

## 柔軟さと高精度位置決めを両立するロボットアームの可変損失補償制御

Variable loss-compensation control for flexible and accurate manipulator

○学 加藤匡裕 (大阪大) 正 杉原知道 (大阪大)

Tomomichi SUGIHARA, Osaka University, zhidao@ieee.org

Tadahiro KATO, Osaka University, tadahiro.kato@ams.eng.osaka-u.ac.jp

This paper proposes a novel loss-compensation controller which improves the convergence performance of joint angles for robot manipulators. It was found that the previous loss-compensation control based on the disturbance observer and torque measurement generated a limitcycle phenomenon in the final phase of set-point control due to the error of loss estimation. A rather simple idea to vary the amount of compensation asymmetrically with respect to the conformity of actuation and compensation directions suppresses the limitcycle due to the sliding-mode effect. Some experiments showed that a robot could be equipped with a better tracking performance without sacrificing back-drivability.

**Key Words:** Manipulator control, Backdrivability, Loss-compensation, Disturbance observer

## 1 緒言

多品種少量生産やインフラ保守, 人の生活支援や介護, 災害対応など, 従来自動化が困難であった作業へのロボットの導入が望まれている. これらの作業遂行には, 従来どおり姿勢を高精度に制御する能力に加え, 不定形物体を能動的に操作する能力が求められる. このためには, モータと物体とが直接的に力を交換する性質, すなわちバックドライバビリティが必要となる.

軽量のモータで大きな力を得るために高減速比減速機を用いることが有効である. 減速機内部の摩擦等による損失が負荷変動の影響を吸収し, 姿勢制御の精度向上に良好な効果をもたらす. しかしロボットの外から見れば, これはバックドライバビリティを損ねる抵抗となる. 石川ら [1] は, トルクセンサと外乱オブザーバを併用して内部損失を補償する方法を開発した. DD モータ [2] によるロボットの大型化や SEA[3] による応答性低下を招くことなく, ソフトウェア的にバックドライバビリティを持たせることが可能になった.

上記の方法は有望であるが, 固有の問題として, 位置制御を施した際に参照値近傍でリミットサイクル現象が生じることが発見された. これは, わずかに残った摩擦によって参照値から若干ずれた姿勢で静止した際に, 外乱オブザーバが誤差補償量を蓄積し続け, それが最大静止摩擦力を超えた直後に大きな滑りを生じ参照値を通過して再度静止する, ということの反復によると分かった. ロボットの挙動が振動的になり姿勢制御精度を損ねるため, 抑制する必要がある.

本研究では石川ら [1] の方法を改良し, 上記の問題を解消する方法を提案する. モータ駆動トルクと損失補償トルクが一致しているか否かに基づいて補償量を変える簡便な方法でスライディングモード制御と同等の効果が得られることを, シミュレーションおよび実験により確認した.

## 2 外乱オブザーバによる減速機摩擦補償 [1]

提案方法の元となる摩擦補償制御について説明する. モータの運動方程式は次のように表せる.

$$J\ddot{\theta}_M = \frac{K_T}{R}(e_u - e_f) + \frac{\tau_e}{\gamma} \quad (1)$$

ただし,  $J$  はモータの軸から見た出力軸までのイナーシャ,  $\theta_M$  はモータ出力角  $R$  はモータ端子間抵抗,  $K_T$  はモータのトルク定数,

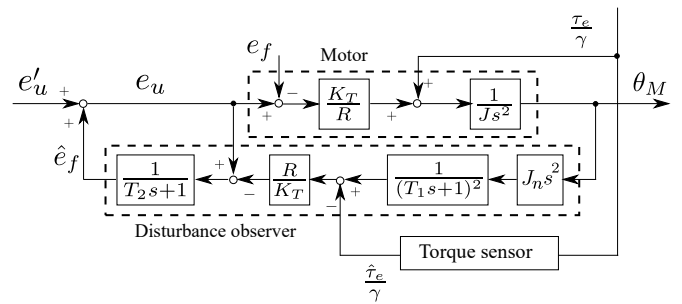


Fig.1 Block diagram of loss-compensation control

$\gamma$  は減速機減速比,  $e_u$  モータへの入力電圧,  $e_f$  は損失トルクの電圧換算値,  $\tau_e$  は外トルクである.  $\theta_M$  および外トルクの計測値  $\hat{\tau}_e$  を用いれば, 損失トルクの電圧換算値の推定値は次式のように得られる.

$$\hat{e}_f = \frac{1}{T_2 s + 1} \left\{ e_u - \frac{R}{K_T} \left( \frac{J_n s^2}{(T_1 s + 1)^2} \theta_M - \frac{\hat{\tau}_e}{\gamma} \right) \right\} \quad (2)$$

ただし,  $J_n$  は  $J$  のノミナル値である. モータの出力角加速度推定値および  $\hat{e}_f$  は, 安定化のためにそれぞれ 2 次および 1 次のローパスフィルタを通してている.  $T_1, T_2$  はその時定数である. これを入力電圧に足しこみ

$$e_u = e'_u + \hat{e}_f \quad (3)$$

とすることで, 損失の無い理想モデルに近い応答を実現できる. これは外乱オブザーバ [4] にほかならない. この制御系のブロック線図を図 1 に示す.

## 3 損失補償制御による収束性の悪化

前節で述べた損失補償制御を図 2 に示す 7 自由度ロボットアーム Torobo Arm Mini[5](東京ロボティクス社製) に実装し, PD 制御による姿勢制御を行ったところ, 動作終盤で図 3, 図 4 のようなリミットサイクルが生じた. この原因は次のように考察できる.

$\tau_e = \hat{\tau}_e = 0$  とすると, 式 (1) 式 (3) より,  $\hat{e}_f$  は次のように表される.

$$\hat{e}_f = \frac{1}{T_2 s + 1} \left\{ \left( 1 - \frac{P}{P_n} \right) e'_u + \frac{P}{P_n} (e_f - \hat{e}_f) \right\} \quad (4)$$



Fig.2 Torobo Arm Mini[5]

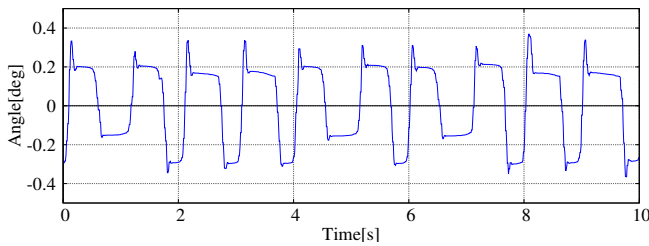


Fig.3 Limitcycle phenomenon shown in joint motion due to loss-compensation control

ただし,

$$P = \frac{K_T}{R} \frac{1}{Js^2} \quad (5)$$

$$P_n = \frac{K_T}{R} \frac{(T_1s + 1)^2}{J_n s^2} \quad (6)$$

とそれぞれおいた. すなわち損失補償制御はプラントのモデル誤差および損失推定誤差を積分する効果がある. これらの誤差は必ず生じる. このため, 関節に静止摩擦が作用している間に補償量が累積し, 駆動トルクが最大静止摩擦トルクに打ち勝った直後に動摩擦に行こうし一気に加速される. 損失補償制御はこれに遅れるため, 関節角は参照値を超えて再度静止する. この反復がリミットサイクルとなって現れる.

図5は図4の相空間に直交する方向に電流値をとり, プロットしたものである. 上述の現象が実際に発生している様子が見取れる.

#### 4 可変損失補償制御

損失補償量推定の遅れにより, 動摩擦に移行した直後の大加速を適切に制動できないことが, リミットサイクルの発生の原因とわかった. そこで, 駆動入力と推定された損失が同方向であるときは補償量を控えめにする, という非対称性をもたせることで, 参照値への収束性を高めることを試みる. 具体的には式(3)を次の

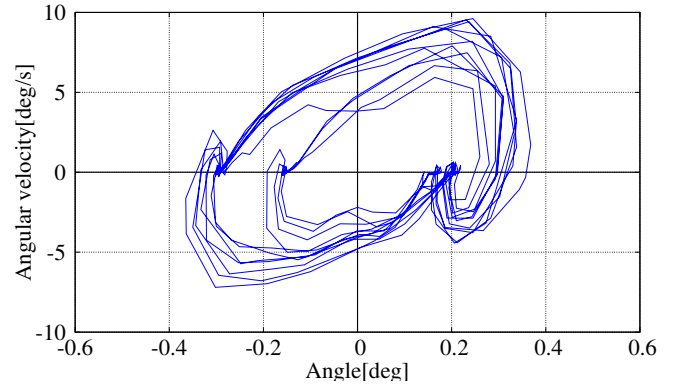


Fig.4 Limitcycle phenomenon shown in phase space in joint motion

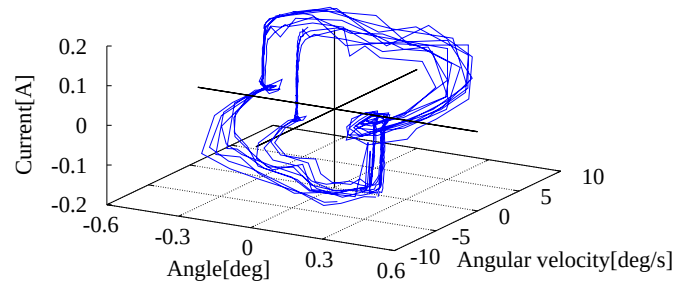


Fig.5 Loci in phase space and corresponding current, which shows the generation process of the limit-cycle

式(7), 式(8)のように変更する.

$$e_u = e'_u + \hat{e}'_f \quad (7)$$

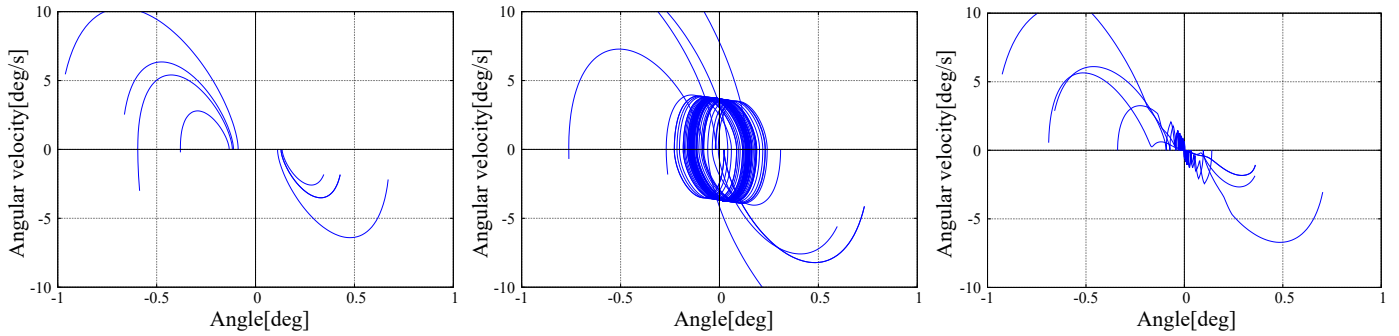
$$\hat{e}'_f = \begin{cases} \hat{e}_f & (e_u e_f \geq 0) \\ \epsilon \hat{e}_f & (e_u e_f < 0) \end{cases} \quad (8)$$

ただし,  $\epsilon$  は  $0 \leq \epsilon < 1$  を満たす定数である. 損失が補償されていない系ではクーロン摩擦による剛性中心のずれや粘性により相空間は歪められ, 図6(a)のようになっている. 損失補償制御により損失が補償されている系では図6(b)のように損失補償の遅れにより図中の軌跡のようなリミットサイクルが生じる. この2つを超平面  $e'_u \hat{e}'_f = 0$  で切り替えることにより, 相空間は図6(c)のようになる. 推定の遅れによって加速されたとしても損失によって減速され, リミットサイクルを抑制できる.

また, 原点付近ではクーロン摩擦による剛性中心のずれによって, 図6(c)の赤で示す部分に切り替え超平面に向かうスライディングモードが存在する. ただし, 一般的なスライディングモード制御のように制御器側の剛性中心を変えていないためチャタリングを起こさず安定な収束が期待できる.

#### 5 可変損失補償制御による効果の実験的確認

Trobo Arm Mini[5]を用いた実験により, 関節空間でのステップ応答から位置決め精度と収束性を, バックドライブした際の関節トルクから柔軟さをそれぞれ評価する.

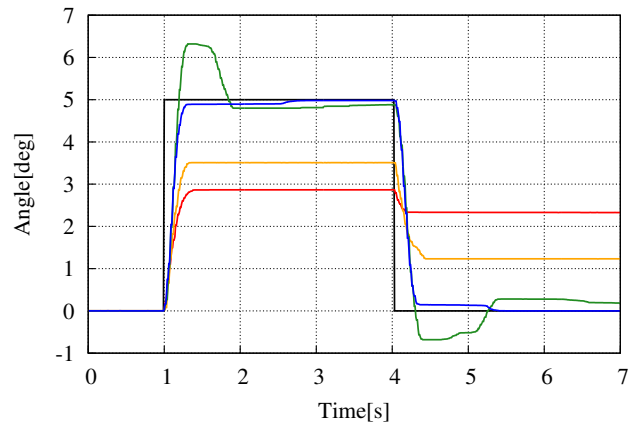


(a) Phase space of PD control with no loss-compensation (b) Phase space of PD control with loss-compensation (c) Phase space of PD control with variable loss-compensation

Fig.6 Expression of variable loss-compensation in phase space

$J_n$	$1.49 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
$K_T$	$18.05 \text{mNm/A}$
$R$	$0.552 \Omega$
$\gamma$	$100$
$k_P$	$0.20 \text{A/deg}$
$k_D$	$0.020 \text{A} \cdot \text{s/deg}$
$\tau_{fC}$	$1.0 \text{Nm}$
$\tau_{fV}$	$7.5 \times 10^{-5} \text{Nm} \cdot \text{s/deg}$
$\epsilon$	$0.9$

Table 1 Parameters used in the experiment



Referece —  
No loss-compensation —  
Feedforward loss-compensation —  
Previous loss-compensation —  
Proposed loss-compensation —

Fig.7 Step responses of the joint control with some loss-compensation strategies

### 5.1 位置決め精度の実験的評価

第4関節のみ可動とし、その他の関節は固定とする。次式で表される関節PD制御

$$e'_u = k_P (\theta_M - \theta_M) - k_D \dot{\theta}_M \quad (9)$$

をベースとして

- 損失補償なし
- フィードフォワード摩擦補償
- 従来研究：外トルク推定を用いた関節摩擦補償制御 [1]
- 提案手法：可変摩擦補償制御

の3つについて実験条件を統一し、ステップ応答を記録した。フィードフォワード摩擦補償は摩擦トルクをクーロン摩擦と粘性摩擦でモデル化し、それに相当する電圧を印加することで摩擦を補償している。推定摩擦トルクに相当する電圧  $\hat{e}_f$  は次の式 (10) で表される。

$$\hat{e}_f = \frac{R}{K_T} (\text{sgn}(\dot{\theta}_M) \tau_{fC} + \tau_{fV} \dot{\theta}_M) \quad (10)$$

ただし、 $\tau_{fC}$  はクーロン定数、 $\tau_{fV}$  は粘性係数である。外トルク推定を用いた損失補償制御では  $\hat{e}_f$  は式 (2) で表される。可変摩擦補償制御では  $\hat{e}_f$  の代わりに式 (8) で表される  $\hat{e}'_f$  を用いる。制御実験に用いたパラメータは表 1 のとおりである。

結果を図 7 に示す。また、同様の実験条件で目標角度 0[deg] へのレギュレーションを行い、その結果を相空間上で表したものが図 8 である。損失を補償していないときとフィードフォワード的に補償しているときには制御入力に摩擦などの損失に妨げられ、大きな定常偏差が残っている。また、オブザーバにより損失を常に補償

した場合、損失の不連続性と推定の遅れによりリミットサイクルが生じている。一方で可変損失補償制御では即応性を維持しつつも定常偏差とオーバーシュートを著しく低下させることができた。また、図 9 から  $e'_u = 0$  上でスライディングモードが生じ、リミットサイクルが抑制され、収束性が向上していることが確認できる。

### 5.2 柔軟さの実験的評価

エンドエフェクタを環境に接触させた状態で、手先の関節目標位置を幾何的拘束によって到達不可能な位置へと連続的に変化させていく。このとき、ロボットアームの根本の関節は、環境との接触による反力を受ける。関節が摩擦のない理想的なアクチュエータの場合、関節は制御入力と接触力によるトルクとが釣り合う位置までバックドライブされて静止する。もし関節のバックドライブバリエーションが低い場合、関節に大きなトルクが発生する。そこで、目標位置との差から、摩擦のない理想的なアクチュエータを用いた際に発生するトルクを算出し、実際に発生したトルクとの差を取ることで過剰に発生したトルクを求め、このトルクの大きさによって柔軟さを評価する。

可変損失補償制御の設計パラメータである  $\epsilon$  を変化させること

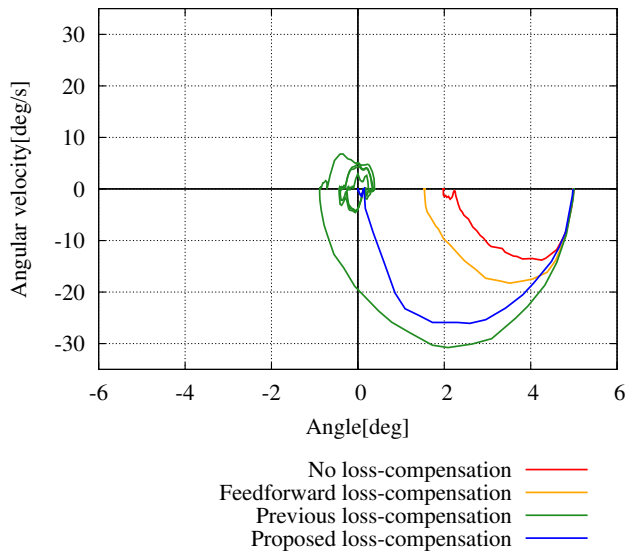


Fig.8 Loci of step responses in phase space with some loss-compensation strategies

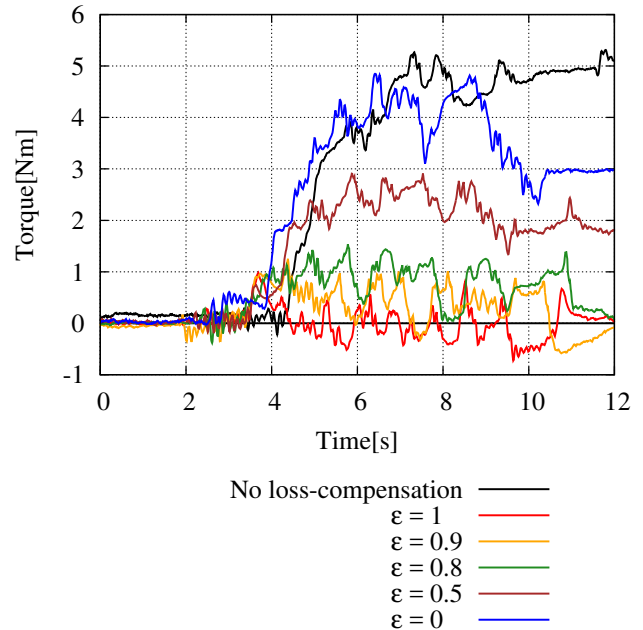


Fig.10 Errors of the joint actuation torque due to the back-driving

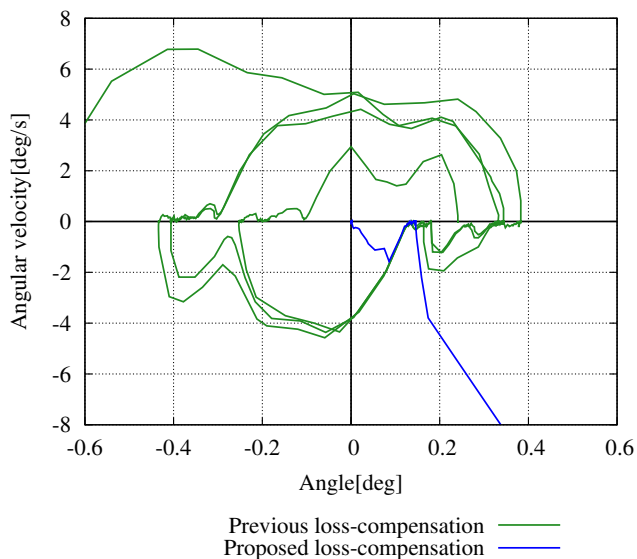


Fig.9 A zoom of the loci in Fig. 8, where a sliding mode on which the joint angle stably converges is generated with the proposed method

により柔軟さが変化すると予想されるため、 $\epsilon = 0, 0.5, 0.8, 0.9, 1$  それぞれについて実験を行った。結果を図 10 に示す。損失を補償していないときには大きなトルクが発生している一方で、 $\epsilon = 1$  とした場合では理想的なモデルに近づいていることが確認できる。また、 $\epsilon \geq 0.8$  では、常に損失を補償しているときとほぼ同等のバックドライバビリティを有していることが確認できる。位置決め精度を評価した際には  $\epsilon = 0.9$  としていたため、十分な柔軟さを精度を有したままに位置決め精度を向上できていることが確認できる。

## 6 おわりに

一般的に用いられる電磁モータと減速機からなる関節を持つロボットアームに対して、柔軟さと高精度な位置決めを両立する制御手法の開発を目的とし、関節損失を補償することによる実現を試みた。従来方法で位置制御を行った際に動作終盤でリミットサイクルが生じ、位置決め精度が低下していた問題に対し、駆動方向に対する損失補償量に非対称性を持たせることで、リミットサイクルの抑制を図った。

実験を行い、提案手法によってリミットサイクルやオーバーシュートが抑制され、位置決め精度が向上すること、またパラメータ調整によって接触の際に過大な力を発生させない柔軟さを維持できるという結論を得た。

## 参考文献

- [1] S. Ishikawa, M. Nishio, and T. Sugihara. Low-cost backdrivable motor control based on feed-forward / feed-back friction compensation. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5026–5031, May 2015.
- [2] H. Asada, T. Kanade, and I. Takeyama. Control of direct-drive arm. *Technical report of Robotics Institute of Carnegie-Mellon University*, 1982.
- [3] G. A. Pratt and M. M. Williamson. Series elastic actuators. In *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Vol. 1, pp. 399–406 vol.1, Aug 1995.
- [4] 大石潔, 大西公平, 宮地邦夫. 状態測定器を用いた他励直流機の一制御法. *電気学会論文誌 B*, Vol. 104, No. 6, pp. 373–379, 1984.
- [5] <http://robotics.tokyo/ja/products/torobo.arm/>.