

# ヒューマノイドロボットにおける脚関節用タイミングベルトの 共振を考慮した振動抑制制御

青木 元伸\*, 関 優志, 白石 貴行, 藤本 博志, 堀 洋一 (東京大学), 高橋 太郎 (トヨタ自動車株式会社)

Vibration Suppression Control of Leg Joint with Timing Belt for Humanoid Robot  
Motonobu Aoki\*, Yushi Seki, Takayuki Shiraiishi, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)  
Taro Takahashi (TOYOTA MOTOR CORPORATION)

## Abstract

Humanoid robots are expected to assist and take care of human beings in the near future. Timing belt is widely used in robot legs to transfer power from actuators to joints. Vibrations due to timing belts strongly affect humanoid robots capability of keeping balance and walking without falling. In this paper Self Resonance Cancellation with feedforward vibration suppression control for Humanoid robots is proposed and successfully implemented on a robot leg. Both simulations and experiments are performed varying the robot leg inertia.

キーワード：ヒューマノイドロボット, 負荷変動, 自己共振相殺制御, 振動抑制  
(Humanoid Robot, Load change, Self Resonance Cancellation Control, Vibration Suppression, )

## 1. 緒 言

現在, 少子高齢化は急速に進行している。これに伴い, 二足歩行のヒューマノイドロボットを利用した生活支援・介護ロボットの関心が高まっている。ヒューマノイドロボットは, 人間に合わせて作られた生活環境内での活動に適していると考えられ, 将来, 我々を身近に支援することが期待されている。しかしながら, 現在のヒューマノイドロボットの歩行技術は着実に進歩しているとはいえ, いまだ不安定であり, 我々と共存していく段階には達していない。

不安定な歩行の原因のひとつとなっていると考えられるのが, タイミングベルト部の振動である。タイミングベルト等の弾性関節を有するロボットの場合, 関節角度を直接フィードバックすると制御系の安定性が低下し, 振動が発生することが知られている<sup>(1)</sup>。一方で, 関節周りの形状を小さくし, 人間らしい形状に近づけるために, タイミングベルトを使用することが多い。著者らは, タイミングベルトの振動が起りにくい制御設計をすることで, より安定な歩行を実現することが可能になると考えている。

共振を考慮したサーボ系の設計は, モーションコントロールの分野においては数多く用いられているが, タイミングベルトの剛性変化, さらに慣性モーメントの変動があるロボット脚においてこれらの制御手法をそのまま適用することは困難である。これに対して, 著者らの研究室では自己共振相殺制御 (Self Resonance Cancellation Control, SRC) という複数のセンサを用いた振動抑制制御を提案した<sup>(4)</sup>。この手法は, ばね剛性の変動に非常にロバストであるが, 慣性モーメントの変動に大きく影響を受ける。

そこで本研究では, 自己共振相殺制御を慣性変動にも対

応できるように拡張し, ヒューマノイドロボットの股関節制御に適用することで高い安定性を確保する。本稿では, 誤差圧縮特性を決めるフィードバック (FB) 特性と目標値追従特性を決めるフィードフォワード (FF) 特性を分けて議論する。それぞれシミュレーションおよび実験装置により有効性を示す。

## 2. 制御対象のモデル化

2.1 制御対象の構造とモデリング 図 1(a) に本論文で使用するロボット脚を示す。ロボット脚は図 1(a) のように股関節のモータには, タイミングベルトおよびハーモニックギアを介してリンクが取付けられている。このリンクを大腿部と下腿部で構成されている負荷と考えれば, 図 1(b) の様に考えられる。 $J_M$  はモータ慣性モーメント,  $K$  はタイミングベルトの剛性,  $n$  は減速比,  $B_M$  はモータ側減衰比,  $B_L$  は負荷側減衰比,  $\theta_M$  はモータ回転角,  $\theta_L$  は負荷側回転角である。このモデルのブロック線図を, 図 2 に示す。足先の慣性モーメントの変動は小さいので, ほぼ一定として考えると, 図 1(c) より, 股関節軸に関する運動方程式は,

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (J_1 + J_2 + m_2 L_1^2 + r_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 + (J_2 + m_2 L_1 r_2 \\ & \cos \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - m_2 L_1 r_2 \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_2) \\ & + (m_1 r_1 + m_2 L_1) \cos \theta_1 + m_2 r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (1)$$

となり, 負荷慣性モーメント  $J_L$  は式 (1) の  $\ddot{\theta}_1$  の項より,

$$J_L = J_1 + J_2 + m_2 L_1^2 + r_2 \cos \theta_2 \dots \dots \dots (2)$$

となる。 $J_1$  は股関節軸周りの大腿部イナーシャ,  $J_2$  は膝関節周りの下腿部イナーシャ,  $m_1$  は大腿部質量,  $m_2$  は下腿

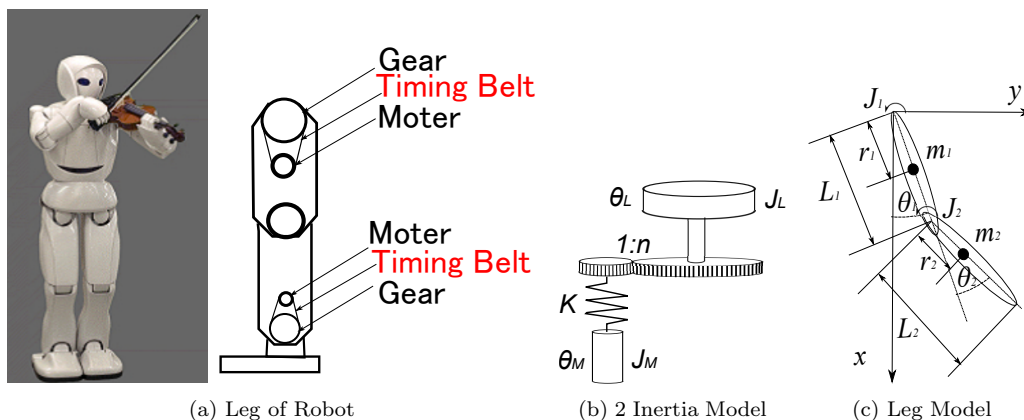


図 1 Modeling for Leg of robot

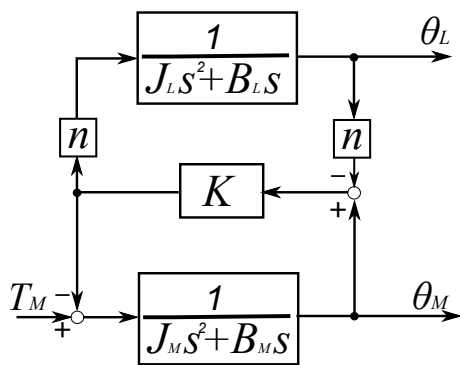


図 2 2 Inertia System

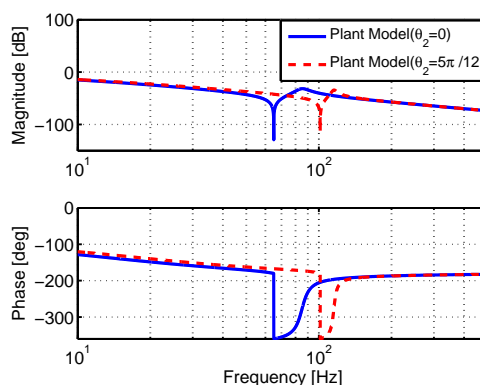


図 3 Frequency Response of Plant

表 1 Model Parameter

$J_1$	[N · m/s <sup>2</sup> ]	0.201	$r_1$	[m]	0.181
$J_2$	[N · m/s <sup>2</sup> ]	1.48	$r_2$	[m]	0.226
$m_1$	[kg]	4.21	$J_M$	[N · m/s <sup>2</sup> ]	$5.0 \times 10^{-4}$
$m_2$	[kg]	7.85	$B_M$	[N · m/s]	0.07
$L_1$	[m]	0.330	$B_L$	[N · m/s]	0.00
$K$	[N/m]	61.8	$n$		100

表 2 Gain Margin and Phase Margin for Each Controller

	G <sub>m</sub> [dB]	P <sub>m</sub> [deg]
PID	$\infty$	34.2
PID+Notch Filter	24.5	25.3
SRC	9.6	37.3

部質量,  $L_1$  は股関節軸から膝関節軸までの距離,  $r_1$  は股関節軸から大腿部重心までの距離,  $r_2$  は膝関節軸から下腿部重心までの距離,  $\tau_1$  は股関節に加わるトルク,  $\theta_1$  は股関節角,  $\theta_2$  は膝関節角, また,  $T_m$  から  $\theta_m$  までの伝達関数は, 直立の場合を想定した  $\theta_2 = 0$  の場合と足を大きく開いた姿勢を想定した  $\theta_2 = 5\pi/12$  のとき, 図 3 になる。

### 3. 自己共振相殺制御<sup>(4)</sup>

3.1 自己共振相殺制御 SRC は, モータエンコーダのみならず負荷側にも位置センサを取付け, 制御対象を

単入力多出力系とし, これらを用いて制御対象の特性そのものを利用して共振を抑制する手法である。<sup>(4)</sup> 同手法は, 2 慣性系のばね剛性の変動にロバストな制御系設計手法である。剛体モードに対し制御器を設計し, さらに,  $\alpha$  および  $\beta$  を式 (5) として設計すればよい。図 5 に SRC のブロック線図を示す。本論文では, PID 制御器をベースに SRC を設計する。剛体モデルをノミナルプラントとして

$$P_N = \frac{1}{J_M s^2 + B_M s} \dots \dots \dots (3)$$

を用いて極配置を行う。極は  $-200\text{rad/s}$  の重根配置とした。

$$C_{PID} = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s} \dots \dots \dots (4)$$

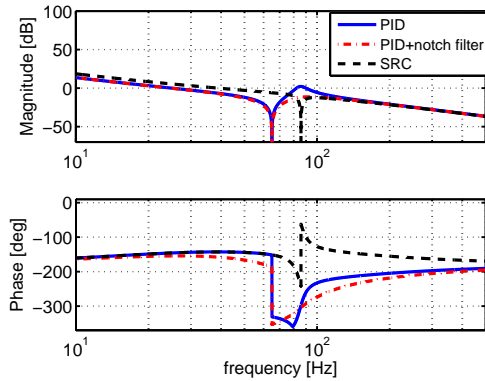
$$\alpha = 1, \quad \beta = \frac{1}{n} \cdot \frac{J_L}{J_M} \dots \dots \dots (5)$$

制御対象は,

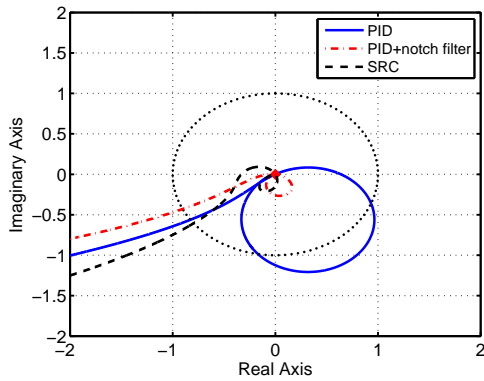
$$P_L = \frac{\theta_L}{T_M} = \frac{Kn}{D_P} \dots \dots \dots (6)$$

$$P_M = \frac{\theta_M}{T_M} = \frac{J_L s^2 + B_L s + Kn^2}{D_P} \dots \dots \dots (7)$$

であり,  $D_P$  は,



(a) Bode Diagram



(b) Nyquist Diagram

図 4 Open Loop Characteristics for Each Controller

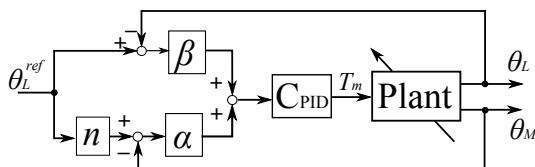
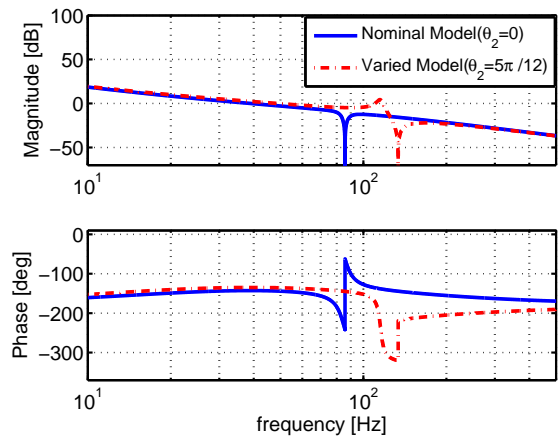


図 5 Block Diagram of Conventional SRC

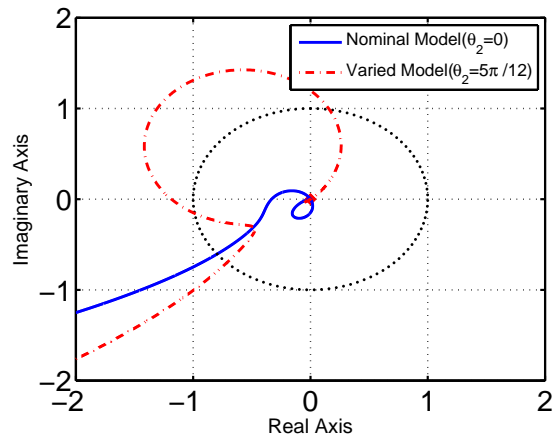
$$\begin{aligned}
 D_P = & J_M J_L s^4 + (J_M B_L + J_L B_M) s^3 \\
 & + (J_M K n^2 + B_M B_L) s^2 + (K n^2 B_M B_L) s^2 \\
 & + (K n^2 B_M + K B_L) s \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

である。

**3.2 開ループ伝達関数によるフィードバック制御器の比較** 開ループ伝達関数から、制御器の比較を行う。直立状態を想定した膝関節  $\theta_2$  が 0 rad の場合の FB 制御器の比較を行う。比較する制御器は PID 制御器、PID 制御器 + ノッチフィルタ、および SRC の 3 種類により行う。このときの PID 制御器の  $C_{PID}$  パラメータは 3 種類とも、 $a_2 = 73.8$ ,  $a_1 = 16000$ ,  $a_0 = 73.8$ ,  $b_1 = 660$  である。図 4(a), 図 4(b) をみると、PID 制御器のみ場合、共振が顕著に表れている。また、PID 制御器 + ノッチフィルタの場合、共振ピークは抑圧されているが、位相余裕が低減している。一方、SRC を用いた場合、共振を消すと同時に位相余裕を確



(a) Bode Diagram



(b) Nyquist Diagram

図 6 Open Loop Characteristics for Conventional SRC

保している。

**3.3 慣性モーメントの変化が制御系へ及ぼす影響** 直立状態を想定した膝関節角度  $\theta_2$  が 0 rad の場合の  $J_L$  の値をノミナルプラントとして SRC 制御器を設計した場合を考える。その際に、歩行等で足が曲がることを想定し、膝角度  $\theta_2$  が  $5\pi/12$  になった場合の開ループ伝達関数を図 6(a) および、図 6(b) に示す。慣性モーメントが変動した場合に SRC 制御器が不安定となっている。つまり、慣性変動に弱いことが現状の SRC の問題点である。SRC 制御器が慣性モーメントの変動に弱いということは式 (5) に慣性モーメントの項が含まれていることからわかる。一方でばね剛性  $K$  は SRC の設計に含まないため、ばね剛性の変動にはロバストである。

**3.4 慣性モーメントの変動に対応した自己共振相殺制御** 3.3 節で示したように SRC は、ばね剛性の変動にはロバストであるが、慣性モーメントの変動に弱い。そこで、各関節の角度を計測し、式 (2) から負荷側の慣性モーメント  $J_L$  を計算し、SRC 制御器のパラメータを慣性モーメントの変動にリアルタイムで対応させる方法を提案法と

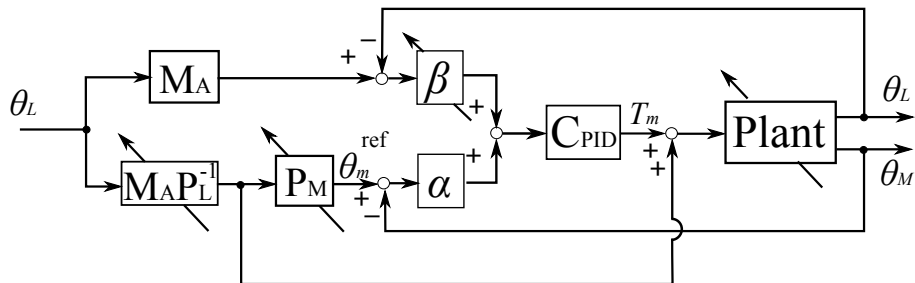


図 9 Block Diagram of Adaptive SRC with Adaptive FF

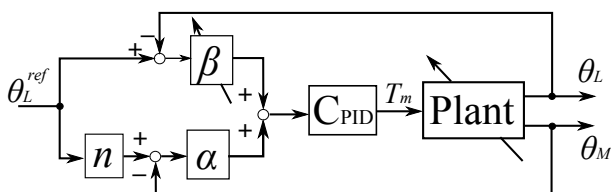
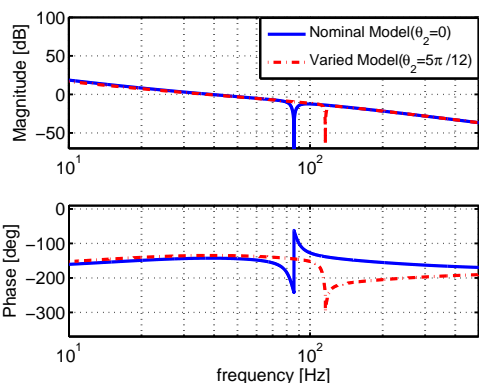
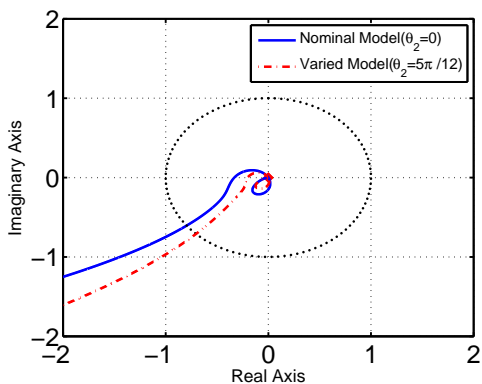


図 7 Block Diagram of Adaptive SRC

	$\theta_2$ [rad]	G <sub>m</sub> [dB]	P <sub>m</sub> [deg]
Conventional SRC	0	9.6	37.3
Conventional SRC	$5\pi/12$	unstable	unstable
Adaptive SRC	0	9.6	37.3
Adaptive SRC	$5\pi/12$	13.9	45.2



(a) Bode Diagram



(b) Nyquist Diagram

図 8 Open Loop Characteristics for Adaptive SRC

する。また、マルチリンク構造を想定した場合にもニュートン・オイラー法で比較的簡単に計算できる。本提案法は、ばね変動に強く、さらに慣性変動にも強い制御系である。図 8(b) より提案法は、慣性モーメントが変動した場合で

も、変動に合わせて制御器のパラメータを適応させることで制御系の安定性を保つものである。

#### 4. 制振フィードフォワード

本章では規範モデルとして、

$$\frac{\theta_L}{\theta_L^{ref}} = M_A = \frac{\tau_M^4}{(s + \tau_M)^4} \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau_M = 1000[\text{rad/sec}] \dots\dots\dots (10)$$

となるように FF 制御器を構成する。

4.1 慣性モーメントの変動に対応した制振フィードフォワード設計 著者らのグループでは、PTC や制振 PTC に代表される逆モデルを用いた制振 FF 設計を磁気ディスク装置やステージに適用している<sup>(5)(6)</sup>。しかしながら、これらの手法は今までモデル変動に対して考慮されていない。制振 FF に関しても、3.4 節と同様に慣性モーメントをリアルタイムに計算することで、ロボット脚の姿勢変化により慣性変動に適応させることを考える。図 7 に本制御系のブロック線図を示す。この際のプラントの逆モデルにおいても、式 (2) を用いて慣性モーメントの変動にリアルタイムに対応させる。シミュレーションにより、逆モデルを固定したものと、逆モデルのパラメータをリアルタイムに適応させたものとで比較する。振動抑圧の比較のため、定常誤差の影響を無視できるよう、コリオリ力と重力は無視し、PID 制御器を遅い極（重根配置）20 rad/s として両手法に加えたもので比較を行った。図 11 より、指令値に対する誤差は、従来法が最大で 0.31 mrad であるのに対し、提案法は最大で 67 μrad となり、逆モデルをリアルタイムに対応させることで、従来法に比べ振動を著しく小さくできている。

4.2 自己共振相殺制御における制振フィードフォワード設計 SRC における FF 補償の方法を説明する。3.4 節で提案した SRC の手法と 4.1 節で提案した FF の手法を組

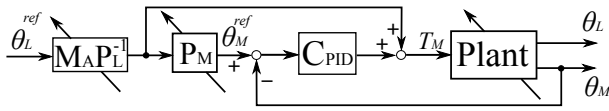


図 10 Block Diagram of Adaptive FF with PID

表 4 Phase Margin and Bandwidth for Experimental Setup( $\theta_2=0$ [rad])

	$P_m$ [deg]	Bandwidth[Hz]
SRC	78.8	8.9
PID	32.2	1.0

合わせ、SRC 制御器及び逆モデルを用いた制振 FF のパラメータ両方を慣性モーメントの変動にリアルタイムで適応させる、図 9 の 2 自由度制御系が本論文における最終的に提案する制御系である。シミュレーション結果を図 12 に示す。このシミュレーションにおいてはコリオリ力と重力をプラントモデルに入れ、これらの外乱に対する外乱抑圧性能を比較する。図 12 より、本提案手法は PID 制御器を用いたものに比べ、コリオリ力と重力にロバストとなっていることが分かり、振動が小さく抑えられている。提案手法は位相余裕を大きく確保し、高帯域化できているため、従来手法に比べ振動抑制が実現できている。

### 5. 模擬実験機による実験

#### 5.1 実験機概要

ロボット脚を模擬した実験装置で SRC 制御を行った。実験機を図 13 に示す。本実験機は、モータと負荷がプーリを介してタイミングベルトで繋がっており、負荷側にエンコーダをつけることで SRC を模擬できるようになっている。モータ出力は 100W である。また、本実験機の負荷には脚が取り付けられており、膝の角度を変更することで慣性モーメントを変更することが可能である。

#### 5.2 模擬実験機による SRC 実験

PID と SRC の比較を行う。それぞれの制御器は共に、制御対象の剛体モードに対し、 $-50\text{Hz}$  で重根配置により極配置を行っており、位置指令値を矩形波とする。また、むだ時間による位相遅れを補償するために両制御器に位相進みフィルタを加えている。実験は膝関節  $\theta_2$  を  $0\text{rad}$  として行った。各制御器は共に同様の剛体モードに対し同じ極配置により設計したにもかかわらず SRC の方が帯域、位相余裕が共に大きく保たれていることが確認できる。図 14,15 の実験結果から、SRC の方が帯域が高いため応答が速いことがわかる。また、同様の実験を  $\theta_2$  が  $5\pi/12\text{rad}$  で行い、 $\theta_2$  が  $0\text{rad}$  の場合と同様に帯域、位相余裕が大きく保たれている。

### 6. 結 言

本稿では、慣性モーメント変動に対応した自己共振相殺制御および慣性モーメント変動に対応した制振フィードフォワードをロボット脚へ適用することでタイミングベルトの振動抑制ができることをシミュレーションにより示した。また、実験機により、SRC をロボット脚に適用し、慣性変

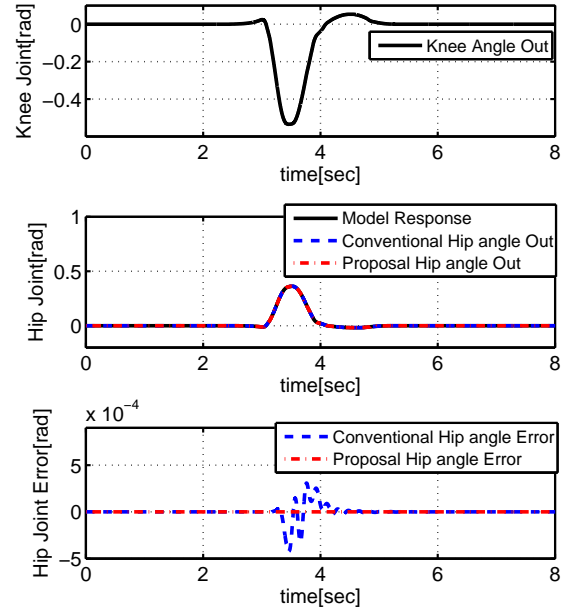


図 11 Simulation Result of Adaptive FF with PID

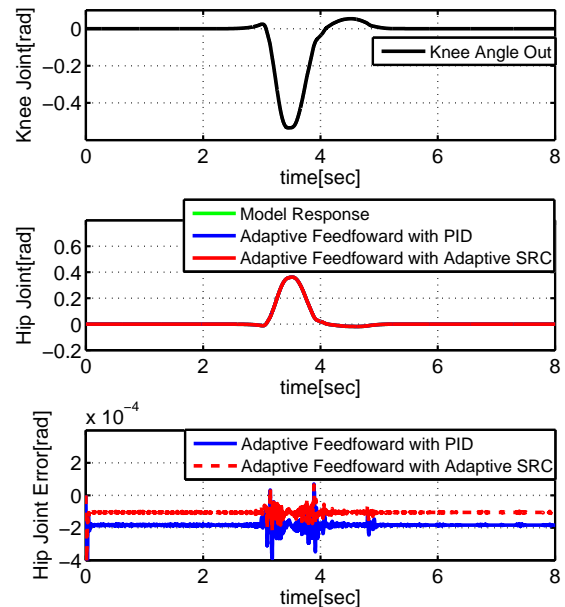


図 12 Simulation Result of Adaptive FF with Adaptive SRC

動に対応させることで、帯域を大きく保つことが可能であることを示した。今後は、負荷側にエンコーダをつけた脚ロボットを作成し、慣性モーメントの変動に対応した自己共振相殺制御及びフィードフォワードをリアルタイムに行

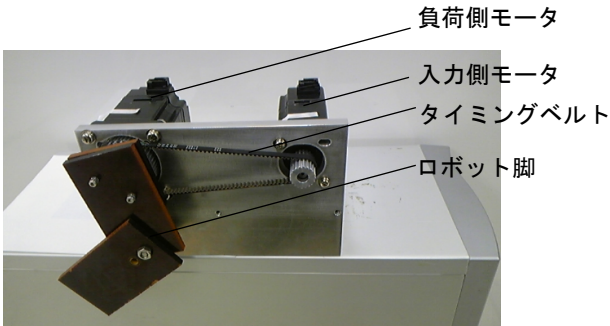


図 13 Experimental Setup

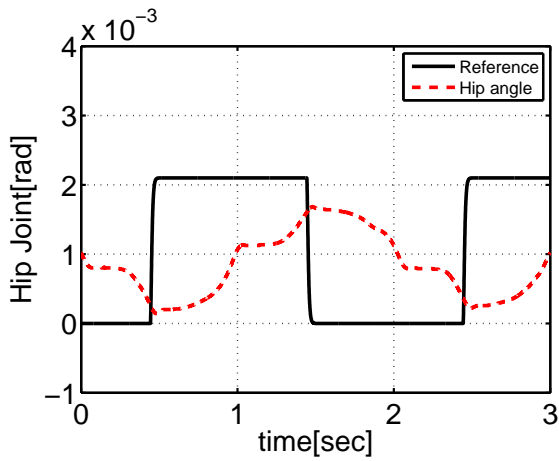


図 14 Time Response of PID

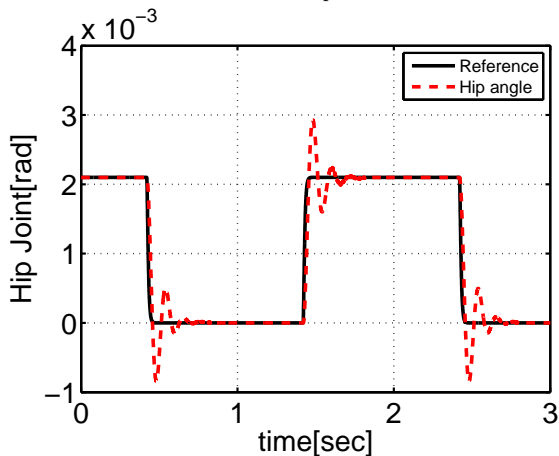


図 15 Time Response of SRC

い、有効性を明らかにする予定である。

#### 参考文献

- (1) C.H. An and J.M. Hollerbach: " Dynamic stability issues in force control of manipulators, " Proc. American Control Conference, Minneapolis, pp.10-12, 1987.
- (2) Shumpei Okumura, Yasutaka Fujimoto: " A Control of multiinertia system for a biped robot with elastic joints ", Annual Conference of the Robotics Society of

Japan, 2008(in Japanese)

奥村俊平・藤本康孝:「弾性関節を有する2足歩行ロボットの多慣性制御」, 日本ロボット学会学術講演会, 10I-05, 2008.9.6

- (3) Shumpei Okumura, Yasutaka Fujimoto: " Multiaxial vibration suppression control for a biped robot with elastic joints ", in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, 2009(in Japanese)  
奥村俊平・藤本康孝:「弾性関節を有する2足歩行ロボットの多軸振動抑制制御」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-09-129, 2009.3
- (4) 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.8388, 2010 (in Japanese).
- (5) H. Fujimoto, Y. Hori, T. Yamaguchi, S. Nakagawa: " Seeking Control of Hard Disk Drive by Perfect Tracking using Multirate Sampling Control ", T.IEE Japan, 120-D, No.10, pp.1157-1164(2000-10)(in Japanese)
- (6) K. Fukushima, H. Fujimoto, S. Nakagawa, " Short-Span Seeking Control of Hard Disk Drive with Vibration Suppression PTC ", T. IEE Japan, Vol.126, No.6, pp706-712 (2006) (in Japanese)
- (7) 大野尚史, 大西公平, 「二足歩行ロボットにおける状態加速度に基づいた切り替えバランス制御」, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-2011, Vol 2. pp.671-676, (2011)