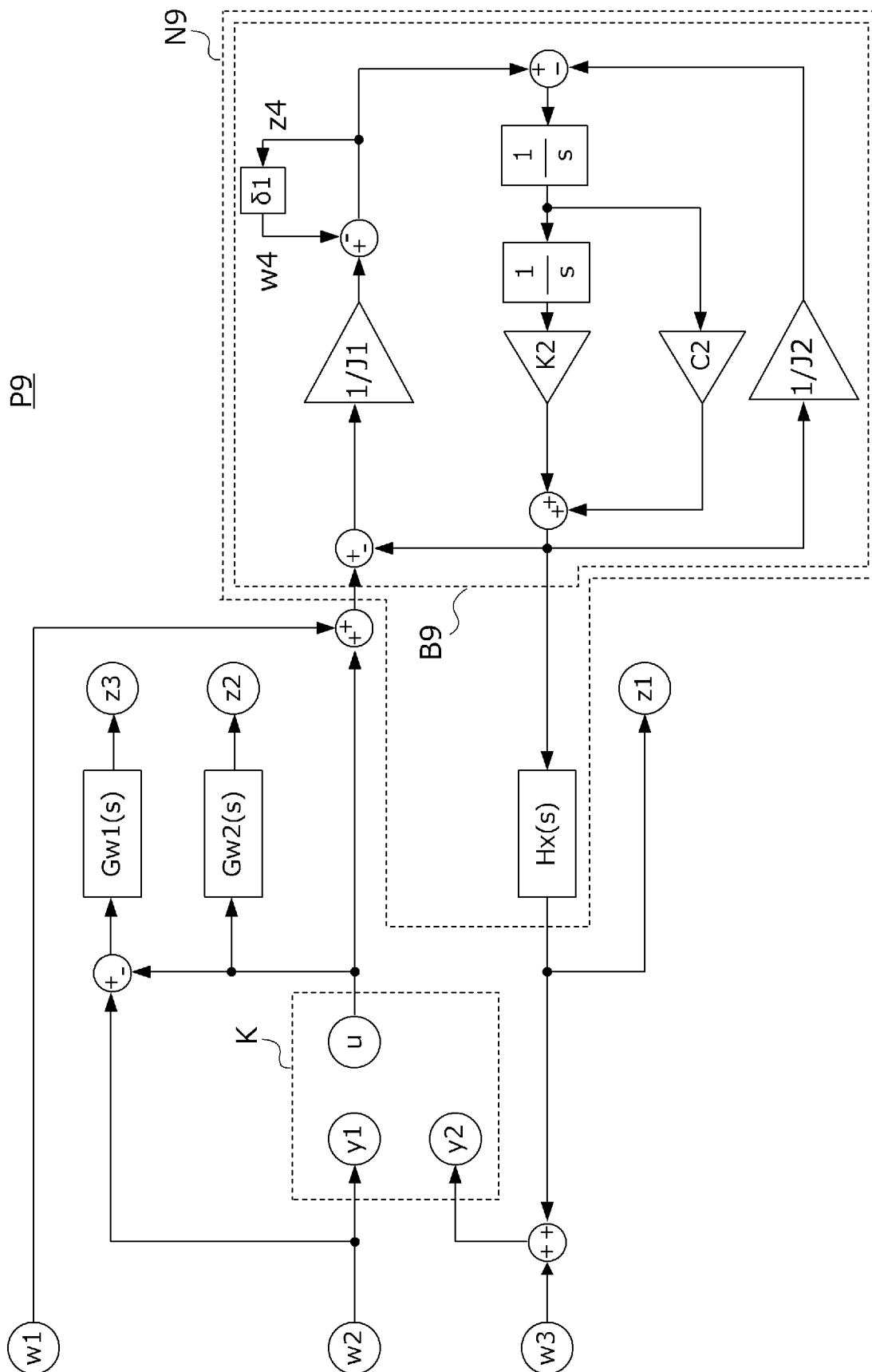
[図19]



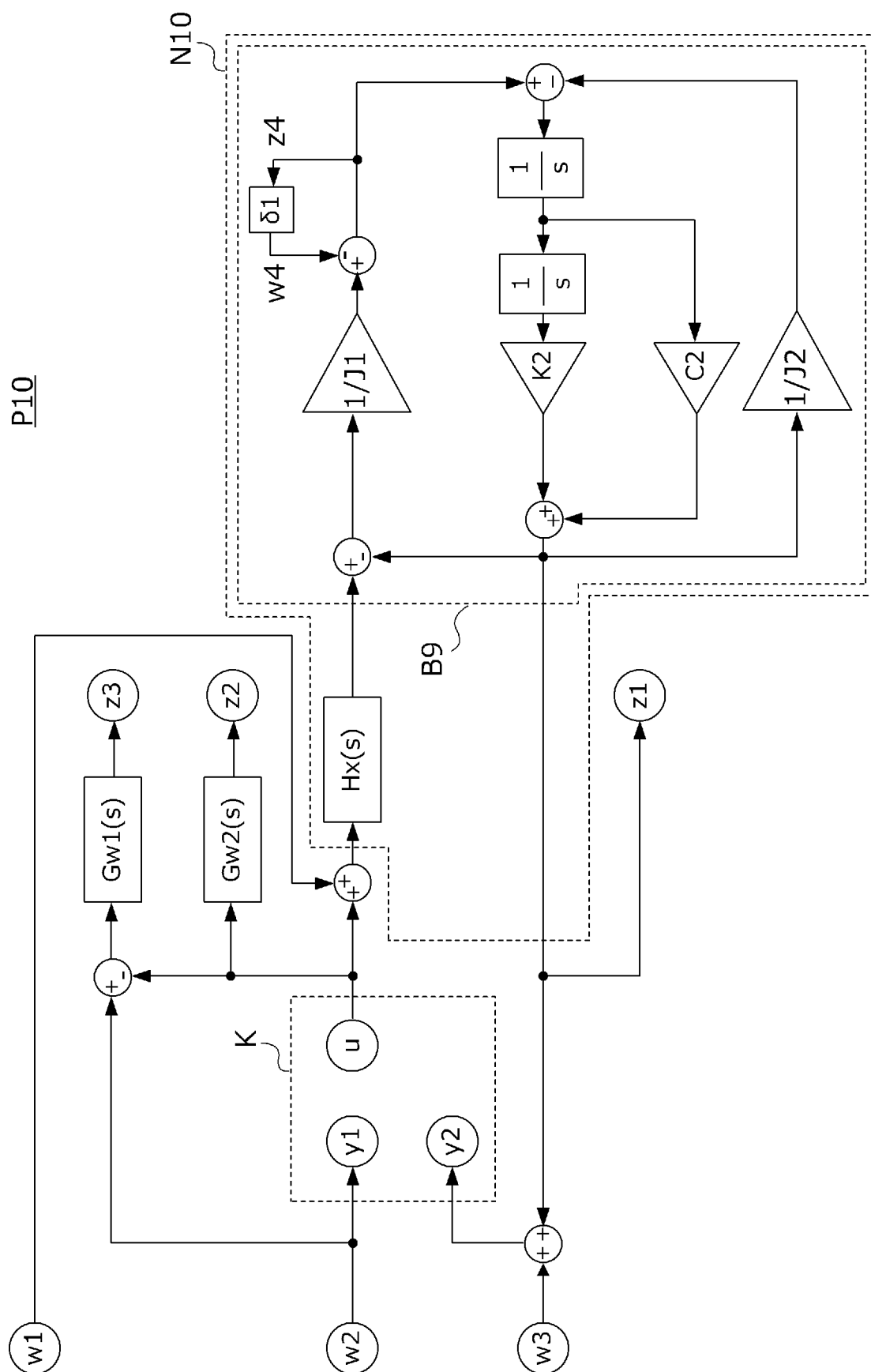
[図20]



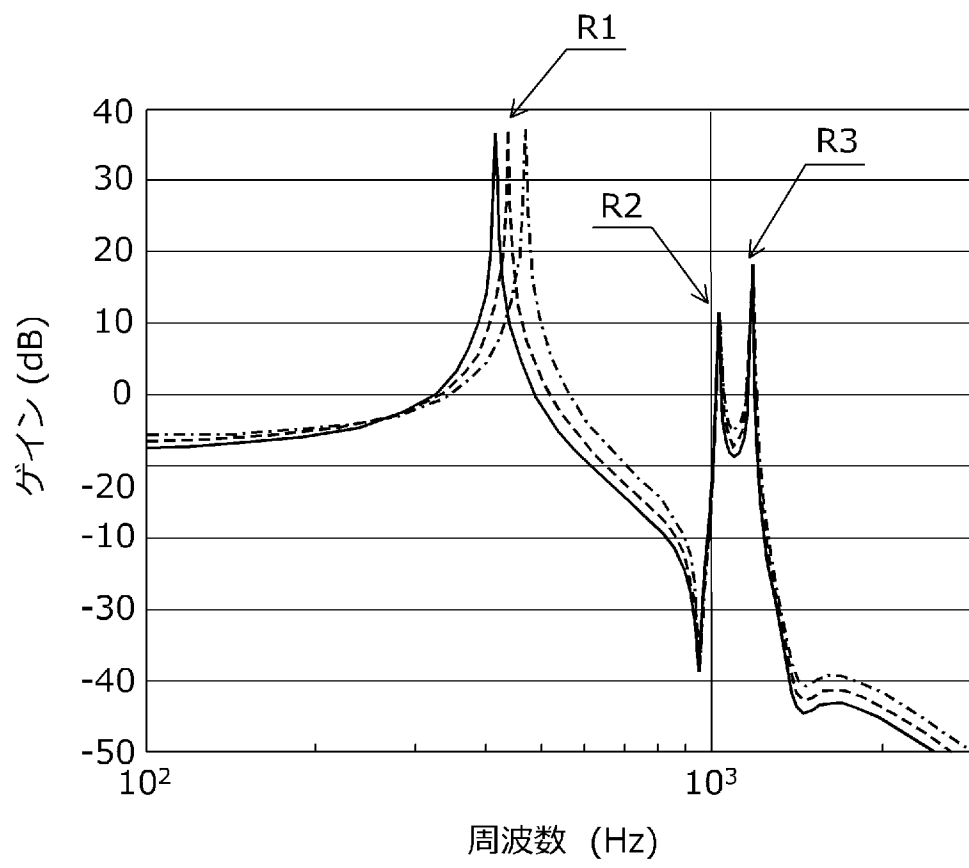
69



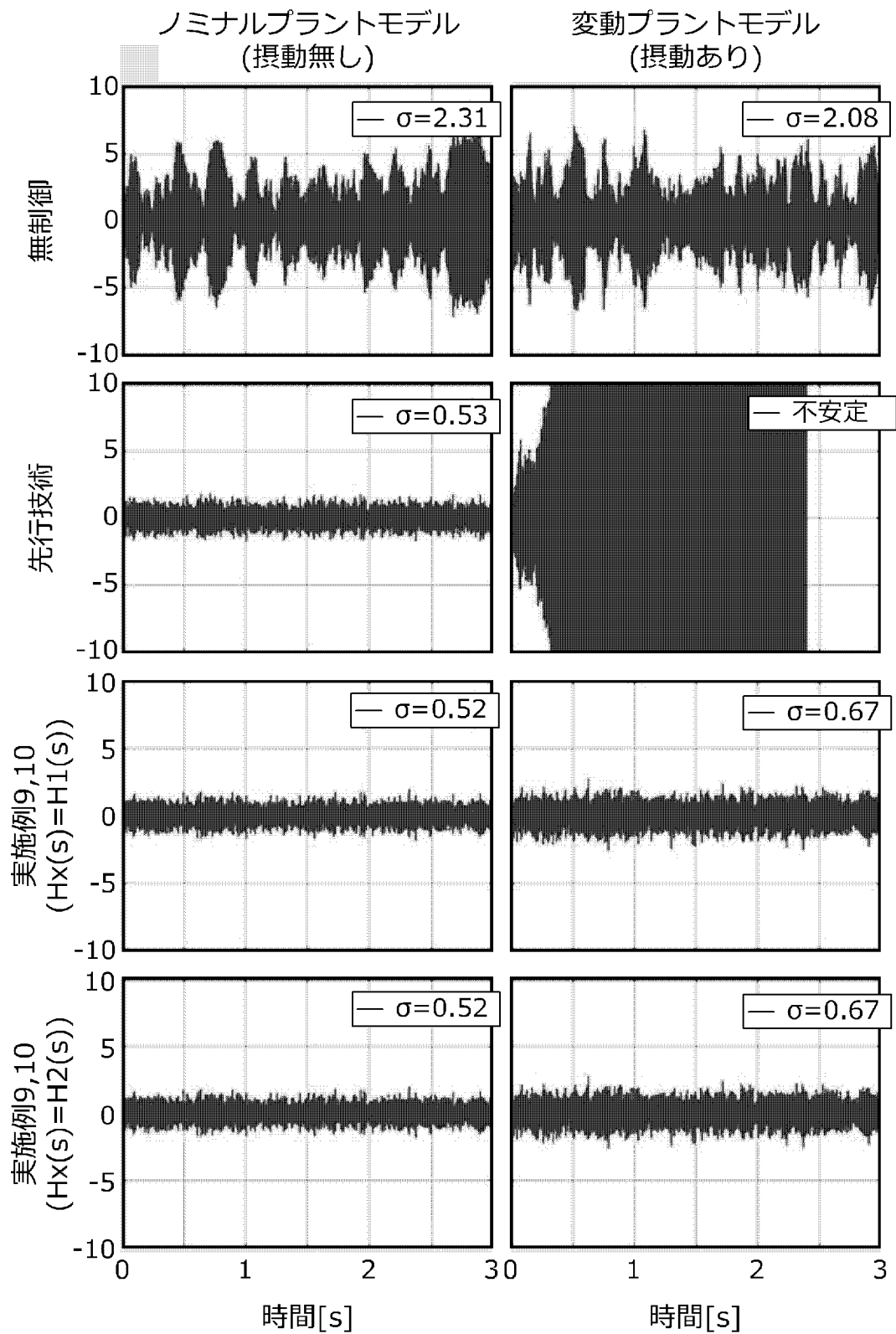
P10



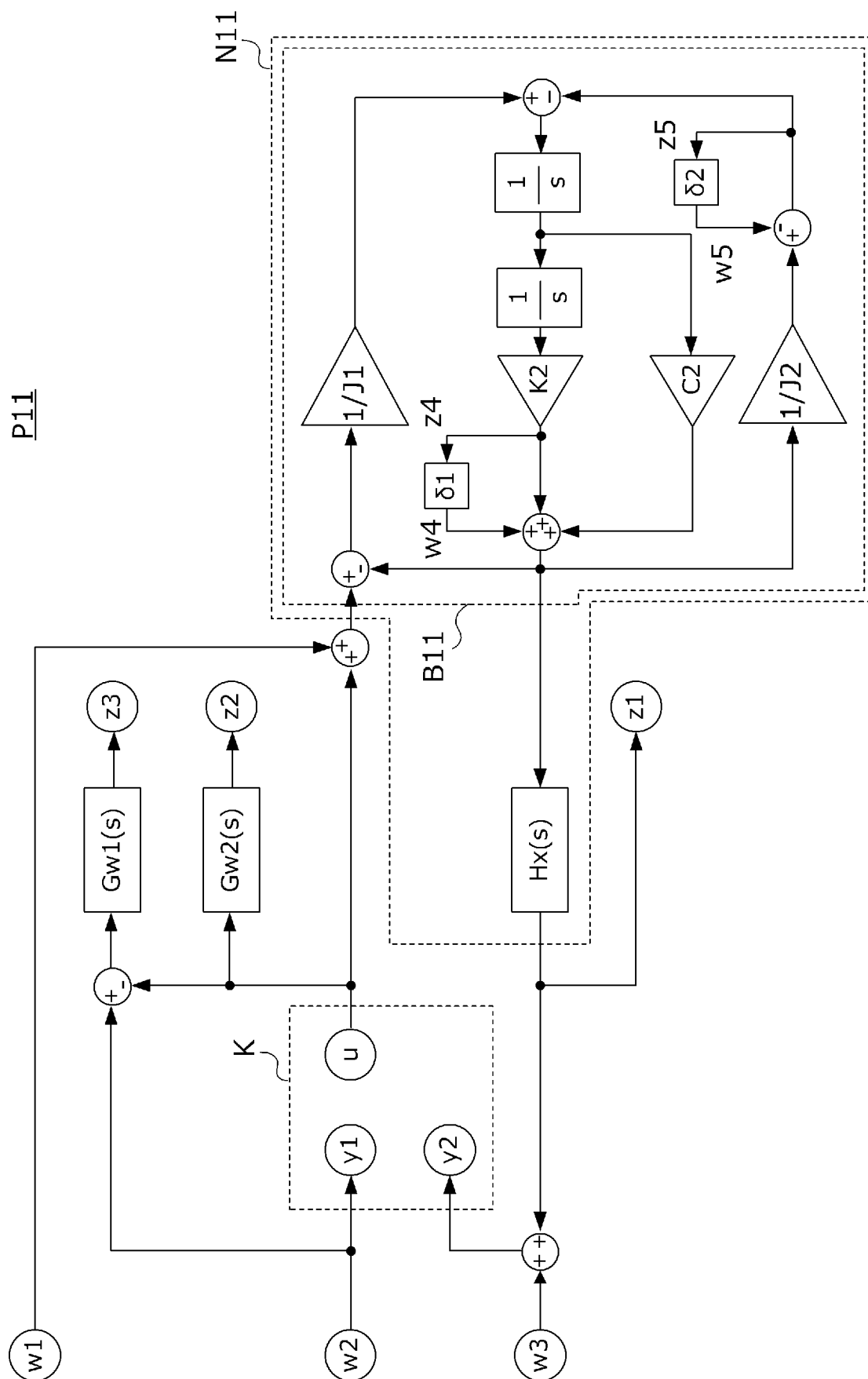
[図23]



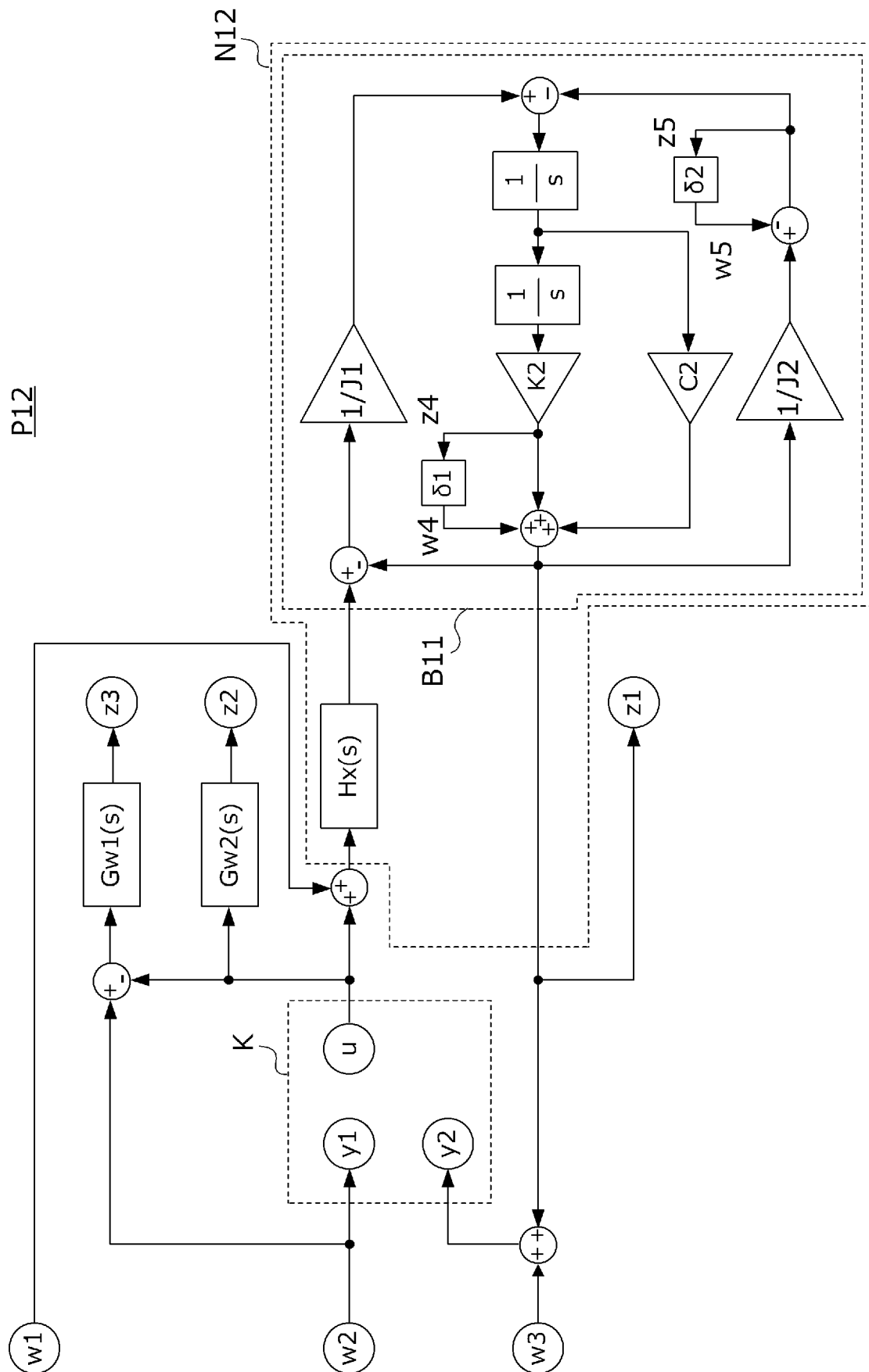
[図24]



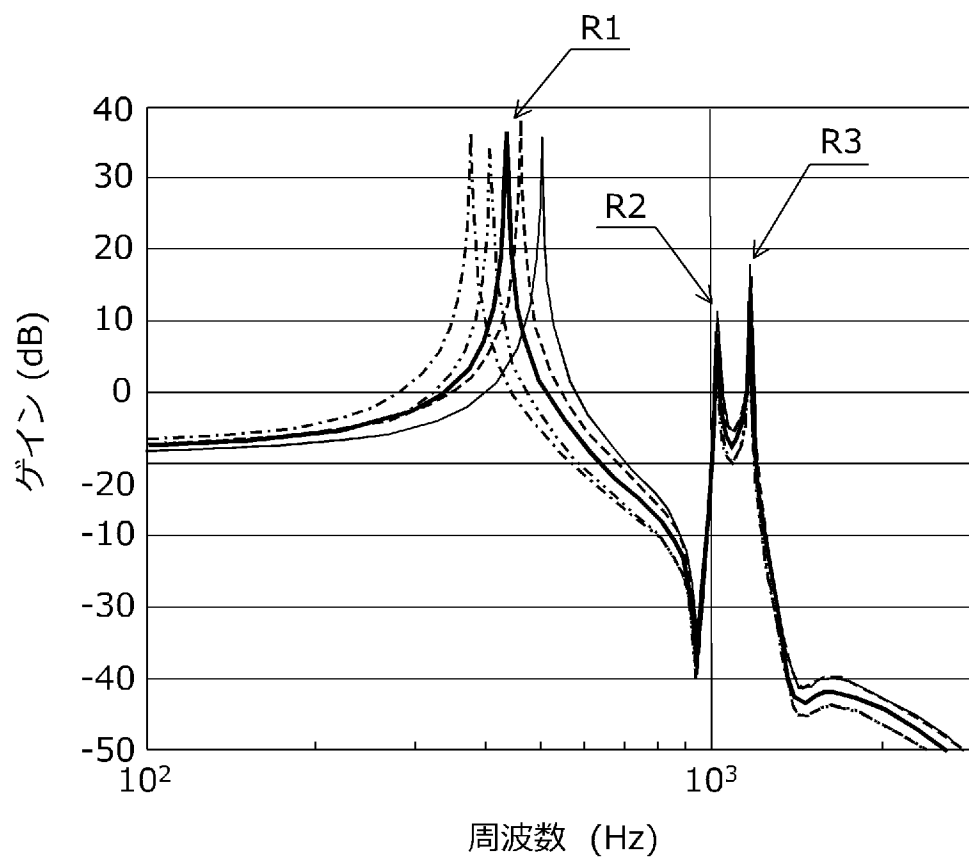
P11



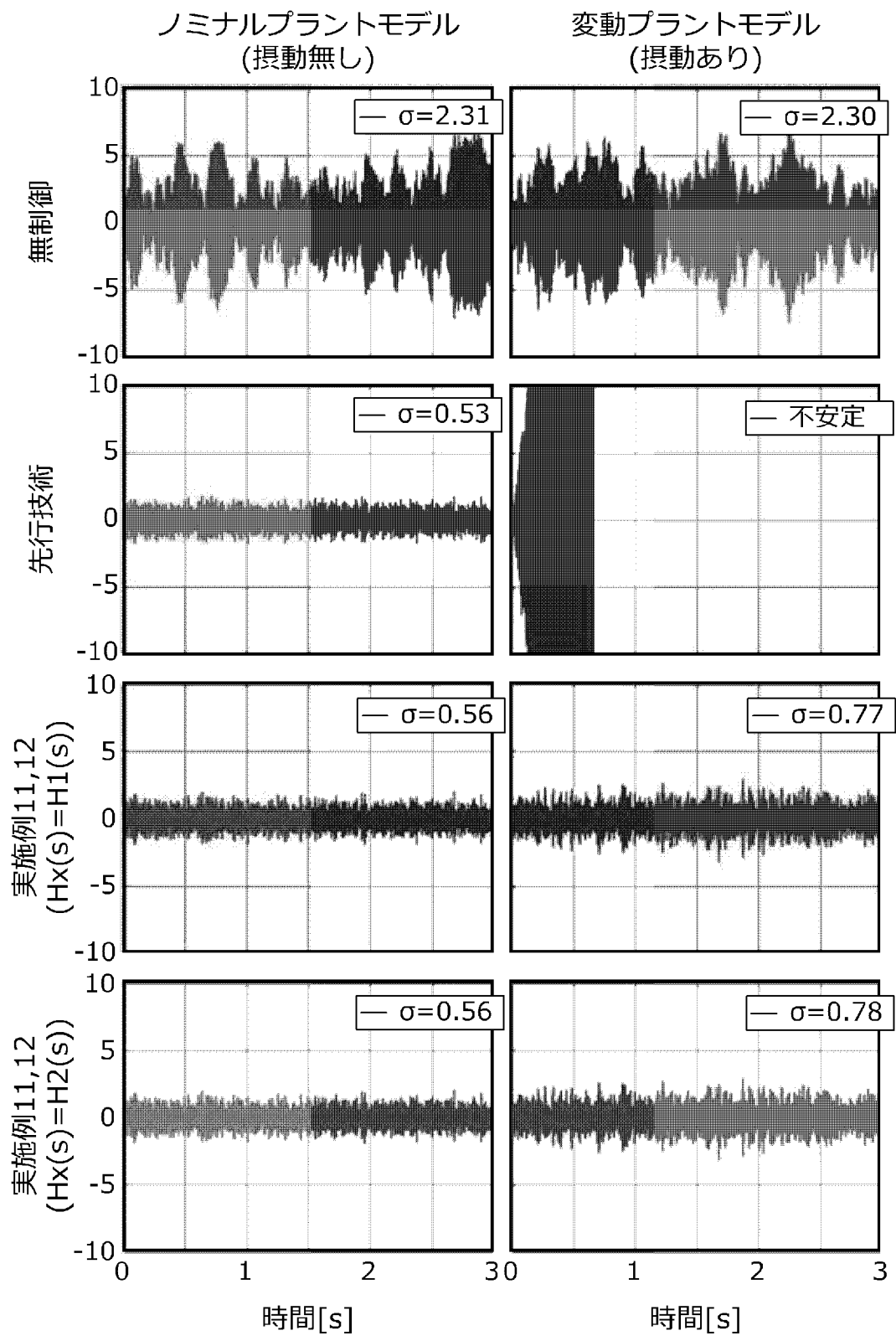
[図26]



[図27]



[図28]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/022496

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M13/02(2006.01)i, G05B13/02(2006.01)i, G05B13/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01M13/00-13/04, G05B13/02, G05B13/04, G01M15/00-15/14, G01M17/00-17/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2015/136626 A1 (Meidensha Corp.), 17 September 2015 (17.09.2015), entire text; all drawings & KR 10-2016-0119260 A	1-14
A	WO 2014/175203 A1 (Meidensha Corp.), 30 October 2014 (30.10.2014), entire text; all drawings & US 2016/0109328 A1 & CN 105143844 A & JP 2014-215253 A	1-14
A	WO 2013/105375 A1 (Meidensha Corp.), 18 July 2013 (18.07.2013), entire text; all drawings & US 2015/0013443 A1 & CN 104081178 A & KR 10-2014-0125782 A	1-14

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
23 August 2017 (23.08.17)

Date of mailing of the international search report
05 September 2017 (05.09.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/022496

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002-206991 A (Meidensha Corp.), 26 July 2002 (26.07.2002), entire text; all drawings & US 2002/0091471 A1 & DE 10200695 A1 & KR 10-2002-0060583 A	1-14
A	JP 2003-149085 A (Meidensha Corp.), 21 May 2003 (21.05.2003), entire text; all drawings & US 2003/0088345 A1 & DE 10247347 A1	1-14
A	JP 2010-71772 A (Meidensha Corp.), 02 April 2010 (02.04.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-14

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01M13/02(2006.01)i, G05B13/02(2006.01)i, G05B13/04(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01M13/00-13/04, G05B13/02, G05B13/04, G01M15/00-15/14, G01M17/00-17/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	W0 2015/136626 A1（株式会社明電舎） 2015.09.17 全文、全図 & KR 10-2016-0119260 A	1-14
A	W0 2014/175203 A1（株式会社明電舎） 2014.10.30 全文、全図 & US 2016/0109328 A1 & CN 105143844 A & JP 2014-215253 A	1-14

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日

23.08.2017

国際調査報告の発送日

05.09.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

山口 剛

2 J

9806

電話番号 03-3581-1101 内線 3252

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2013/105375 A1 (株式会社明電舎) 2013.07.18 全文、全図 & US 2015/0013443 A1 & CN 104081178 A & KR 10-2014-0125782 A	1 - 1 4
A	JP 2002-206991 A (株式会社明電舎) 2002.07.26 全文、全図 & US 2002/0091471 A1 & DE 10200695 A1 & KR 10-2002-0060583 A	1 - 1 4
A	JP 2003-149085 A (株式会社明電舎) 2003.05.21 全文、全図 & US 2003/0088345 A1 & DE 10247347 A1	1 - 1 4
A	JP 2010-71772 A (株式会社明電舎) 2010.04.02 全文、全図 (ファミリーなし)	1 - 1 4