

複数モータ駆動による共振相殺制御を用いた2慣性系の制振制御

犬飼 健二*, 藤本 博志 (東京大学), 高橋 太郎 (トヨタ自動車株式会社)

Actuation Resonance Cancellation Control Using Multiple Motors for Two-Inertia System

Kenji Inukai*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Taro Takahashi (TOYOTA MOTOR CORPORATION)

Abstract

Usually, a humanoid robot using motors has low resonances due to the timing belts at each joint, and the low resonances may deteriorate the response performance and positioning precision. In this paper, a joint of humanoid robot which links the motor side to the load side via timing belt is studied. Regarding this system as a two-inertia system, this paper proposes a novel control method which uses multiple motors in both the motor side and the load side for multi-input-single-output (MISO) system. The proposed method achieves vibration suppression and phase stabilization simultaneously. The implementation is relatively simple since there are only two parameters required in the design. Simulations and experimental results also demonstrate the effectiveness of the proposed control system.

キーワード: 2慣性系, 共振相殺制御, 振動抑制, ヒューマノイドロボット, 位相安定化
(two-inertia system, resonance cancellation control, vibration suppression, humanoid robot, phase stabilization)

1. 緒 言

少子高齢化が深刻化しており, 人に代わる労働力としてヒューマノイドロボットに注目が集まっている。ヒューマノイドロボットを人間の生活環境に柔軟に対応させるためには運動性能の向上が求められる。しかしながら, モータ駆動によるヒューマノイドロボットは, 関節構造のタイミングベルトが低剛性であるため望ましくない共振が生じ, 制御帯域が高くできないという問題がある。それゆえ, プラントをタイミングベルトのばね要素を考慮した2慣性系でモデル化し, 共振抑制制御を導入する必要がある。

モーションコントロールの分野において共振抑制制御は, 2慣性系の共振比を制御する共振比制御, 状態フィードバックにより振動を抑制する手法, ノッチフィルタにより共振を抑制する手法など数多く提案されている^{(1)~(6)}。これらの手法の多くはモータ側の位置のみが計測できる場合の制御手法である。近年, 工作機器などの精密位置決め装置においてモータ側の位置のみでなく, 負荷側の位置も測定できる機器が増加しており, フルクローズド制御化が進んでいる。フルクローズド制御系における複数のセンサを用いた制御手法として, モータ速度でマイナーループ, 負荷側の位置をアウトーループで制御するカスケード制御がよく用いられている。

複数センサであることを積極的にもちいた制御手法として自己共振相殺制御(Self Resonance Cancellation, SRC)^{(7)~(8)}がある。この手法は複数センサをもちいることで, 1入力多出力(SIMO)システムとし, 共振ピークを抑圧し広帯域化を図る手法である。また, プラントのばね定数の変動に対してロバストという特徴がある。しかし, プラントのばね定数以外のモデル化誤差にロバストではなく, 姿勢変化によって慣性モーメント, 重力, 摩擦力などが時々刻々と

変化するヒューマノイドロボットに対し, これらの手法をそのまま適用させることは難しい。そのため, 著者らのグループでは自己共振相殺外乱オブザーバ(SRCDOB)を提案し, SRCとSRCDOBをヒューマノイドロボットに適用することで, 姿勢の変形にロバストな2慣性系の振動抑制制御を実現した⁽⁹⁾。一方で, SRCを拡張したロバストな振動抑制制御として, Frequency Separation Self Resonance Cancellation(FS-SRC)⁽¹⁰⁾が提案されており, 精密ガントリステージにおいて振動抑制と位相安定化を実現している。

従来のSRCやSRCDOBは1つのアクチュエータと複数のセンサを用いたSIMOシステムに対する振動抑制制御である。それに対して, 複数のアクチュエータを用いたMISOシステムでも同様に振動抑制制御とモデル化誤差にロバストな制御ができると考えた。複数モータによる振動抑制制御が可能となれば, モータを分散配置することによる関節構造の小型化が期待できる。本稿では, SIMOシステムであるSRCの双対となる, 2つのアクチュエータと1つのセンサを用いた2慣性系の振動抑制制御手法を提案し, ヒューマノイドロボットの関節構造に適用可能な共振相殺制御を実現する。

2. ヒューマノイドロボットの関節構造と2慣性系モデル

〈2・1〉ヒューマノイドロボットの関節の基本構造

ロボット脚の制御設計の基礎検討をするために, 図1に示す3関節脚ロボットを製作している。3関節脚ロボットは, 股関節, 膝関節, 足首関節の3つの関節を備えており, 図2に示すように, モータからタイミングベルトを介してハーモニックギアと接続されている。それぞれの関節は, サーボモータ, タイミングベルトが持つばね特性, 負荷からなる2慣性系でモデル化できる。また, 各関節はモータ角度のみでなく負荷側に取り付けられたエンコーダにより, フ

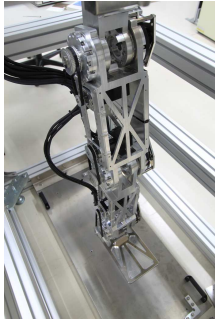


図 1 3関節脚ロボット
Fig. 1. 3-joints leg robot.

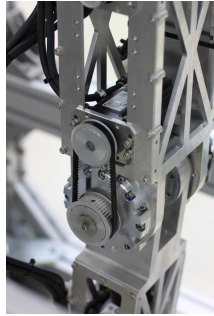


図 2 関節のアクチュエータの構成
Fig. 2. Composition of transmission of Joint.

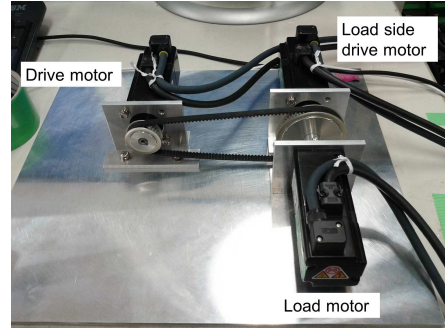


図 3 ヒューマノイドロボットの関節を模擬した実験装置
Fig. 3. Experiment equipment simulating joints of humanoid robot.

ルクローズド制御系が構築できる。

(2.2) ヒューマノイドロボットの関節を模した実験装置と2慣性系のモデル 提案法の有効性を検証するために図3に示すヒューマノイドロボットの関節を模擬した実験装置を作成した。この装置では、ヒューマノイドロボットの関節と同様に、駆動用のモータと負荷側がタイミングベルトにより接続されている。負荷側には、提案法を実現するための負荷側駆動用モータが取り付けられている。また、負荷側にはもうひとつ負荷側外乱トルクなどの負荷を再現するためのモータが搭載されている。本実験装置は、駆動用モータ、タイミングベルトによるばね特性、負荷側駆動モータおよび負荷からなる図4の2慣性系としてモデル化する。図4において、 T はトルク、 θ は角度、 J は慣性モーメント、 B は粘性摩擦係数、 K はばね定数、 r は減速比を示す。添え字は M がモータ側、 L が負荷側を表す。

図5に2慣性系のブロック線図を示す。図5の2慣性系において、モータトルク T_M からモータ角度 θ_M までの伝達関数 P_{MM} 、モータトルク T_M から負荷角度 θ_L までの伝達関数 P_{LM} 、負荷側トルク T_L からモータ角度 θ_M までの伝達関数 P_{ML} 、負荷側トルク T_L から負荷角度 θ_L までの伝達関数 P_{LL} はそれぞれ以下のようになる。

$$P_{MM}(s) = \frac{\theta_M}{T_M} = \frac{J_L s^2 + B_L s + K r^2}{D} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{LM}(s) = \frac{\theta_L}{T_M} = \frac{K r}{D} \dots\dots\dots (2)$$

$$P_{ML}(s) = \frac{\theta_M}{T_L} = \frac{K r}{D} \dots\dots\dots (3)$$

$$P_{LL}(s) = \frac{\theta_L}{T_L} = \frac{J_M s^2 + B_M s + K}{D} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 D は式 (5) のように表される。

$$D = J_M J_L s^4 + (J_M B_L + J_L B_M) s^3 + (r^2 J_M K + J_L K + B_M B_L) s^2 + (r^2 B_M K + B_L K) s \dots\dots\dots (5)$$

よって、2慣性系のプラントには、分母多項式より式(6)に示す共振角周波数 ω_p と、分子多項式より式(7)に示す反

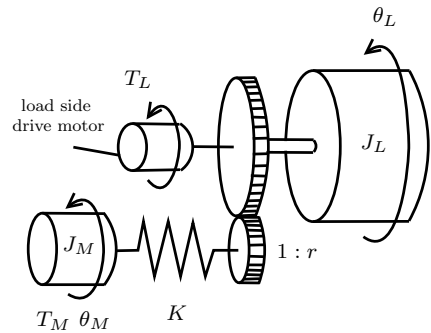


図 4 実験装置の2慣性系モデル
Fig. 4. Model of two-inertia system of experiment equipment.

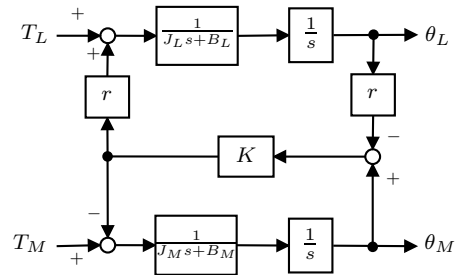


図 5 2慣性系のブロック線図
Fig. 5. Block diagram of two-inertia system.

共振角周波数 ω_z が存在する。

$$\omega_z = \sqrt{K \left(\frac{r^2}{J_L} + \frac{1}{J_M} \right)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{K r^2}{J_L}} \dots\dots\dots (7)$$

実験装置のモータトルク T_M からモータ角速度 $\dot{\theta}_M$ までの周波数特性の測定結果および、それをもとにモデルフィッティングを行った2慣性系モデルのポード線図を図6に示す。表1に、この周波数特性をもとに決定したプラントのノミナル値を示す。ここで、低域のゲインに誤差が生じてるのは非線形摩擦による影響である。

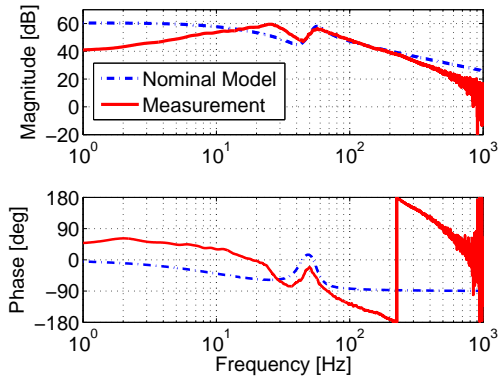


図 6 実験装置の周波数特性
Fig. 6. Frequency characteristic of experiment equipment.

表 1 実験装置のパラメータ
Table 1. Parameter of experiment equipment.

J_M	kg·m ²	8.0×10^{-6}
B_M	N·m/(rad/s)	5.0×10^{-4}
J_L	kg·m ²	2.2×10^{-5}
B_L	N·m/(rad/s)	1.8×10^{-3}
K	N·m/(rad)	0.30
r		2.0

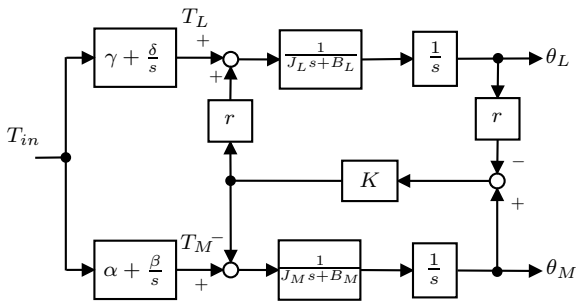


図 7 複数モータ駆動による共振相殺制御
Fig. 7. Actuation Resonance Cancellation.

3. 複数モータ駆動による共振相殺制御

SIMO システムに対して提案された共振相殺制御である SRC は、1つのモータと駆動側および負荷側の2つのエンコーダを用いた共振抑制手法であった。本章では、その双対となる制御系として、2つのモータと1つのエンコーダを用いた共振相殺制御を提案する。

〈3・1〉 複数モータ駆動による共振相殺制御 本節では、SRC の対となる2慣性系の制振制御手法として、複数モータ駆動による共振相殺制御 (Actuation Resonance Cancellation, ARC) を提案する。本手法では、負荷側にもモータを搭載し、2つのモータと負荷側の1つのエンコーダを用いるような MISO システムの制御系を考える。図7に ARC のブロック線図を示す。このブロック線図において、 T_{in} から負荷角度 θ_L までの伝達関数 P_L および、 T_{in} からモータ角度 θ_M までの伝達関数 P_M は、それぞれ以下

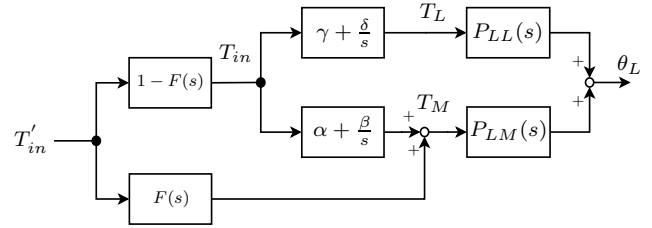


図 8 駆動周波数を分離した共振相殺制御
Fig. 8. Frequency Separation Actuation Resonance Cancellation.

のようになる。

$$P_L(s) = \frac{\theta_L}{T_{in}} = \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) P_{LM}(s) + \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) P_{LL}(s) \quad (8)$$

$$P_M(s) = \frac{\theta_M}{T_{in}} = \left(\alpha + \frac{\beta}{s} \right) P_{MM}(s) + \left(\gamma + \frac{\delta}{s} \right) P_{ML}(s) \quad (9)$$

これらの伝達関数に共振が生じないように $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を決定する。解は無数に存在するが、 K を用いずに以下のように係数を定める。

$$\alpha_{ARC} = \frac{J_M}{J_M + \frac{J_L}{r^2}} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_{ARC} = \frac{B_M}{J_M + \frac{J_L}{r^2}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\gamma_{ARC} = \frac{J_L}{r \left(J_M + \frac{J_L}{r^2} \right)} \dots\dots\dots (12)$$

$$\delta_{ARC} = \frac{B_L}{r \left(J_M + \frac{J_L}{r^2} \right)} \dots\dots\dots (13)$$

ここで α_{ARC} は駆動側からの見掛けの慣性比であり、0 から 1 の値をとる。このとき、 T_{in} からモータ角度 θ_M および負荷側角度 θ_L までの伝達関数は以下の式となり、 $P_{L,ARC}$ および $P_{M,ARC}$ の共振が存在しなくなる。

$$P_{L,ARC}(s) = \frac{\theta_L}{T_{in}} = \frac{1}{r \left(J_M + \frac{J_L}{r^2} \right) s^2} \dots\dots\dots (14)$$

$$P_{M,ARC}(s) = \frac{\theta_M}{T_{in}} = \frac{1}{\left(J_M + \frac{J_L}{r^2} \right) s^2} \dots\dots\dots (15)$$

この制御法は、モータ側と負荷側が軸ねじれ角を生じないように駆動していることと等価であり、負荷側の慣性を負荷側モータで駆動可能である場合に適用可能である。また、コントローラのパラメータにはばね定数 K を含まないため、 K に対してロバストである。

〈3・2〉 駆動周波数を分離した共振相殺制御 本節では、ARC を拡張した、駆動周波数を分離した共振相殺制御 (Frequency Separation Actuation Resonance Cancellation, FS-ARC) を提案する。FS-ARC のブロック線図を図8に示す。ここで、 $F(s)$ はカットオフ周波数 f_{LPF} [Hz] の1次のローパスフィルタであり、以下のように表される。

$$F(s) = \frac{2\pi f_{LPF}}{s + 2\pi f_{LPF}} \dots\dots\dots (16)$$

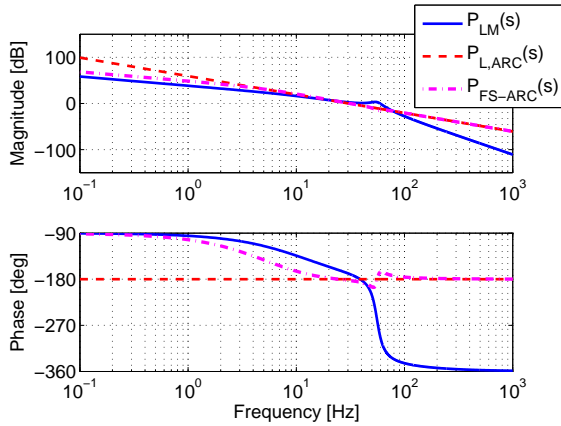


図 9 駆動周波数を分離した共振相殺制御の周波数特性
Fig. 9. Frequency characteristic of FS-ARC.

T'_{in} から負荷側角度 θ_L までの伝達関数は次式で表される。

$$P_{FS-ARC}(s) = \frac{\theta_L}{T'_{in}} = F(s)P_{LM}(s) + \{1 - F(s)\}P_L(s) \quad (17)$$

駆動周波数を分離した共振相殺制御を図 8 のように構成することで、共振の存在しない低周波領域では駆動側の入力を用い、共振の存在する比較的高い周波数領域では駆動側および負荷側の入力により共振を相殺したシステムに対して制御を行う。本手法では、負荷側のモータは比較的高い周波数領域の入力に対して駆動する。よって駆動する周波数を分離することにより、負荷側モータの定格出力がより小さいものを用いて共振を抑制することができる。

ARC では共振を相殺し、入力から負荷側角度までの共振モードを不可観測化していた。それゆえに、外乱が入った場合に予期しない振動が発生してしまう。一方で FS-ARC では共振を完全に相殺しないことで、外乱による振動を抑制も可能である。FS-ARC において、式 (17) の $P_L(s)$ に用いる α は 0 から 1 の値をとる可変な制御パラメータとする。これにより、入力からの応答と外乱応答の振動抑制の効果を調整が可能となる。また、 α により、 β, γ, δ は以下のように表される。

$$\beta = \frac{B_M}{J_M} \alpha \dots \dots \dots (18)$$

$$\gamma = r(1 - \alpha) \dots \dots \dots (19)$$

$$\delta = \frac{B_L}{J_L} r(1 - \alpha) \dots \dots \dots (20)$$

FS-ARC は ARC を含む制御手法であり、 $\alpha = \alpha_{ARC}$, $f_{LPF}=0$ Hz としたときに ARC と等価になる。

図 9 に P_{LM} , P_{LARC} , P_{FS-ARC} ($\alpha = \alpha_{ARC}$) のボード線図を示す。FS-ARC において、ローパスフィルタのカットオフ周波数は、共振の 55 Hz より小さい 5 Hz としている。図 9 から、ARC を適用することで、2 慣性系の共振が存在しなくなっていることがわかる。駆動周波数を分離した FS-ARC においても、共振はほとんど見えなくなっており、本手法は有効であるといえる。また、最終位相も

-180 deg であり、制御しやすいシステムといえる。

図 8 のシステムに対して、フィードバック制御系を構築する。フィードバックコントローラ $C(s)$ は剛体化された $P_{LARC}(s)$ に対して設計し、感度関数 $S_{ARC}(s) = (1 + P_{LARC}(s)C(s))^{-1}$ が安定となるように設計する。本稿では、フィードバックコントローラ $C(s)$ は PID コントローラとし、極配置により設計を行った。設計に際しては、 $S_{ARC}(s)$ の極を 20 Hz に 4 重根配置するようにした。この提案法は剛体モードに対してコントローラを設計すればよいので、容易にコントローラのパラメータを決定することができる。

次に、提案法による制御系の安定性を解析する。コントローラのパラメータである、 α と f_{LPF} を変化させた場合について安定性を解析した。図 10 に f_{LPF} を 0 に固定し、 α を 0 から 1 に変化させたときのナイキスト線図を示す。図 11 に α を 0 に固定し、 f_{LPF} を 0 から ∞ に変化させたときのナイキスト線図を示す。図 10 および図 11 の実線は $\alpha = 0$, $f_{LPF} = 0$ Hz とした場合であり、 $P_{FS-ARC}(s)$ の共振モードは $P_{LL}(s)$ の共振モードである。図 10 の破線は $\alpha = 1$, $f_{LPF} = 0$ Hz とした場合であり、 $P_{FS-ARC}(s)$ の共振モードは $P_{LM}(s)$ の共振モードである。図 11 の一点鎖線は $\alpha = 0$, $f_{LPF} = \infty$ とした場合であり、 $P_{FS-ARC}(s)$ の共振モードは $P_{LM}(s)$ の共振モードである。

これらから、 $P_{FS-ARC}(s)$ の共振モードの描く円の大きさと方向は、 $P_{LL}(s)$ と $P_{LM}(s)$ の共振モードの間で自由に設計することができる。つまり、振動抑制の効果と共振モードの位相安定化が、 α と f_{LPF} という二つのパラメータにより容易に調整可能といえる。

これらの特徴から、本制御手法は、複数センサを用いた SIMO システムに対して提案されている Frequency Separated Resonance cancellation (FS-SRC)⁽¹⁰⁾ と双対になる制御手法であるといえる。

α と f_{LPF} の 2 つのパラメータの調整は簡単に行うことができる。最初に振動抑制の効果を α により決定する。次に、 f_{LPF} を閉ループ系の位相余裕を最大にとるよう選ぶべき。たとえば、共振モードを点 $-1 + j0$ から可能な限り遠ざけるよう選ぶべき。

4. シミュレーション

ARC および FS-ARC の周波数特性をシミュレーションにて評価する。シミュレーションは以下の 3 つの条件で行う。

- Case 1: ARC ($\alpha = \alpha_{ARC}$, $f_{LPF} = 0$ Hz),
 $S_{ARC}(s)$ の極: 30 Hz
- Case 2: $\alpha = \alpha_{ARC}$, $f_{LPF} = 1.0$ Hz,
 $S_{ARC}(s)$ の極: 25 Hz
- Case 3: $\alpha = 0.1$, $f_{LPF} = 5.0$ Hz,
 $S_{ARC}(s)$ の極: 32 Hz

Case1 は ARC を適用したときであり、Case2 は FS-ARC において $\alpha = \alpha_{ARC}$ としたとき、Case3 は $\alpha \neq \alpha_{ARC}$ とした場合である。Case 1 は指令値に対する応答の振動抑制、Case 2 では負荷側駆動モータの小型化、Case 3 では外乱抑

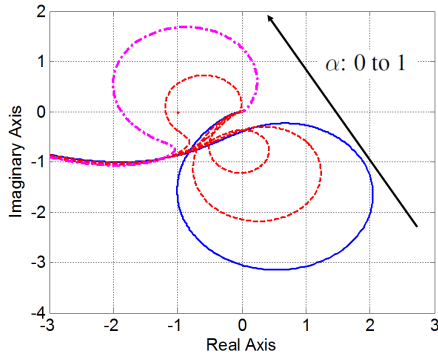


図 10 α を 0 から 1 に変化させたときの提案法のナイキスト線図 ($f_{LPF} = 0$ Hz)
Fig. 10. Nyquist diagram of the proposed system when α is variable in the range from 0 to 1 and $f_{LPF} = 0$ Hz.

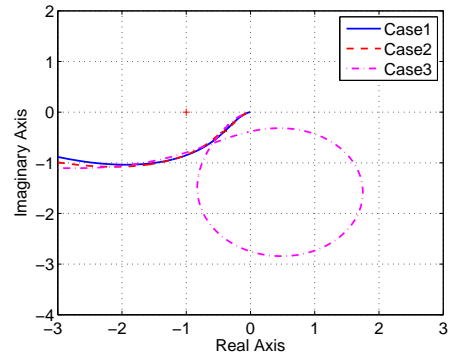


図 12 シミュレーションによるナイキスト線図
Fig. 12. Nyquist diagram in the simulation.

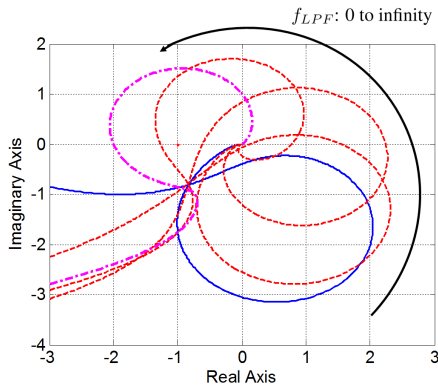


図 11 f_{LPF} を 0 から ∞ に変化させたときの提案法のナイキスト線図 ($\alpha = 0$)
Fig. 11. Nyquist diagram of the proposed system when f_{LPF} is variable in the range from 0 to ∞ Hz and $\alpha = 0$.

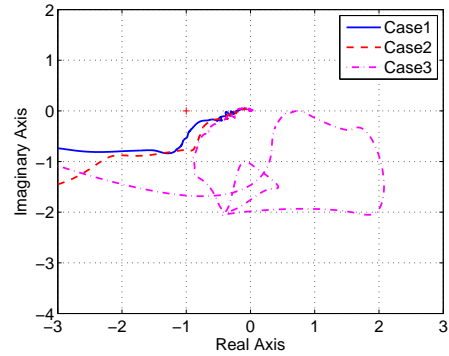


図 13 実験により測定したナイキスト線図
Fig. 13. Nyquist diagram in the experiment.

制性能にそれぞれ重みをおいた設計となっている。Case1において位相余裕が 43.5° となったので、Case2とCase3はそれぞれ位相余裕が等しくなるよう $S_{ARC}(s)$ の極と f_{LPF} を設計した。図 12 に 3 つの条件のナイキスト線図を示す。図 12 から、Case 1 と Case 2 では共振が相殺されている。Case 3 では共振モードが $-1 + j0$ から離れるように配置されている。

5. 実験

ARC および FS-ARC の周波数特性および時間応答を図 3 に示す実験装置にて評価する。シミュレーションと同様の 3 つの条件にて実験を行った。

〈5・1〉 周波数応答 図 13 に実験により測定したナイキスト線図を示す。Case 1 と Case 2 では共振がほぼ相殺されている。Case 3 においては共振モードを点 $-1 + j0$ から遠ざけて配置することができており、シミュレーションと同様の傾向が見られる。

〈5・2〉 時間応答 ステップ状指令およびステップ外乱の時間応答により、ARC および FS-ARC の評価を行う。

〈5・2・1〉 ステップ応答 図 14 に負荷側角度のステッ

プ応答波形を示す。Case 1 では振動が抑制されていることがわかる。Case 2 では振動は抑制されているが、 $S_{ARC}(s)$ の極を遅くしているためオーバーシュートが Case 1 より大きくなっている。Case 3 ではオーバーシュートは小さくなっているが、 $\alpha \neq \alpha_{ARC}$ としているため振動が残っている。

図 15 にステップ応答における Case 1 および Case 2 の負荷側駆動モータのトルク波形を示す。Case 1 と Case 2 を比較するとトルクのピークが Case 2 では 25% 小さくなっている。よって、Case 2 のように FS-ARC を適用することで、負荷側駆動モータを小さくすることができる。

〈5・2・2〉 外乱応答 次に ARC および FS-ARC の外乱応答を評価する。負荷側に $0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$ のステップ状外乱を 0.1 s に与えた。このときの負荷側の角度指令値は 0 rad である。図 16 に外乱応答波形を示す。Case 1 および Case 2 の応答は外乱により振動している。一方で、 $\alpha \neq \alpha_{ARC}$ とした Case 3 では外乱抑制効果が高く振動も抑制できている。

これらの結果より、Case 1 は指令値に対する振動抑制、Case 2 では負荷側駆動モータの小型化、Case 3 では外乱抑制性能にそれぞれ重みをおいた設計となっていることが確認できる。

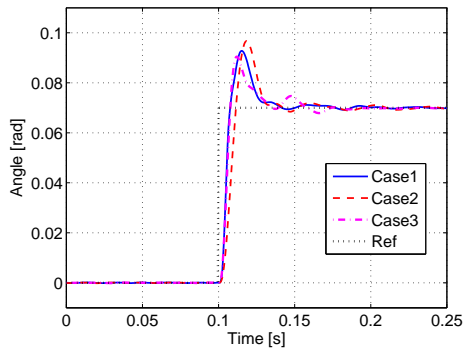


図 14 ステップ応答の実験結果

Fig. 14. Experimental results of step responses.

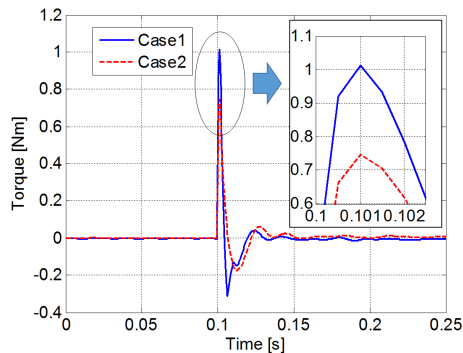


図 15 負荷側駆動モータのトルク波形

Fig. 15. Torque of load side drive motor of step responses.

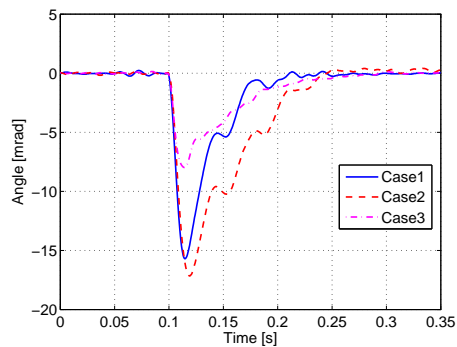


図 16 外乱応答の実験結果

Fig. 16. Experimental results of load side disturbance responses.

6. 結 言

本稿では、駆動側のみでなく負荷側にもモータを搭載し、複数のモータを用いて振動を抑制できる ARC および FS-ARC を提案した。ARC および FS-ARC をヒューマノイドロボットの関節へと適用し、振動抑制が可能であることを示した。シミュレーションおよび実験にて周波数領域で共振が抑制されていることを確認した。また、2つのパラ

メータ α と f_{LPP} により簡単に振動抑制と位相安定化の調整が可能であることを示した。時間応答からも共振周波数の振動が抑制可能であることを示した。また、FS-ARC を適用することで、振動抑制に用いる負荷側に必要なモータを小型化可能であることを示した。

今後は従来の SIMO システムに対する多慣性系の共振相殺制御である SRC と MISO システムとして提案した ARC の比較、および MIMO システムへの理論の拡張を行う。

参考文献

- (1) K. Yuki, T. Murakami, and K. Ohnishi, "Vibration Control of a 2 Mass Resonant System by the Resonance Ratio Control", *Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn.*, vol. 113-D, no. 10, pp. 1162–1169, 1993.
- (2) Y. Hori, H. Sawada, and Y. Chun, "Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 1, pp. 162–168, 1999.
- (3) Y. Hori, H. Iseki, and K. Sugiura, "Basic consideration of vibration suppression and disturbance rejection control of multi-inertia system using SFLAC (state feedback and load acceleration control)", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 4, pp. 889–896, 1994.
- (4) K. Ohishi, N. Shimada, and T. Miyazaki, "High-performance robot motion control based on zero-phase notch filter for industrial robot", *The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.626–630, 2010.
- (5) G. Zhang, J. Furusho, "Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 3, pp. 603–609, 2000.
- (6) Y. Marushita, H. Ikeda, and H. Sugie, "Vibration Suppression Control using the Load-side Acceleration Feedback", in *Proc. the 33th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 810–815, 2007.
- (7) K. Sakata, K. Saiki, and H. Fujimoto, "Design of Feedback Control for Robustness of Resonance Mode using Multiple Sensors for High-Precision Gantry Stage," in *Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-11-065*, pp.83–88, 2011 (in Japanese).
- (8) K. Sakata, K. Saiki, and H. Fujimoto, "Self Resonance Cancellation using Multiple Sensors for Ballscrew Driven Stage," in *Proc. IEEJ Industry Applications Society Conf.*, pp.521–526, 2011 (in Japanese).
- (9) M. Aoki, H. Fujimoto, Y. Hori, and T. Takahashi, "Robust Resonance Suppression Control based on Self Resonance Cancellation Disturbance Observer and Application to Humanoid Robot", in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 623–628, 2013.
- (10) K. Sakata, H. Asaumi, K. Hirachi, K. Saiki, and H. Fujimoto, "Frequency Separation Self Resonance Cancellation for Vibration Suppression Control of a Large-Scale Stage Using Multiple Position Sensors", in *Proc. the 39th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, pp.6478–6483, 2013.