

〈一般研究課題〉 位置決め終了時の目標トルク到達を考慮した  
位置制御系の開発

助成研究者 大同大学 川福 基裕



## 位置決め終了時の目標トルク到達を考慮した 位置制御系の開発

川福 基裕  
(大同大学)

### Feed-forward Positioning Controller Design Considering Target Torque at the Time of Completion of Positioning

Motohiro Kawafuku  
(Daido University)

#### Abstract :

This paper presents a novel feed-forward compensation for the fast and precise positioning control in mechatronic system. The proposed compensator is designed considering the reference torque in control input under the constraint of specified step number in position reference. A 2-degrees-of-freedom positioning controller with the proposed feed-forward compensation can ensure the required settling performance with the specified steps regardless of the positioning amplitude in reference. The effectiveness of the proposed approach has been verified by numerical simulations and experiments.

#### 1. まえがき

一定の流量で一定圧の材料を射出する必要がある射出成形機や、半自律型の資材搬送装置などの人間・ロボット協調系において、目標位置への自律的な位置決め制御終了後に所望のトルク入力を行うことを目的とした力制御系への切替を行う必要がある産業機器は多数存在している。このような位置制御系から力制御系への切替を有する制御系の研究事例としては原<sup>(1),(2)</sup>らの研究がある。原らは位置制御系から力制御系の間減速制御モードを設けることで、制御系切替時においても入力トルクをなめらかに切替えている。本研究においても原らと同様、制御系切替時に入力トルクをなめらかに切替えることを試みていくが、システムの高速度という観点において、位置制御系から力制御

系の間に移行モードを設けることは好ましくないと考える。そこで、本研究では位置制御系と移行モードを統合した位置制御系の設計を試みる。具体的には、設計したステップ数で任意の位置及び目標トルクに到達することが可能な前置補償器の設計を行う。位置決め時に任意の入力トルクを指定可能な前置補償器を用いることで、力制御への切替時においても入力トルクをなめらかに切替ることが可能であると考えられる。

本提案手法は有限ステップ整定フィードフォワード補償をベースとして設計される。有限ステップ整定フィードフォワード補償は、任意のステップ数で任意の目標位置に到達可能なフィードフォワード補償法であり、位置決め動作の高速・高精度化において非常に有用である<sup>(3)~(8)</sup>。しかし、この手法は目標位置到達時点で制御対象に入力されているトルクをゼロとする手法であり、目標位置到達後に位置制御系から力制御系へスムーズに切り換える為には、目標位置到達時点において所望のトルクが入力されていることが好ましい。そこで、任意のステップ数で任意のトルク入力を生成しつつ、位置決め補償に対しては非干渉となる補償器を設計し、目標位置への到達を可能とする補償器の出力と加算することで、任意位置並びに任意トルクを出力可能な、トルク保持型有限ステップ整定フィードフォワード補償を提案する。

本報では、産業用加工機器を模擬した特性を有する汎用実験システムを製作したので、実機実験による提案手法の有効性について報告する。

## 2. トルク保持型有限ステップ整定フィードフォワード補償

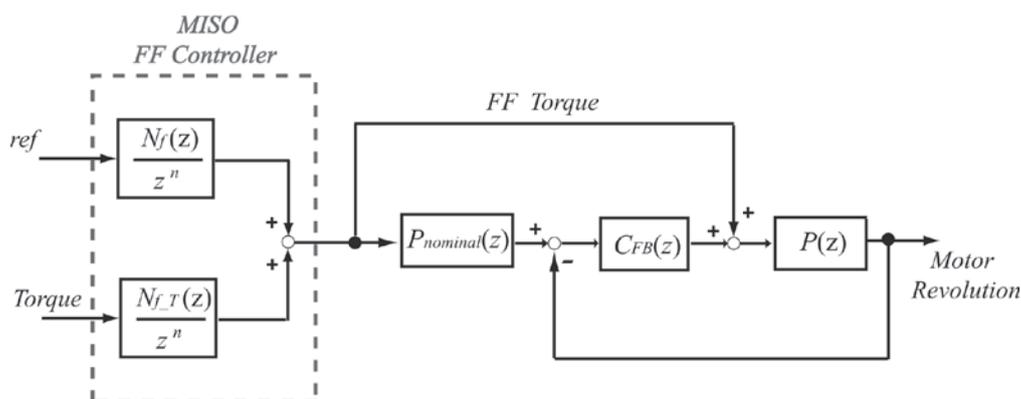


図1. トルク保持型有限ステップ整定フィードフォワード補償に基づく2自由度制御

図1は提案手法に基づく2自由度制御系のブロック線図である。本提案手法は、参考文献(3)、(8)に示された有限ステップ整定フィードフォワード補償に加え、トルク指令に対する有限整定補償器を付加し、有限ステップ整定フィードフォワード補償を多入力一出力系とするものである。

図の点線枠内に示される2つの補償器において、位置指令に対するフィードフォワード補償器  $\frac{N_f(z)}{z^n}$  が  $n$  ステップで任意の目標位置に到達するトルク(このときの終端トルクはゼロ)を生成し、トルク指令に対するフィードフォワード補償器  $\frac{N_{f-T}(z)}{z^n}$  が  $n$  ステップで任意の目標トルクに到達する時系列トルク(このときの終端位置はゼロ)を生成する。目標到達時において、位置に対するフィードフォワード補償器はトルクに、トルク指令に対するフィードフォワード補償器は位置に非干渉な入力トルクを生成するため、目標位置及びトルクはそれぞれ任意の目標値に到達することが可能となる。なお、位置ならびにトルク指令については簡単化のため、ステップ指令を用いることを条件とす

る。詳細については文献(9)をご覧いただきたい。

### 3. 汎用実験システム

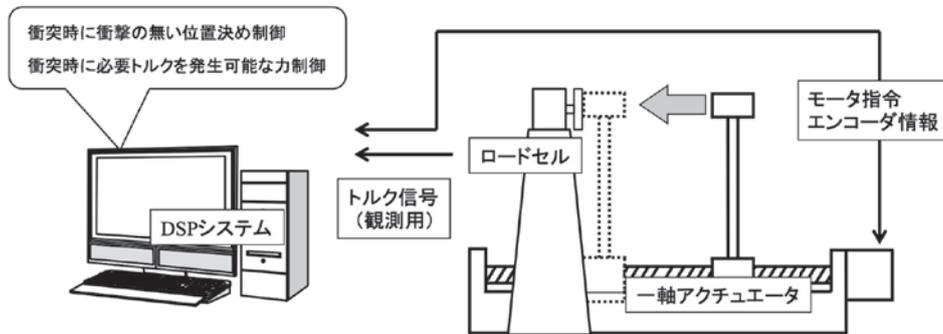


図2. 汎用実験システムの概念図

構築した汎用実験システムの概念図を図2に示す。図に示すとおり汎用実験機器は、一軸のボールネジアクチュエータ上に梁を設置し、梁先端に負荷を取り付けることで負荷自体を振動させることが可能となっている共振系のシステムである。基本となる位置決め制御はボールネジ側に設置されたエンコーダ情報を利用して設計されており、負荷先端の位置情報は利用しない設計とした。負荷先端側には位置決め終了時において衝突ならびに押しつけ力を検出できるようにロードセルと、確認用のレーザー変位計を設置した。

### 4. シミュレーションによる検証

構築した汎用実験システムのモータトルク指令からモータ回転角度までの周波数特性を図3に示す。図上段より、構築した実験システムは負荷が設置されているものの共振特性が表れておらず、単純な剛体系である事が確認できる。一方で図下段より、低周波数領域で位相の変化が見受けられることから、粘性項が存在していることが確認できる。そのため、シミュレーションで用いる詳細プラントモデルとフィードフォワード補償器を設計するための剛体系に単純化したノミナルプラントモデルを設計した。

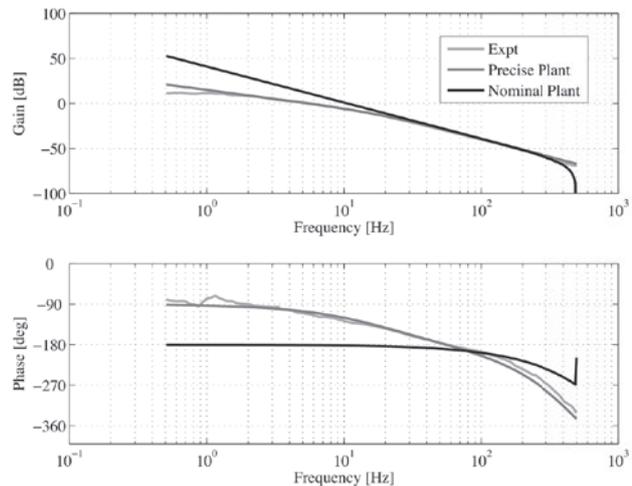


図3. 実機および数値モデルの周波数特性

実機および詳細プラントモデル、ノミナルプラントモデルの周波数応答を図3に示す。図に示すようにプラントモデルは実機周波数特性を再現できており、ノミナルプラントモデルは実機周波数特性におけるゲイン特性を十分に再現している事が確認できる。シミュレーションにおける目標値はそれぞれ、目標位置0.1 [mm]、先端負荷の押しつけ力の目標圧力を0.5 [N](モータ軸トルク換算で $5 \times 10^{-3}$  [Nm])として検証した。なお、フィードフォワード補償器の次数 $n$ は60次とし、制御周期は1 [msec]としてシミュレーションを行った。

フィードバック制御系を含む図1に示す2自由度制御系でのシミュレーション結果について検証する。図4に位置指令に対するフィードフォワードトルクを、図5に最終位置における目標トルク到達用の指令トルクを示す。図より、位置指令終了時に目標トルクに到達するためのトルク指令が出力されていることが確認できる。図6に位置決め応答波形を示す。図では比較のために位置指令のみを入力とした時の応答波形も示している。図において、従来手法を用いた位置応答は目標である0.1[mm]に速やかに到達している。一方、提案手法では図5に示すトルク指令に対するフィードフォワードトルクが追加されることによりモータが回転してしまうため、テーブル位置と目標位置との間にズレが生じていることが確認できる。しかしながら、この位置応答のズレにより負荷先端に押しつけトルクが発生すると考えられるため、問題はない。

### 5. 実機実験による検証

提案手法の有効性を構築した実機を用いて検証する。なお比較する制御系として、目標トルクを考慮しない有限ステップ整定制御を用いた。各手法の実験結果を図7から図10に示す。図7より、比較対象とした有限ステップ整定制御の結果では、モデル化誤差の影響から位置決め応答終了時に大きなオーバーシュートが発生している事が確認できる。この位置決め完了時に発生しているオーバーシュートの影響で、図8に示す負荷先端においてロードセルで測定した押しつけ力が0.1[N]程度出力されていることが確認できる。一方で、図10に示す提案手法では、位置決め完了後速やかに目標トルクである0.5[N]まで移行しており、提案手法の有効性が確認できる。しかしながら、各手法における過渡応答を見ると立ち下がりが発生しており、これらの応答劣化はモデル化誤差に対してフィードバックされる誤差トルクの影響に加え、DSP内での無駄時間が影響していると思われ、より精度の高い実証実験を行うためには、汎用実験システムのより詳細なモデル化を行っていく必要がある。

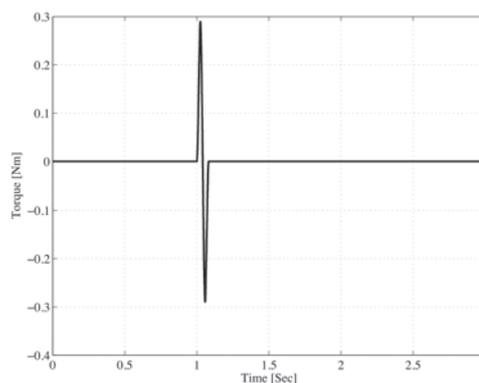


図4. 位置指令に対するフィードフォワードトルク

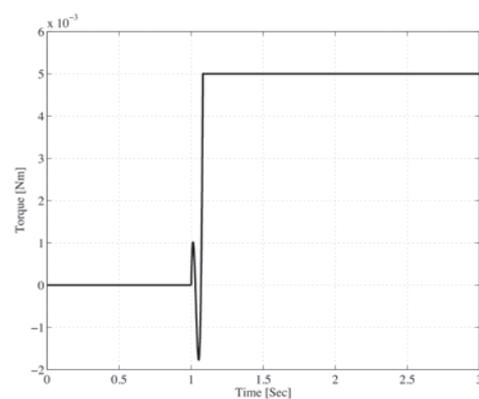


図5. トルク指令に対するフィードフォワードトルク

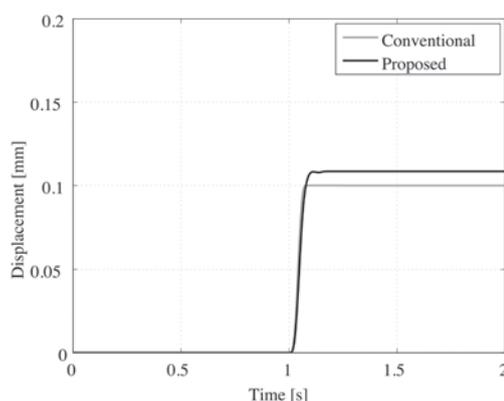


図6. 数値シミュレーションによる位置応答

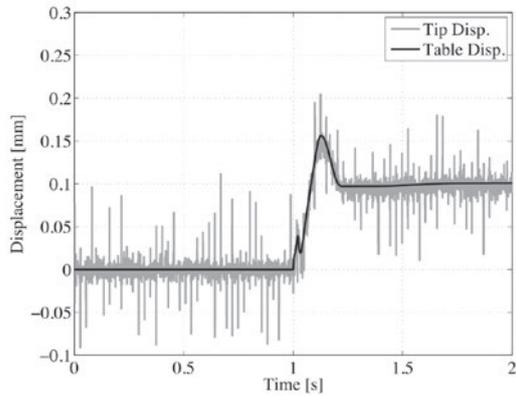


図7. 有限ステップ整定制御を用いた時の位置応答

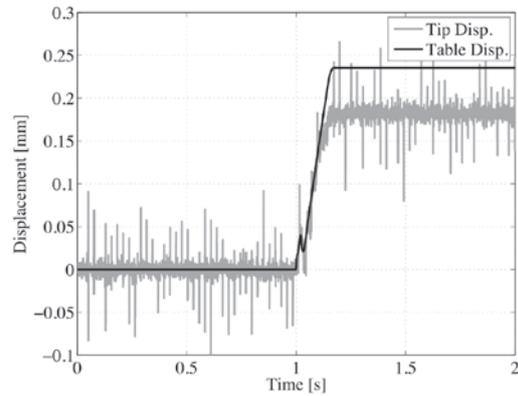


図9. 提案手法を用いた時の位置応答

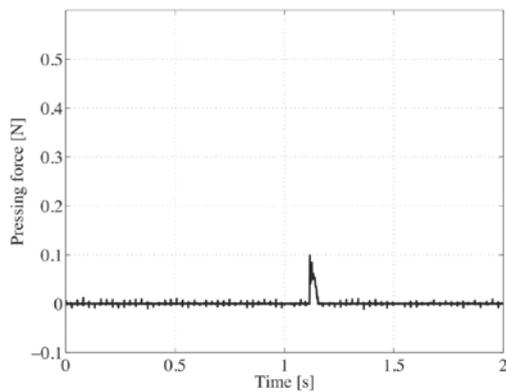


図8. 有限ステップ整定制御を用いた時の先端押しつけ力

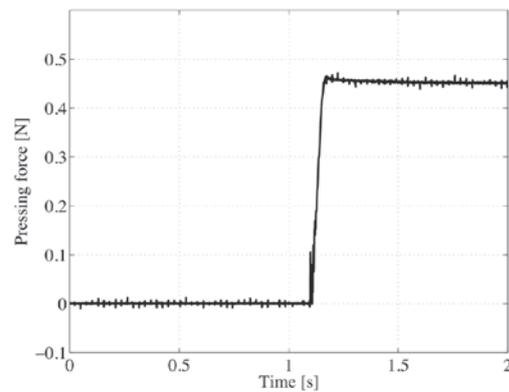


図10. 提案手法を用いた時の先端押しつけ力

## 6. あとがき

本報告では、位置制御系と移行モードを統合した位置制御系を設計することを目的に、設計したステップ数で任意の位置及び目標トルクに到達することが可能な前置補償器の設計を行った。制御対象を剛体と考えたシミュレーションを行い、提案手法を用いることで任意の目標位置に到達時点で目標トルクに到達可能であることが確認できた。

汎用実験システムを構築し、目標位置に到達完了後に速やかな目標トルク到達を達成していることが確認され、既存の手法と比較することで提案手法の有効性を実証できた。しかしながら、目標応答と比較してオーバーシュートや位置決め応答の劣化が確認でき、フィードバックされる誤差トルクの影響に加え、DSP内での無駄時間の影響を考慮する必要性が確認できた。

今後、この問題に対しフィードバックされるトルクを考慮した前置補償器について検討し、位置決め精度を損なうことなく指令トルクに対する整定精度の向上を試みていく。

## 参考文献

- (1)原：「自動搬送モードから半自動制御モードに切り換わる位置決め整定手法」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.72, No.723, p3443-3447, (2006-11)
- (2)原：「サーボ運搬制御とインピーダンスのなめらか切り替えによる台車の位置決め」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.730, p1618-1624, (2007-6)

- (3) 廣瀬、川福、岩崎、平井：「制御入力の周波数整形を考慮した有限ステップ整定フィードフォワード補償」, 電気学会論文誌, Vol.128-D No.12 pp.1403-1410 (2008)
- (4) 廣瀬、川福、岩崎、平井：「Jerk最小化を考慮した有限時間整定フィードフォワード補償」, 電気学会研究会資料, IIC-08-41, pp.29--35 (2008)
- (5) 廣瀬、川福、岩崎、平井：「有限ステップ整定FF補償のための位置指令生成」, 電気学会全国大会 No.4-253 pp.418-419 (2009)
- (6) 佐藤、廣瀬、川福、岩崎、平井：「ハードディスクベンチマーク問題への有限ステップ整定FF制御の適用」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-08-169, pp.49-53 (2008)
- (7) 佐藤、廣瀬、川福、岩崎、平井：「制御入力飽和と周波数整形を考慮した有限ステップ整定フィードフォワード補償」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-09-41, pp.117-122 (2009)
- (8) 廣瀬、岩崎、平井：「制御入力振幅の制約を考慮した有限ステップ整定フィードフォワード補償」, 電気学会論文誌, Vol.130-D, No.6, pp.785-792, (2010)
- (9) 川福：「目標トルクを考慮した前置補償器の設計」, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門大会(SI2013)、3J4-4、(2013)