

二足歩行ロボットの脚リンク機構における 機構と制御の同時最適化の基礎検討

関優志* , 藤本博志 (東京大学) , 高橋太郎 (トヨタ自動車)

Basic Examination of Simultaneous Optimization of Mechanical and Control Design
for the Multi-Link Mechanics of Biped Robot Leg
Yushi Seki* , Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)
Taro Takahashi (Toyota Motor Corporation)

Abstract

Many mechanism of biped robots are composed of harmonic drive gearing and timing belt for the multi-link of legs. In the frequency characteristics of biped robot legs, there exists some resonance modes at tens of Hz. These resonances become problems in the control system, which is the problem specific to the multi-link of biped robot leg. In this paper, the optimized design of particular parameter changes of the biped robot leg is proposed from the viewpoint of control engineering. Simulations and experiments with an experimental biped robot are performed to show advantages of the proposed optimized design.

キーワード：二足歩行ロボット, 同時最適化, 共振, リンク構造
(Biped robot, Simultaneous Optimization, Resonance, Link Mechanics)

1. 研究背景

二足歩行ロボットの研究は Vukobratovic らが提案した ZMP (Zero Moment Point) に関する研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾ が盛んである。近年では、不整地に適応させる研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾ やビジョンセンサと組み合わせた研究⁽⁶⁾ なども挙げられる。また、加速度センサによる上体バランス制御⁽⁷⁾ や腰回りのトルクによる踏み出し制御⁽⁸⁾ など人間の動作に着目した研究も多い。

二足歩行ロボットには脚部のリンク機構にハーモニックギヤやタイミングベルトを有した構造が多く用いられる。そのため、複数の慣性やハーモニックギヤの弾力性による動作時の振動などの問題を持つ。ハーモニックギヤの振動を抑制するために古荘らのハーモニックドライブを有するリンクアームの振動制御⁽⁹⁾ や村井らの弾性機構を有するアクチュエータの制御を二足歩行ロボットに応用する研究⁽¹⁰⁾ などが検証されている。

従来、ロボットの設計とモータの制御系設計はそれぞれ独立的に行われており、作られたロボットに対して制御系を構築している。そのため、先に作られたロボットが制御し易い機構であるとは必ずしも言えない。また、二足歩行ロボットには位相安定化の観点におけるロバスト性への明確な仕様条件が定められていないことが多い。モーションコントロールの分野では、十分なロバスト性を持たせる手法として前田らの円条件に基づく FB 補償器設計⁽¹¹⁾ や著者らの機構と制御の同時最適化手法⁽¹²⁾ など位相余裕とゲイン余裕に着目した仕様条件の提案がされている。

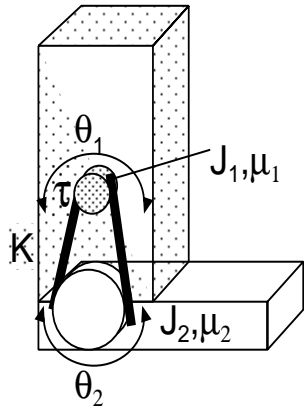
本稿では、これまで超精密位置決め装置において検証した手法を二足歩行ロボットに適用させ、現状のロボットに対し制御し易く安定性を持つ機構のパラメータと制御器最



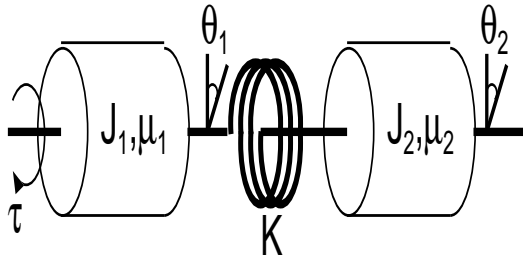
図 1 二足歩行ロボット
Fig. 1. Biped robot.

適化について提案する。

検証方法は以下となる。まず、実験機に対してモータエンコーダの角度情報を用いて脚部リンク機構の周波数特性を測定し、リンク機構の共振の解析を行う。測定した周波数特性に合うよう脚部リンク機構のシミュレーションモデルを設計する。次に足平部分のイナーシャやタイミングベルトの剛性など機構パラメータを変更することで共振周波数を変更し、安定余裕を持つように仕様条件を定めて制御器の最適化を行う。最適化した制御器を用いて、指令値に対する追従誤差を小さくすることで最適化の有効性を示す。最後に、シミュレーションで得られた検証結果を基に、実験機による実証実験を行う。



(a) Spring-mass-damper model



(b) 2-inertia model

図2 ロボットの脚部モデル
Fig. 2. Robot leg models.

2. バネ-マス-ダンパ系の伝達関数の導出

図1に実験で用いる二足歩行ロボットを示す。脚部には股、膝、足首にピッチング方向のモータとエンコーダを一つずつ搭載しているため片脚3自由度となる。また、股関節と足首関節はモータプーリからタイミングベルトを介したハーモニックギヤにより駆動する。本稿では、二慣性系の機構として捉えやすく歩行時の安定性に関わる重要な部位として足首関節に着目しモデル化を行う。

一般的にはコリオリ力などを考慮した2自由度のマニピュレータモデルがロボットのモデリングに用いられる。しかし本稿では、タイミングベルトの弾性変形が共振の要因としており、関節部分の剛性と足平部位のイナーシャに関する議論が望ましく、図2(b)に示すバネ-マス-ダンパ系の(1)式に近似した2慣性系モデルとして用いる。また、測定時には足首関節のピッチングモータのみにモータトルクを入れ、他の関節はサーボロックを掛けて周波数特性を測定している。そのため、他関節部の角度は $\theta \ll 1$ となるためバネ-マス-ダンパ系の式に近似している。

図2(c)のようにモータ部分のイナーシャを J_1 、ハーモニックギヤを含む足平部分のイナーシャを J_2 、各部分の粘性係数を μ_1, μ_2 とし、2つの慣性間をタイミングベルトの剛性 K としたモデルである。また、モータプーリからハーモニックギヤへの減速比は $1/120$ である。

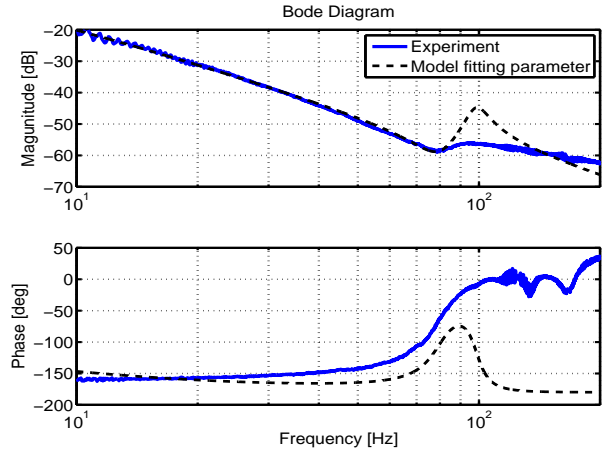


図3 プラントモデルの周波数特性
Fig. 3. Frequency characteristics of the plant model.

表1 フィッティングパラメータ

Table 1. Fitting model parameter.

| Inertia of motor | J_1 | 1.0 | $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ |
|--------------------------------|---------|-----|---------------------------------------|
| Inertia of ankle | J_2 | 4.3 | $\text{g}\cdot\text{m}^2$ |
| Twist dumping of motor | μ_1 | 0.1 | $\text{mN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ |
| Twist dumping of ankle | μ_2 | 0.5 | $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ |
| Spring constant of timing belt | K | 132 | kN/m |

$$\mathbf{J}\ddot{\theta} + \mathbf{D}\dot{\theta} + \mathbf{K}\theta = \mathbf{T} \dots \dots \dots (1)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 & -R_1 K_1 \\ -K_1 & R_1 K_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}.$$

図3は実測値の足首関節のモータトルクからモータエンコーダまでの周波数特性を表している。表1のパラメータでフィッティングさせたプラントモデルを図3の破線で示した。リンク機構の弾性変形による80 Hz付近の共振、低周波数帯域のゲイン特性に沿うように2慣性系モデルでフィッティングをしている。また、シミュレーション内において通信遅れの4 msをムダ時間としてプラント特性に付加している。

3. 二慣性系モデルを用いたシミュレーション

機械パラメータの最適点を導出し安定余裕にロバストな制御器を設計し、指令値に対する追従特性により検証を行う。

3.1 制御器設計 (2)式に示すPID制御器は閉ループ極 ω_p の4重根極配置設計により設計する。制御器を設計する際のノミナルプラントはプラントモデルの剛体部を用いている。また、ロボットでは歩行時などのイナーシャ変動があるためノッチフィルタなどの積極的に制振を行う制御器は用いないことを前提とする。

$$C(s) = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{s(c_1 s + 1)} \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{cases} b_1 = 6\omega_p^2 J_1 c_1 \\ b_2 = 4\omega_p^3 J_1 c_1 \\ b_3 = \omega_p^4 J_1 c_1 \\ c_1 = a_1 / (4\omega_p J_1 - \mu_1) \end{cases}$$

3.2 最適化方法 機械パラメータの変更方法と制御器の設計方法, 評価方法について述べる。まず, 複数のパラメータの中から変更するパラメータを一つ選び, 機構の特性を考慮した範囲内での変更限度幅 (C_{min}, C_{max}) と変更幅 ΔC を指定する。変更限度幅で変更パラメータを ΔC ずつ変更し, 変更の度に制御器を設計し感度関数ピークを取る。

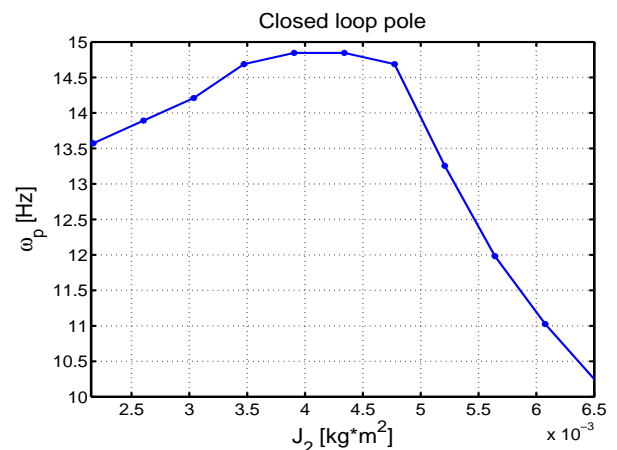
感度関数において許容する感度関数ピーク ($|S_p| < \eta$) を仕様条件として設定し, $|S_p| < \eta$ を満たしている場合には閉ループ極 $\omega_p[k]$ を $\omega_p[k+1] = \omega_p[k] + \epsilon$ として用いる。 $\omega_p[k+1]$ で設計した制御器を用いて $S_p \geq \eta$ となる時に $\omega_p[k]$ を最適値とする。以下のシミュレーションでは実験の制御器上限値を考慮し, $1 \leq \omega_p[k+1] < 15$ Hz, $\epsilon = 1.0$ rad/s として設定した。

3.3 イナーシャ J_2 の最適化 変更パラメータとして設計上で変更しやすく, 共振周波数に関わる足平部分のイナーシャ J_2 を用いる。変更限度幅は (C_{min}, C_{max}) = ($J_2 \times 0.5, J_2 \times 1.5$), 変更幅 ΔC は 0.1 倍ずつの計 11 点を取る。 $\eta = 5.0$ と設定し感度関数ピークの仕様条件は $|S_p| < 5.0$ dB とした。

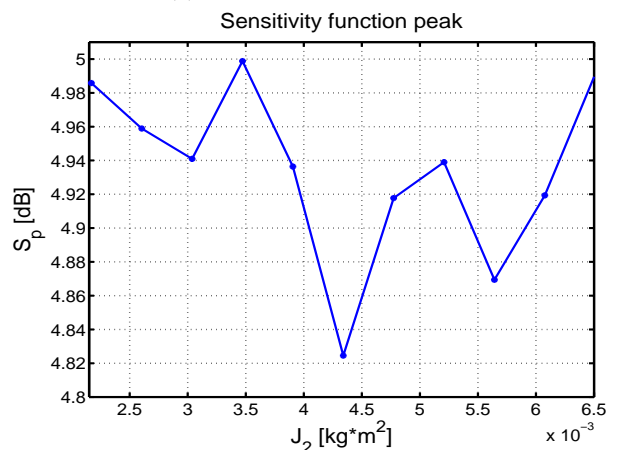
各変更幅ごとの最適制御器の閉ループ極 ω_p を図 4(a), 最適制御器を用いた場合の感度関数ピークの値を図 4(b) に示した。図 4(a) から, 最適閉ループ極 $\omega_p = 14.9$ Hz が最も高くなる値は 2 点あることがわかる。さらに, 図 4(b) からは, $J_2 = 4.3 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ の時に感度関数ピークが最も低い 4.82 dB まで下がることが分かる。よって, $J_2 = 4.3 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ を最適値とする。

3.4 最適値モデルに対する考察 以上の結果を基に, 最適値の J_2 , 下限値である最適値の 0.5 倍, 上限値である最適値の 1.5 倍とした 3 つのモデルを用いて検証を行う。図 5 に各モデルの周波数特性を示す。イナーシャ J_2 を 0.5 倍したモデルはイナーシャを小さくしたことで共振周波数が高くなり, 1.5 倍したモデルはイナーシャを大きくしたことで共振周波数が低くなっている。

図 6(a) に示す矢印の長さの逆数が図 6(b) の感度関数ピークの大きさに相当している。また, 高帯域化されている最適値モデルは他の 2 つに比べ低域の感度関数ゲインが下がっており, 低周波数帯域の外乱抑圧効果が高くなる。図 6(a) から最適値モデル (実線) は共振の位相進みによって他の点よりも感度関数ピークが立ちにくい配置になっていることが分かる。直感的には足平のイナーシャ J_2 を小さくするこ



(a) Optimal closed loop pole



(b) Sensitivity peak

図 4 J_2 の変更による最適化結果

Fig. 4. Results of the optimal method by the change of J_2 .

とで共振周波数が高くなるため, 性能が良くなると考えられるが, 必ずしも性能が上がるわけではない。本稿のように仕様条件によっては共振部分の位相進みによって感度関数ピークが仕様条件を満たすようになるため, 高帯域化が望める結果を得る。

3.5 軌道追従特性 二足歩行ロボットの歩行時に入力する足首の角度指令値を図 7(a) に示す。両足静止した状態から一歩歩行, 両足静止, 三歩歩行した場合の指令値となっている。図 7(b) には, 指令値に対するモータ角度の角度誤差を示している。表 2 に示すように, $Case 1$ における追従誤差の 3σ 値は ± 6.01 rad, $Case 2$ が ± 6.00 rad, $Case 3$ は ± 6.81 rad となる。高帯域化された制御器を用いたことにより, 最適モデルにおける追従誤差が小さくなっている。以上より, 軌道追従シミュレーションにより最適設計の有効性を示した。

4. 二足歩行ロボットを用いた実験検証

実験では足首部分の機構変更を行い, 共振周波数の異な

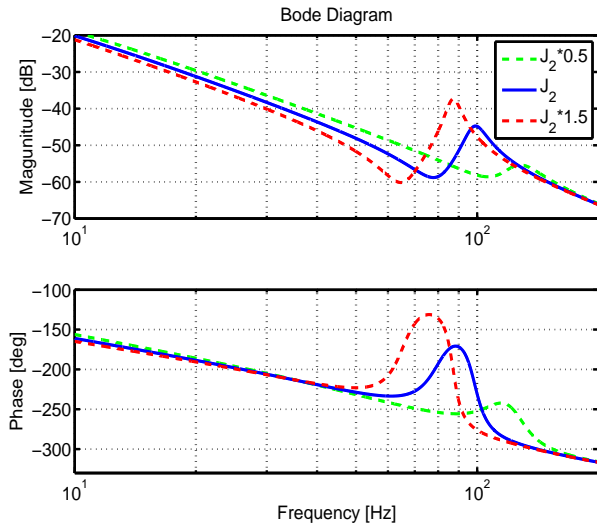


図 5 イナーシャ J_2 の変更による周波数特性
Fig. 5. Frequency characteristics by the change of inertia J_2 .

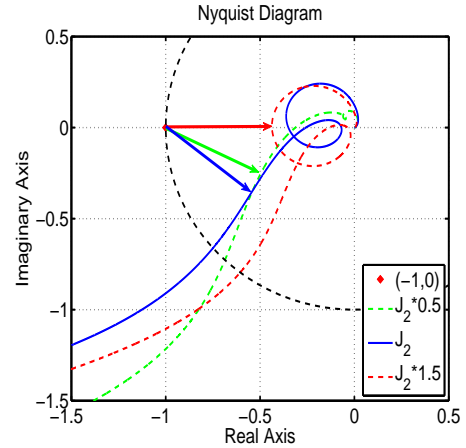
表 2 追従誤差の 3σ 値
Table 2. 3σ of tracking error.

| | $J_2 \times 0.5$ | J_2 | $J_2 \times 1.5$ |
|------------|------------------|----------|------------------|
| ω_p | 13.57 Hz | 14.85 Hz | 10.23 Hz |
| 3σ | 0.41 rad | 0.35 rad | 0.98 rad |

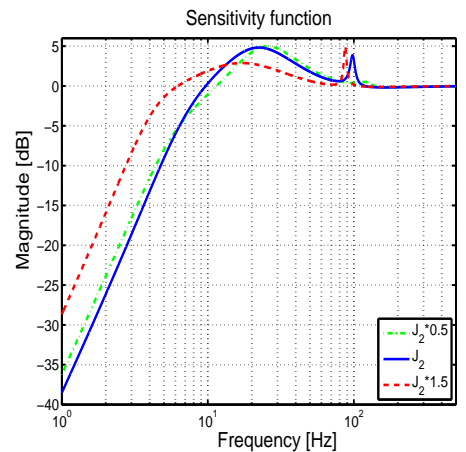
る 3 つの *Case* を用いて検証を行う。図 8 に各 *Case* の周波数特性を示す。*Case 1* は足平部分にマスを付加することで質量を増し、イナーシャを大きくすることで共振周波数を低くしている。*Case 2* はシミュレーションのモデル設計に用いた最適値に近い機構であり、提案法としている。*Case 3* は足平部分のイナーシャを既存の実験機で変更することは難しいため、タイミングベルトの張りを強めることで共振周波数を高くしている。

4.1 周波数特性による比較検証 シミュレーションと同様に $\eta = 5.0$ と設定し、感度関数ピークの仕様条件は $|S_p| < 5.0$ dB とした。実験機には PID 制御器のゲイン設計上限値があるため、PID 制御器の閉ループ極は $1 \leq \omega_p[k+1] < 15$ Hz, $\epsilon = 1.0$ rad/s として設定した。最適化方法は各 *Case* における実測値の周波数特性を測定し、感度関数を描き、感度関数ピークが $\eta < 5.0$ を満たし続けるまで制御器の閉ループ極を高帯域化している。実験ではどの *Case* においても閉ループ極 $\omega_p = 14.9$ Hz までの高帯域化となっている。

4.2 軌道追従特性による比較検証 実験では機構を変更しているため歩行動作に制限が掛かっている。そのためシミュレーションで用いた歩行の指令値ではなく、図 10(a) に示すように 0 Hz から 10 Hz まで 30 秒間で徐々に周波数が高くなり徐々に低くなる正弦波を用いる。通常の二足歩行ロボットの歩行周波数は 1~3 Hz 程度と考えられるが、走行時および外乱の影響を考慮し様々な周波数で振



(a) Nyquist diagram



(b) Sensitivity function

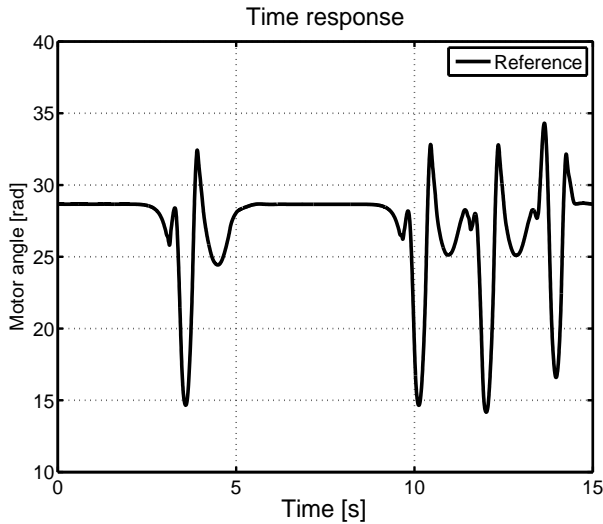
図 6 シミュレーション結果の比較
Fig. 6. Comparison of the simulation results.

表 3 実験における追従誤差の 3σ 値
Table 3. 3σ of tracking error in experiments.

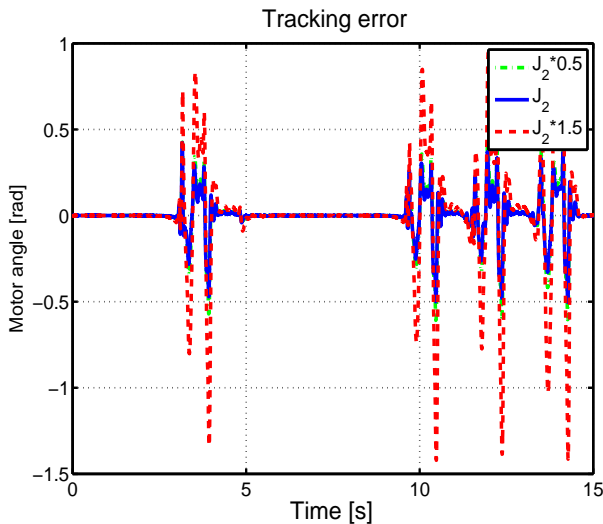
| | <i>Case 1</i> | <i>Case 2</i> | <i>Case 3</i> |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 3σ | 3.32 rad | 3.24 rad | 3.35 rad |

動させ定量的に評価する。図 10(a) に速度指令値、図 10(b) にモータ角度誤差、図 10(c) にモータ角度誤差における 25~31 s 間の拡大図、表 3 に各 *Case* における角度誤差の 3σ 値を示した。

実験機による最適化制御器を用いた感度関数を図 9 に示す。図 9(a) から、低周波数帯域の 0~1 Hz 付近で *Case 2* は *Case 3* よりも感度関数のゲインが下がっており、2~100 Hz 付近で *Case 1* よりも感度関数のゲインが下がっている。そのため図 10 の 3σ 値が低くなると考えられる。図 10(c) から、*Case 2* の角度誤差が低周波数帯域で *Case 3* よりも小さいことが確認できる。以上より、実験においてもシミュレーションで最適値となる *Case 2* が最も角度誤差が小さい結果を得た。



(a) Target trajectories



(b) Tracking error

図7 時間応答による比較
Fig. 7. Comparison of the time responses.

5. まとめ

本稿では機構と制御の同時最適化手法を二足歩行ロボットに適用し、最適化の有効性について検証した。一般的にはイナーシャを小さくし共振周波数を上げることで性能が良くなると考えられるが、仕様条件によってイナーシャの最適値が存在する。そのため、制御に合わせた機構のパラメータで設計することで、振動の抑制された機構にすることが可能である。よって、次世代のロボットには本研究を適用し、歩行時や走行時などに問題となる共振を抑えた最適設計とロバスト性を持たせた制御系の設計により振動の抑制が効果的である。他の部位との干渉を考慮した最適化や極配置以外の制御系の最適設計に関しては今後の課題としたい。

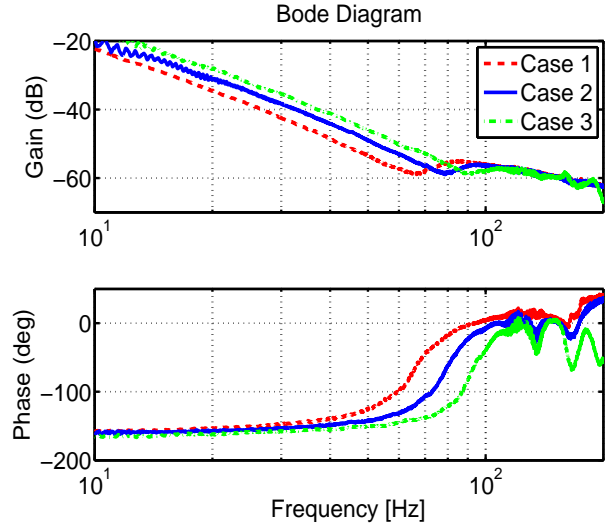


図8 実験における各 Case の周波数特性
Fig. 8. Frequency characteristics of the each case in the experiment.

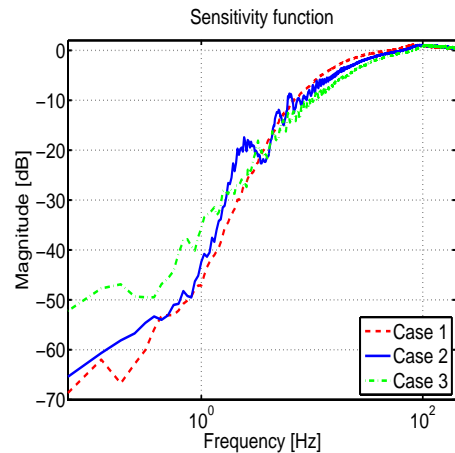
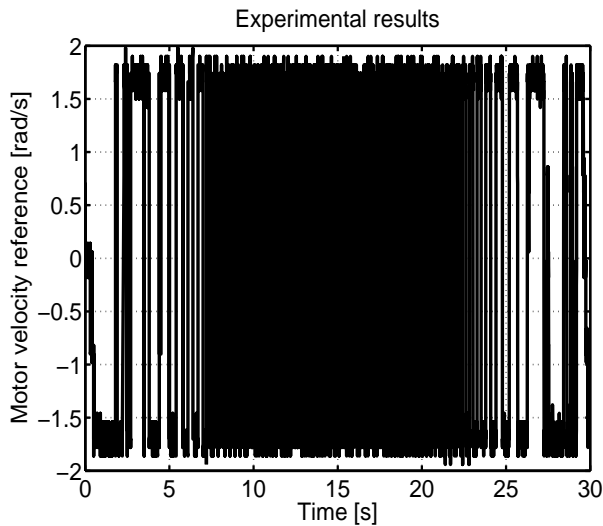


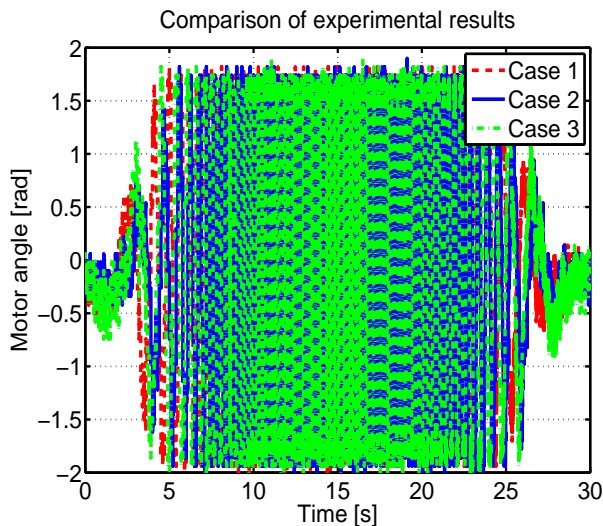
図9 実験における感度関数の比較
Fig. 9. Comparison of sensitivity function in the experiment.

参考文献

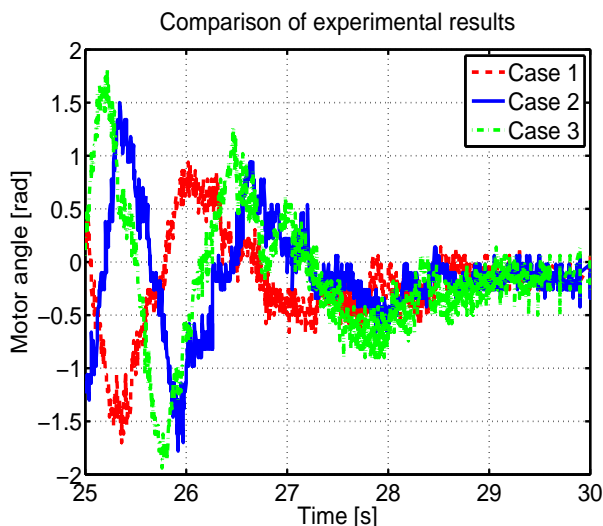
- (1) M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems", *Mathematical Biosciences*, Vol.15, pp. 1-37, (1972).
- (2) 梶田秀司, 「倒立振り子から2足歩行へ-制御理論とZMP-」, *日本ロボット学会誌*, Vol 27, No. 4, pp. 392-395, (2009)
- (3) R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, "The sway compensation trajectory for a biped robot", *Proceeding of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, pp. 925-931, (2003).
- (4) T. Sato, S. Sakaino, K. Ohnishi, "Adaption method using environmental modes for biped



(a) Target trajectories



(b) Tracking error



(b) Tracking error (Enlarged view)

図 10 実験における時間応答

Fig. 10. Time response of the experiments.

robot with toe and heel joints on unknown uneven terrain”, *Mechatronics (ICM)*, 2011 IEEE International Conference on, pp. 869-874, (2011).

- (5) 赤堀充, 福居文幸, 内村裕, 「不整地における安定指標 (3DZMP) による二足歩行ロボットの制御」, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-2011, Vol. 2. pp.683-688, (2011)
- (6) 米田淳一, 阿部貴弘, 小田尚樹, 「ビジョンセンサによる二足歩行ロボットの上部回転運動を利用した安定化制御」, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-2011, Vol. 2. pp.667-670, (2011)
- (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)
- (8) 武智大輔, 伊藤正英, 柴田昌明, 「二足歩行ロボットのヨー軸トルクを考慮した踏み出し動作の検討」, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-2011, Vol. 2. pp.663-666, (2011)
- (9) 古荘純次, Low Cho KEE, 佐野明人, 佐橋利康, 長尾裕史, 「駆動系に弾性を有するロボットアームの振動制御」, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 55, pp.2376-2383, (1989)
- (10) S. Murai and Y. Fujimoto, “Control of spring actuator and its application to biped robot”, *Advanced Motion Control*, 2006. 9th IEEE International Workshop on , pp. 411-415, (2006).
- (11) 前田佳弘, 岩崎誠, 「感度整形を考慮した円条件に基づくFB補償器設計」, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-2011, Vol. 2. pp.803-806, (2011)
- (12) Y. Seki, H. Fujimoto, A. Hara, T. Yamanaka, and K. Saiki, “Basic examination of simultaneous optimization of mechanical and control design for gantry-type precision stage modeled as two-mass 4-DOF system”, in *Proc. The 36rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1872-1877, (2010).