

# 負荷側エンコーダ情報及びバックラッシュを利用した 位置制御に基づく高バックドライバビリティ制御の提案

山田翔太\*, 藤本博志 (東京大学)

Proposal of High Backdrivable Control Based on Position Control Using Load-Side Information and Backlash  
Shota Yamada\*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

## Abstract

Backdrivability is highly required in various robotic fields such as industrial, welfare, and wearable robots. To miniaturize the system, gear reducers are often used. In gear reducers, there are backlashes, which deteriorate control performance. However, only from the view point of backdrivability, backlash has an ideal characteristic because the load side idles within the backlash width. This means that external forces from the load side only feel the load-side impedance without motor-side impedance. The proposed method uses this idling characteristic and it is realized using both the motor-side and load-side encoder information to enhance backdrivability. Simulation and experimental results demonstrate proposed method's effectiveness.

キーワード：バックドライバビリティ, バックラッシュ, 負荷側エンコーダ, 高分解能エンコーダ, 2 慣性系, 位置制御  
(Backdrivability, Backlash, Load-side encoder, High-resolution encoder, Two-inertia system, Position control)

## 1. 序 論

柔軟な動作が可能なロボットの需要が高まっている。従来の位置制御ベースの産業用ロボットでは安全確保のため柵で囲む必要があり、生産ラインの変更に多大な時間とコストがかかってしまうため、現在では力制御を適用し安全性を高めたロボットの開発や導入が進んでいる<sup>(1)</sup>。また、人と協調し働く福祉ロボットへの関心も高まっており、人間親和型のモーションコントロールを可能にする力制御への注目は今後も一層高まっていくことが予想される。

特にロボットの分野においてバックドライバビリティという重要な概念がある。バックドライバビリティとは、負荷側から外力を加えた際の装置の動きやすさである。バックドライバビリティを劣化させる主な要因は、負荷側から見た際に減速機によって増幅される駆動側のインピーダンスや摩擦である。ウェアラブルロボットにおいては、バックドライバビリティは着用者の動きやすさを決定付ける最も重要な性能の一つである<sup>(2)</sup>。産業用ロボットや福祉ロボットでは、バックドライバビリティの改善により、作業者が装置を動かしやすいだけでなく、人や物との衝突の際に人や物へ危害を与えず、また装置自身の破損を防ぐことができる<sup>(3)</sup>。バックドライバビリティを改善する手法としては、SEAのように機械的に弾性要素を挿入するもの<sup>(2)</sup>や、ダイレクトドライブのアクチュエータを用いる方法<sup>(4)</sup>等が知られているが、本稿では通常の減速機を持つ装置のバックドライバビリティを制御によって改善することを目標とする。着用者や作業者がロボット等を軽く動かしやすいかつ自然に感じることを目指し、人間が外力を負荷側に入力した際に負荷だけのインピーダンスを感じることを本稿の制御目標とする。

減速機を持つ装置の制御においては、減速機が低剛性であることに起因する低い共振周波数により、制御帯域は制限される。従来より、これらの制御対象は2慣性系にモデ



図1 2慣性系モータベンチの外観

Fig. 1. Outlook of two-inertia system motor bench.

リングされ、研究が盛んになされてきた<sup>(5)</sup>。また、減速機はバックラッシュ等の非線形要素を含むため、負荷側の制御精度が劣化してしまう。特に減速機の歯面間の隙間であるバックラッシュは、制御性能を劣化させリミットサイクルを引き起こす扱いにくい対象として技術者を古くから悩ませ、現在に至るまで広く研究がなされてきた<sup>(6)(7)</sup>。

また、工作機械等の精密位置決め分野において減速機に起因する共振や非線形性を考慮し、最終位置決めをしたい負荷側に高分解能エンコーダを用いたフルクロズド制御の適用が近年多くなってきている。従来産業用ロボットにおいては、取付スペース等の兼ね合いから負荷側にエンコーダを取り付けることが難しいとされてきていたが、我々の研究グループは文献(8)にて負荷側エンコーダを備えた新しい構造の産業用ロボットモジュールを提案した。エンコーダの高分解能化、低コスト化が急速に進んできているため、今後ロボットの分野においても負荷側エンコーダを持つ装置は増加していくことが予想される。したがって、駆動側と負荷側の双方のエンコーダ情報が得られる系にお

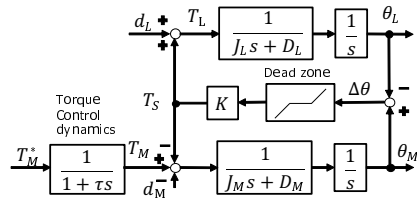


図2 実験機を2慣性系モデリングしたブロック線図  
Fig.2. Block diagram of two-inertia system motor bench.

る新たな制御法が求められている。

そこで本稿では、バックラッシュを持つ2慣性系にモデリングされる実験機を用い、負荷側エンコーダ情報とバックラッシュを利用した位置制御ベースの高バックドライバビリティ制御法を提案する。前述したようにバックラッシュは本来制御性能を劣化させる要素であるが、負荷側から外力が加わった際、バックラッシュの範囲内では負荷側は駆動側と衝突せず空転するため、駆動側の摩擦やインピーダンス等の影響を受けず負荷側のインピーダンスのみを外力は感じ、バックドライバビリティは改善される。提案法は負荷側に駆動側をバックラッシュの範囲内で追従させるPID制御器を用いた位置制御をすることで、バックドライバビリティの改善を図る。したがって、共振やバックラッシュによる制御性能の劣化はなく、また制御器設計も容易である。また、バックドライバビリティを改善する制御法は、制御剛性を小さくできる力制御を基にした制御法が普通であるが<sup>(2)</sup>、提案法は位置制御である点が画期的である。

本稿の構成は以下の通りである。まず第2章では、実験機に関して述べる。第3章では提案制御法の詳細を述べる。第4章、第5章では、提案制御法の有効性をインピーダンス制御と比較しながら、シミュレーションと実験にて検討する。最後に第6章にてまとめ今後の課題を述べる。

## 2. 実験機

**〈2・1〉 概要** 2慣性系の実験装置として、20 bit 高分解能エンコーダを両端に備える対向モータベンチを用いる。2慣性系モータベンチの外観を図1に示す。本装置は共振周波数が低く制御帯域を上げにくい装置を模擬するため、剛性の低いねじり軸を挿入可能である。また、カップリングをギアカップリングに変更でき、バックラッシュ有無の影響を検証可能である。

**〈2・2〉 モデリング** 実験機を2慣性系としてモデリングしたときのブロック線図を図2に示す。慣性モーメント、粘性摩擦係数、剛性、トルク、角速度、角度をそれぞれ  $J, D, K, T, \omega, \theta$  とし、駆動側外乱を  $d_M$ 、負荷側外力を  $d_L$ 、軸トルクを  $T_S$ 、軸ねじれ角度を  $\Delta\theta$  とする。なお、下付き文字の  $M, L$  はそれぞれ駆動側と負荷側を示し、上付き文字\*は指令値を示す。

減速機に内在するバックラッシュに代表されるように、プラントは各種非線形要素を含んでいる。図2においては、プラントの各部に含まれる非線形要素の内の1つであるバックラッシュを不感帯としてモデリングし表現している。

また、トルク制御系の制御帯域が1 kHz となるように設

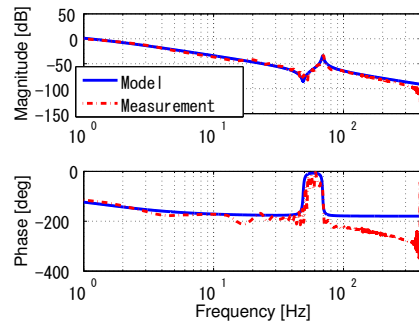


図3 モータトルクから駆動側角度までの周波数特性  
Fig.3. Frequency responses from motor torque to drive side angle.

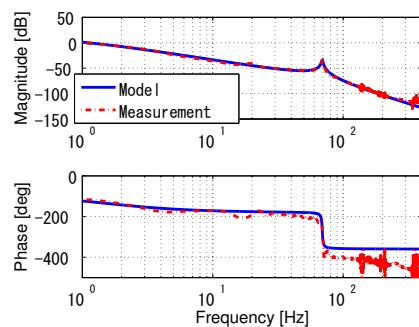


図4 モータトルクから負荷側角度までの周波数特性  
Fig.4. Frequency responses from motor torque to load side angle.

表1 2慣性系モータベンチの諸元

Table 1. Parameters of two-inertia system motor bench.

Motor-side moment of inertia $J_M$	1.03e-3	kgm <sup>2</sup>
Motor-side viscosity friction coefficient $D_M$	8.00e-3	Nms/rad
Torsional rigidity coefficient $K$	99.0	Nm/rad
Load-side moment of inertia $J_L$	0.870e-3	kgm <sup>2</sup>
Load-side viscosity friction coefficient $D_L$	1.71e-3	Nms/rad

計しているため、その遅れを時定数  $\tau = 1/(2\pi \cdot 1000)$  の1次のLPFで表現している。

図2に示した2慣性系モデルのモータトルクから駆動側角度、負荷側角度までの伝達関数の周波数特性をそれぞれ図3、4に示す。反共振が57 Hz、共振が71 Hz付近に存在する2慣性系プラントであることが分かる。

また、図3、図4に示した周波数特性に対して、図2に示した2慣性系のモデルでフィッティングを行った。青実線がフィッティングしたモデルを示し、赤破線が測定結果を示す。フィッティングにより同定した各パラメータ値を表1に示す。

**〈2・3〉 バックラッシュ同定** ギアカップリングを挿入し、実験機にバックラッシュを持たせた状態で、バックラッシュの同定のための実験を行う。時間領域でのバックラッシュの同定は、駆動側速度制御を行った状態で、負荷側速度を検出して、以下の式のように負荷が駆動側から離れた時点  $t_1$  か

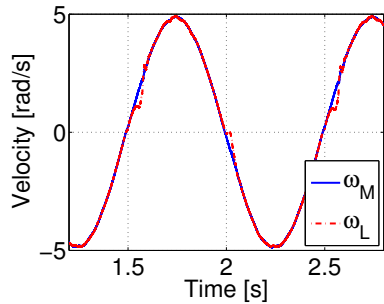


図5 バックラッシ同定実験  
Fig. 5. Identification of backlash.

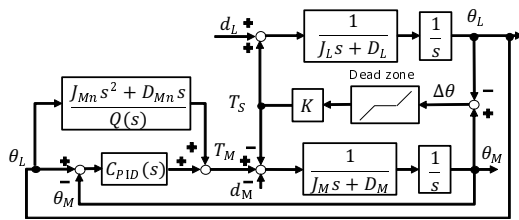


図6 提案法のブロック線図  
Fig. 6. Block diagram of the proposed method.

ら再び衝突する時点  $t_2$  までの速度差を積分することで求められる<sup>(9)</sup>。バックラッシの幅を  $\pm\epsilon$  とする。

$$2\epsilon = \left| \int_{t_1}^{t_2} (\omega_M - \omega_L) dt \right| \dots \dots \dots (1)$$

なお、今回は角速度情報はエンコーダの角度情報の差分により求めているため、 $t_1$ 、 $t_2$  における角度情報を用いてバックラッシ幅を算出する。同定実験時の波形の一部を図5に示す。複数回実験をし、求められた  $\epsilon$  を平均したところ、 $\epsilon = 6.0 \text{ mrad}$  となった。

### 3. 負荷側エンコーダとバックラッシを利用した高バックドライバビリティ制御

負荷側エンコーダ情報及びバックラッシを積極的に利用することで、外力が負荷のみのインピーダンスを感じる高バックドライバビリティ制御を提案する。負荷側から外力を加えたとき、減速機や駆動側の摩擦やインピーダンスは減速比で増幅されてしまい負荷は動きにくい、バックラッシの範囲内では負荷は駆動側と接続されていないため、負荷のインピーダンスのみが感じられる。バックラッシは本来制御性能を劣化させる要素であるが、バックドライバビリティを改善するという観点では好ましい特性を持つと考えられる。本提案法では、このバックラッシの特性を積極的に利用するため、負荷に外力が加えられたときに、駆動側が負荷側に追従しバックラッシの範囲内で常に動作するような位置制御系を構成する。バックドライバビリティを改善する制御法は制御剛性を小さくできる力制御であることが普通であるが、本提案法は力制御の対の特性を持つ位置制御法である。

提案法のブロック線図を図6に示す。なお、下付き文字  $n$  はノミナル値、 $C_{PID}(s)$  はPID制御器、 $Q(s)$  はFFを実現するための2次のローパスフィルタを示す。提案法は、

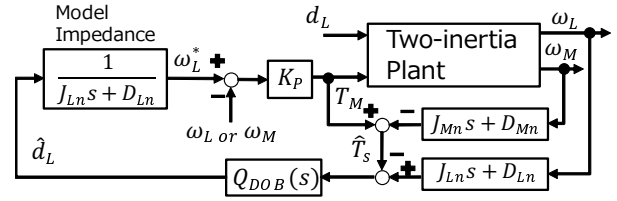
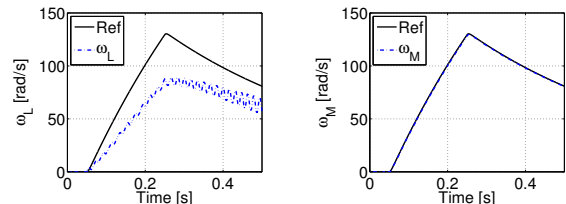


図7 従来法のブロック線図  
Fig. 7. Block diagram of conventional method.



(a)  $\omega_L$  in  $\omega_L$  FB impedance control. (b)  $\omega_M$  in  $\omega_M$  FB impedance control.

図8 インピーダンス制御において負荷側FBをした場合の  $\omega_L$  と駆動側FBをした場合の  $\omega_M$

Fig. 8. Velocity responses in impedance control.

負荷側エンコーダにより得られる負荷側角度を駆動側角度指令値とする駆動側角度制御系となっている。また、高帯域な制御を可能とするため2自由度制御となっている。提案法の動作領域では、負荷は駆動側と接続されていないためプラントモデルは駆動側モデル  $1/(J_M s^2 + D_M s)$  のみとなる。したがって、PID制御器により極配置設計が可能である。積分器が入っているため、モータ摩擦等があっても定常偏差なく追従可能である。また、FFも同様に駆動側モデルのみの逆モデルで構成される。したがって、ロボット等への応用で変動の大きい負荷側パラメータに対してロバストなFF制御器となっている。

### 4. シミュレーション

**〈4・1〉 シミュレーション条件** 負荷側モータにて負荷側外力  $d_L$  を0.05-0.25の間、ステップ状の入力を入れる。このときの負荷側速度応答でバックドライバビリティを評価する。なお、外力のステップ指令にはカットオフ周波数500 Hzの1次のLPFをいれている。外力から見て負荷のインピーダンスのみが感じられるように、インピーダンス制御で用いるモデルインピーダンスの値は負荷のインピーダンスと等しく設計する。外乱オブザーバ(DOB)の帯域を決める  $Q_{DOB}(s)$  は、カットオフ周波数30 Hzの1次のLPFとする。また、FF制御器を実現するための  $Q(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$  の2次のLPFは、 $\zeta = 0.3$ 、 $\omega_n = 2\pi \cdot 700$  と実験によってチューニングした。位相遅れを小さくするため  $\zeta$  は小さい値となっている。特に明記のない限り、シミュレーションにおいてモデル化誤差は与えない。

**〈4・2〉 インピーダンス制御(従来法)** バックドライバビリティを改善するために、最も広く用いられている手法はインピーダンス制御である。インピーダンス制御とは、所望のインピーダンスを表現したモデルインピーダンスを通して生成された速度指令値に対して速度をFB制御する

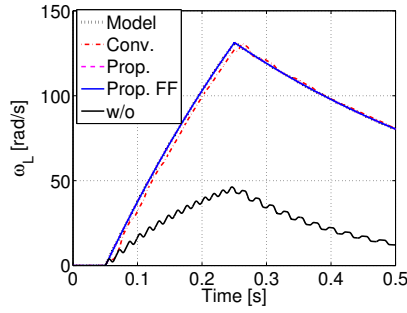


図9 外力を入れた際の負荷側速度応答の比較  
Fig. 9. Comparison of  $\omega_L$  responses.

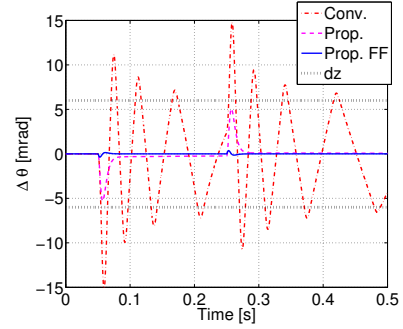


図11 外力を入れた際の軸ねじれ角の比較  
Fig. 11. Comparison of  $\Delta\theta$  responses.

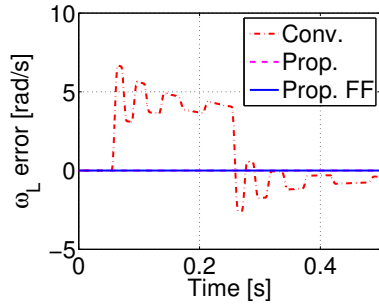
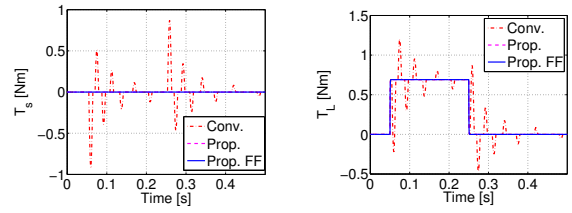


図10 外力を入れた際の負荷側速度応答誤差の比較  
Fig. 10.  $\omega_L$  error comparison.



(a)  $T_s$  comparison. (b)  $T_L$  comparison.

図12 外力を入れた際の軸トルク、負荷トルク応答の比較  
Fig. 12. Comparison of joint torque and load-side torque responses.

ことで所望のインピーダンスを実現する制御法である。今回は速度FBの制御器として、ゲイン  $K_p$  のP制御器を用いる。インピーダンス制御のブロック線図を図7に示す。

図7のインピーダンス制御を実現するにはモデルインピーダンスへの入力となる外力の検出や推定が必要である。剛体モデルでは外力の推定値が振動してしまうことを踏まえ、駆動側と負荷側双方のエンコーダ情報を用いた2重のDOBを構成する<sup>(10)</sup>。この構成により負荷側外力が正確に推定でき、負荷のインピーダンスと等しいモデルインピーダンスを通して生成された負荷側速度指令値に対して、負荷側速度をFB制御することで負荷インピーダンス制御が実現される。

シミュレーション結果を図8(a)に示す。位相遅れの大きいノンコロケート系の情報である負荷側速度をFBしているため、高ゲイン化できず、速度が指令値に追従していない。

位相遅れの大きい負荷側情報のFBにより高ゲイン化が妨げられたため、負荷側速度の代わりに駆動側速度のFB制御に変更する。コロケート系の情報を用いることにより、高ゲイン化が可能になる。速度指令値と駆動側速度応答を図8(b)に示す。高ゲイン化ができるため、指令値に追従できている。本制御法を従来法と定義し、提案法及びFF無しの提案法と比較を行う。

〈4・3〉シミュレーションによる比較 従来法(Conv.), FF無し提案法(Prop.), 提案法(Prop. FF), 制御なし(w/o)の速度応答の比較を図9に示す。Modelは、負荷インピーダンスのみのモデルと同じ外力を入れたときの応答であるため、Referenceとして用いる。図10はそれぞれの場合のModelとの負荷速度応答の差を示す。図9が示しているよ

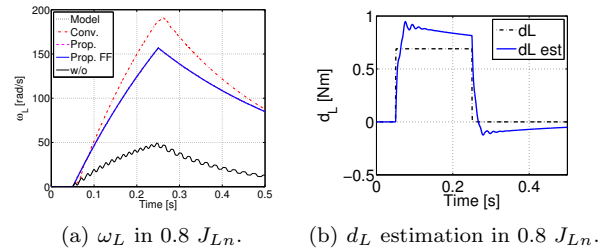


図13  $J_L$  がノミナル値の0.8倍のときの  $\omega_L$  応答と従来法における  $d_L$  の推定値  
Fig. 13. Comparison of  $\omega_L$  and  $d_L$  in  $0.8 J_{Ln}$ .

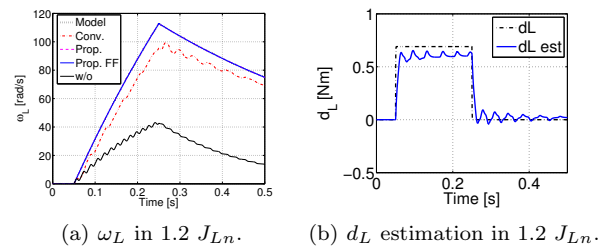


図14  $J_L$  がノミナル値の1.2倍のときの  $\omega_L$  応答と従来法における  $d_L$  の推定値  
Fig. 14. Comparison of  $\omega_L$  and  $d_L$  in  $1.2 J_{Ln}$ .

うに、制御なしではバックドライバリティが低いため速度があまり上昇せず、また共振周波数で振動してしまっている。提案法と従来法の応答はほぼModelの応答と重なっていることから、バックドライバリティが改善され、外力から見たインピーダンスが負荷インピーダンスに一致していることがわかる。また、図10に示されているように従

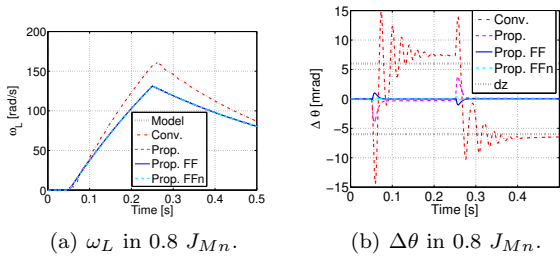


図 15  $J_M$  がノミナル値の 0.8 倍のときの  $\omega_L$ ,  $\Delta\theta$  の応答  
Fig. 15. Comparison of  $\omega_L$  and  $\Delta\theta$  in  $0.8 J_{Mn}$ .

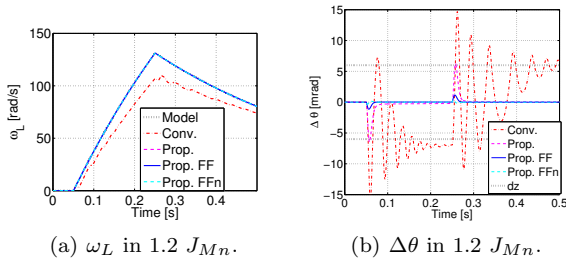


図 16  $J_M$  がノミナル値の 1.2 倍のときの  $\omega_L$ ,  $\Delta\theta$  の応答  
Fig. 16. Comparison of  $\omega_L$  and  $\Delta\theta$  in  $1.2 J_{Mn}$ .

来法の負荷速度応答は Model の応答に対して誤差を持っている。これは、DOB の帯域で阻まれゲイン  $K_P$  をあまり高ゲイン化できなかったことに起因する。軸ねじれ角応答を見ることで誤差が生じた物理的な理由が明らかになる。

図 11 に示されているように、提案法では軸ねじれ角が黒点線で示されているバックラッシュ (凡例 dz:デッドゾーン) の範囲内で収まっているが、従来法では収まっていない。モデルインピーダンスを負荷のインピーダンスと一致させているため、軸トルクは 0 であるべきだが、図 12(a) に示されているように従来法では常に 0 にならない。その結果、軸トルクが外乱として働き図 12(b) に示すように負荷に加わる負荷トルク  $T_L$  が入力した外力  $d_L$  と一致せず、負荷速度に誤差が生まれる。また、FF を追加することによって軸ねじれ角が更に抑えられており、これはより高帯域かつ大きな外乱が印可されても軸ねじれ角をバックラッシュの範囲内に収めることができ、軸トルクを 0 に制御できることを示している。

次にモデル化誤差の影響について解析する。まず、ロボット等のアプリケーションにおいて変動しやすい負荷側のイナーシャが、ノミナル値の 0.8 倍になったときの負荷速度応答を図 13(a) に、DOB によって推定された外力を図 13(b) に示す。従来法ではモデル化誤差により外力推定値に誤差が生じ、負荷速度応答にも大きな誤差が生じる。図 14(a), 14(b) に負荷側のイナーシャがノミナル値の 1.2 倍になったときの応答を示すが、同様に外力推定値の誤差から負荷速度応答が劣化している。一方、提案法は負荷側のプラントパラメータを必要としないため性能は劣化しない。なお、提案法における FF 制御器においても駆動側モデルのみを用いているため、負荷側のパラメータ変動に対してロバストである。

次に、駆動側のパラメータ変動に対する影響を解析する。

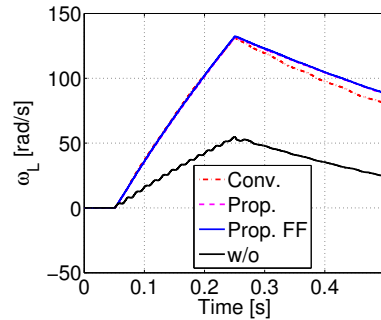


図 17 実験による負荷側速度応答の比較  
Fig. 17.  $\omega_L$  comparison in experiments.

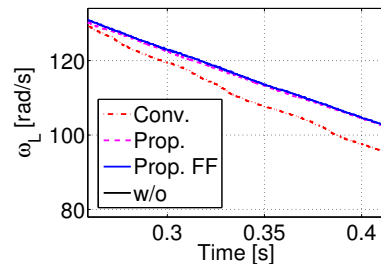


図 18 図 17 の 0.35 s 付近の拡大図  
Fig. 18. Zoom of Fig. 17 around 0.35 s.

ロボット等のアプリケーションにおいて駆動側のパラメータ変動は負荷側と比べて少ないと考えられるが、主に FF 制御器の性能劣化に関して検討する。駆動側イナーシャが、ノミナル値の 0.8 倍になったときの負荷速度応答を図 15(a) に、軸ねじれ角応答を図 15(b) に示す。従来法では、駆動側のモデル化誤差によっても外力推定値に誤差が生じるため性能が劣化する。Prop. FFn はモデル化誤差がない場合の応答を、Prop. FF はモデル化誤差を持つときの応答を示している。提案法においてモデル化誤差により軸ねじれ角の応答は劣化するが、FF 無しの場合と比べて軸ねじれ角を大きく抑えられており、FF 制御器は積極的に適用していくべきであることがわかる。図 16(a), 16(b) に駆動側のイナーシャがノミナル値の 1.2 倍になったときの応答を示すが、同様に軸ねじれ角への影響は小さい。

最後に、提案法のインピーダンス制御に対する特徴を以下にまとめる。

- 外力の検出や推定が不要でモデル化誤差に強い
- 設計が容易
- 負荷のインピーダンスの変更は不可

外力の推定が不要のため、力センサや外乱オブザーバが不要であり、正確なモデルパラメータが不要である。バックラッシュを利用しているためバックラッシュによる性能劣化はなく、またバックラッシュの大きさを予め知っている必要がない。したがって、モデル化誤差に対して強い。また、PID 制御器であるため、極配置設計可能で設計が容易である。したがって、負荷のインピーダンスを変更する必要がない場合には、積極的に提案法を使うべきである。

## 5. 実験

実験の条件はシミュレーションと同じである。なお、制御

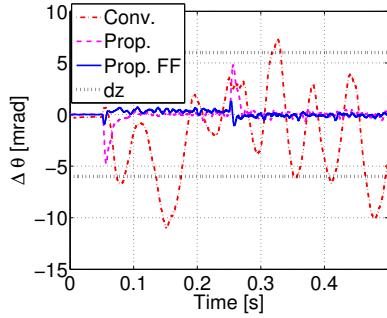


図 19 実験による軸ねじれ角応答の比較  
Fig. 19.  $\Delta\theta$  responses in experiments.

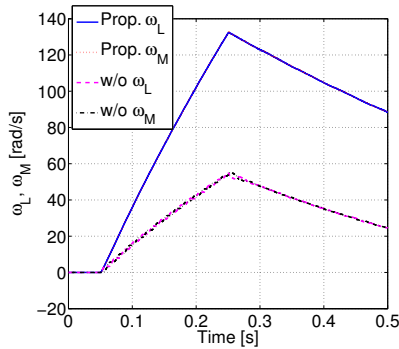


図 20 実験による制御有無での  $\omega_M$  と  $\omega_L$  の応答の比較  
Fig. 20. Comparison of  $\omega_M$  and  $\omega_L$ .

周期は 2.5 kHz で制御器は Tustin 変換をして実装した。従来法, FF 無し提案法, 提案法, 制御なしの実験による速度応答の比較を図 17 に示す。おおむね, シミュレーションと似た結果となった。モデル化誤差が存在するため, モデルインピーダンスにも誤差が存在し従来法と提案法とで, 特に減速時の応答で差異が生じてしまっている。図 18 に 0.35 s 付近の応答の拡大図を示す。従来法においては負荷速度に振動が見られる。一方, 提案法は FF 有無に関わらず良好な応答を示している。

図 19 に軸ねじれ角応答の比較を示す。提案法では軸ねじれ角が抑えられているが, 従来法ではバックラッシュの範囲内で抑えられておらず, 負荷速度応答を劣化させていると考えられる。提案法においては FF 制御の適用により軸ねじれ角がより抑えられており, より高帯域かつ大きな外乱にも対応可能であることを示している。

最後に, 駆動側速度と負荷側速度応答の提案法と制御なしでの比較を図 20 に示す。制御なしでは, 駆動側速度と負荷側速度は共振しており位相が反転しているが, 提案法では駆動側を負荷側に同期させるように動作させるので, 応答がよく一致している。

## 6. まとめと今後の課題

産業界で負荷側エンコーダを備える装置が増加していることを踏まえ, 負荷側エンコーダ及びバックラッシュを利用した高バックドライバビリティ制御法を提案し, その有効性をシミュレーション及び実験で示した。バックラッシュの範囲内では負荷は空転するという性質を積極的に用いた制

御法であり, モデル化誤差に強く, 制御器設計も容易な実用的な手法である。

本提案法では駆動側の摩擦やインピーダンスの影響を無くすることができるものの負荷のインピーダンスを変更することができないため, 駆動側でアシストをできるように拡張することが今後の課題として挙げられる。

## 7. 謝辞

本研究では, 実験機製作にあたって DMG 森精機株式会社様の多大なるご支援を頂いた。記して謝意を表す。また, 本研究は科研費 (16J02698) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- (1) G. B. Avanzini, N. M. Ceriani, A. M. Zanchettin, P. Rocco, and L. Bascetta: "Safety Control of Industrial Robots Based on a Distributed Distance Sensor", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 2127–2140, (2014).
- (2) K. Kong, J. Bae, and M. Tomizuka: "A Compact Rotary Series Elastic Actuator for Human Assistive Systems", *IEEE Trans. on Mechatronics*, Vol. 17, No. 2, (2012).
- (3) Y. Kuroki, Y. Kosaka, T. Takahashi, E. Niwa, H. Kaminaga, and Y. Nakamura: "Cr–N Alloy Thin-film Based Torque Sensors and Joint Torque Servo Systems for Compliant Robot Control", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-2013)*, pp. 4954–4959, (2013).
- (4) Y. Fujimoto, T. Kominami, and H. Hamada: "Development and Analysis of a High Thrust Force Direct-Drive Linear Actuator", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 5, pp. 1383–1392, (2009).
- (5) K. Yuki, T. Murakami, and K. Ohnishi: "Vibration Control of 2 Mass Resonant System by Resonance Ratio Control", *Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON-1993)*, pp. 2009–2014, (1993).
- (6) M. Nordin and P. Gutman: "Controlling mechanical systems with backlash –a survey", *Automatica*, Vol. 38, pp. 1633–1649, (2002).
- (7) K. Mochizuki and I. Awaya: "Vibration suppression control for mechanical systems with backlash using describing function and model-matching method", *The Japan Society of Mechanical Engineers, Dynamics and Design Conference*, No. 745, (2014).
- (8) S. Yamada, K. Inukai, H. Fujimoto, K. Omata, Y. Takeda, and S. Makinouchi: "Joint torque control for two-inertia system with encoders on drive and load sides", *Proc. of the 13th IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 396–401, (2015).
- (9) S. Villwock and M. Pacas: "Time-Domain Identification Method for Detecting Mechanical Backlash in Electrical Drives", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 2, pp. 568–573, (2012).
- (10) C. Mitsantisuk, M. Nandapaya, K. Ohishi, and S. Katsura: "Design for Sensorless Force Control of Flexible Robot by Using Resonance Ratio Control Based on Coefficient Diagram Method", *Automatika*, vol. 54, no. 1, pp. 62–73, (2013).