

工作機械におけるステージ変数変動を考慮した 適応加工力オブザーバの基礎検討

大野 航*, 藤本 博志 (東京大学), 伊佐岡 慶浩, 寺田 祐貴 (DMG 森精機)

Basic Study on Adaptive Cutting Force Observer for Machine Tool Considering Stage Parameter Variation

Koh Ohno*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Yoshihiro Isaoka, Yuki Terada (DMG MORI CO.,LTD.)

Abstract

Monitoring machining force generated during the machining process is crucial to prevent tool breakage and chattering. Cutting force observer, which considers the machine tool as the two-inertia-system, has been proposed to estimate machining force in wide bandwidth using multiple encoders. However, modeling errors and parameter variation during machining can deteriorate estimation accuracy in such a model-based observer. Previous studies solved some modeling error issues, but inertia, friction, and other parameters that belong to the moving stage had rarely considered. Therefore, the adaptive machining force observer is proposed in this paper. The proposal consists of on-line stage parameter identification and updating algorithm. The effectiveness of the proposed adaptive observer is demonstrated through experiments using a simplified experimental setup.

キーワード：加工力オブザーバ, 加工力, センサレス推定, 適応オブザーバ, 工作機械, 切削加工
(Cutting force observer, Machining force, Sensorless estimation, Adaptive observer, Machine tool, Machining)

1. はじめに

工作機械を用いた自動加工は今日の産業を支えている。中でも切削加工は生産の最終プロセスによく用いられており、切削加工の精度が製品の精度・品質に大きく関わっていると言える。つまり、切削加工における加工エラーが製品の出来を左右する。加工エラーの発生原因としては、びびり振動や工具への高負荷、工具磨耗がよく知られており、切削する際に生じる力（切削力/加工力）の検出が原因特定・未然防止に役立つパラメータとして注目を集めている [1-3]。そこで、高価なセンサを用いた加工力検出に代わり、工作機械に備わっているモータの情報を用いたセンサレス加工力推定が研究されてきた [4,5]。近年ではモータ情報に加えステージの位置を検出するリニアエンコーダを併用した Cutting force observer (加工力オブザーバ) [6] が提案され、共振の影響を除去した加工力の広帯域推定が実現されてきた。しかし、モデルベースの加工力オブザーバはプラントモデルが変動すると推定精度が劣化してしまうという問題を本質的に内在しており、除去加工によってワーク質量が変動する工作機械においては大きな課題であった。

加工力推定を前提としたパラメータ変動への対処としては、モータとボールねじ等の伝達部に注目した伝達力（被駆動部に加わる力）のロバスト推定手法 [7] やボールねじの非線形剛性に注目した手法 [8] などが提案されてきたが、加工中/加工毎に確実に変動する被駆動部質量などは勘案されてこなかった。そこで、本研究ではステージ変数変動を陽に考慮した加工力オブザーバの適応推定を提案し、その有効性を実験にて確認した。

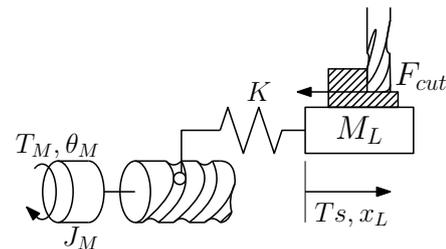


図1 ボールねじステージを有する工作機械のモデル。

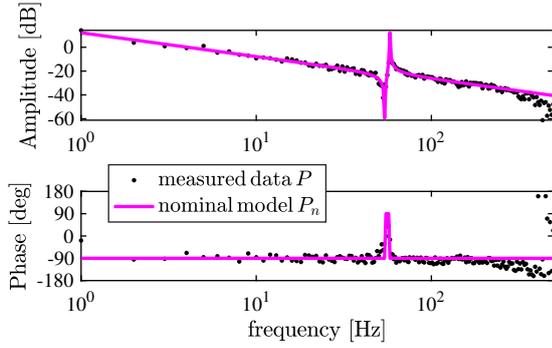
Fig. 1. Machine tool with ball-screw stage.

2. 実験機

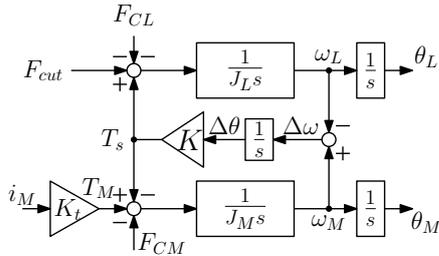
提案アルゴリズムの初期検証において実際の工作機械を用いるのは加工力の再現性などに不都合がある。工作機械に用いられているボールねじ駆動ステージは、Fig. 1 に示すようにモータ慣性 J_M 、伝達部剛性 K 、被駆動部質量 M_L などを分離することで2慣性系として考えることが知られており、[6] にて提案されている切削力オブザーバもこの特徴を利用している。そこで、本研究では工作機械と同様に2慣性系の特徴を有する Fig. 2 の実験機を利用して提案手法の検証を行った。実験機は駆動モータと被駆動モータがバネ性を持つシャフトで接続されており、これにより2慣性系の特徴が再現されている。 T_M は駆動モータトルク、シャフトを介して被駆動部に伝わる伝達力が T_s であり、 ω_M 、 ω_L はそれぞれのモータに接続されたエンコーダ測定値である。特に ω_L は工作機械のリニアスケール測定値 x_L に対応している。被駆動側のモータによって加工力を模擬した入力を再現でき、これを F_{cut} として扱う。なお、被駆動側



(a) Photograph.



(b) Frequency response.



(c) Block diagram of two inertia system model

図2 実験機 (2 慣性系モータベンチ) .

Fig. 2. Experimental setup (Two-inertia-system motor bench).

モータの駆動電流より計算されるトルクを F_{cut} として採用している。

ここで、Fig. 2(b)にて示される本実験機の駆動電流 i_M [A] から駆動側エンコーダによる測定角速度 ω_M [red/s] までの周波数応答からノミナルモデル P_n を

$$P_n = \frac{J_{Ln}s^2 + K_n}{(J_{Mn}J_{Ln})s^3 + (J_{Mn}K_n + J_{Ln}K_n)s} \quad (1)$$

とし、実周波数応答へフィッティングすることで Table 1 に示すノミナルパラメータを得た。ただし、モータ側クーロン摩擦 F_{CMn} 、被駆動側クーロン摩擦 F_{CLn} に関しては個別に採取した。

3. 手法

提案する適応加工力オブザーバの構成を Fig. 3 に示す。本稿における提案手法は、当研究グループにて提案されたロバスト伝達力/ねじれトルク推定 [9] を前提技術として、それを内在した加工力オブザーバを採用している。ここで、ID と示されているブロックが提案手法によって追加された条件付きパラメータ推定機構である。ID ブロックにて推定されたモデルパラメータを用いて、従来用いていた切削力オブザーバをオンライン更新することでオブザーバの適応

表 1 同定されたノミナルモデルのパラメータ

Table 1. Identification results of nominal parameters.

Motor inertia	J_{Mn}	0.0059 kgm ²
Motor torque constant	K_{tn}	0.173 NmA ⁻¹
Torsion stiffness	K_n	100.90 N/mm ²
Load-side inertia (w/o weight)	J_L	0.000 875 kgm ²
Motor Coulomb friction	F_{CMn}	0.06 N m
Load-side Coulomb friction	F_{CLn}	0.06 N m

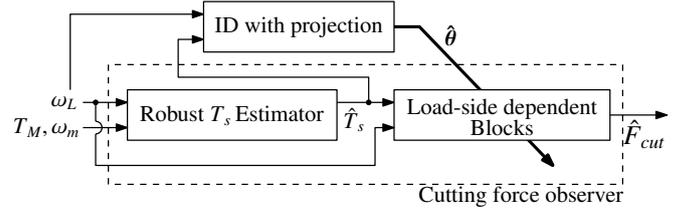


図3 提案する適応加工力オブザーバのブロック線図.

Fig. 3. Block diagram of the proposed adaptive cutting force observer.

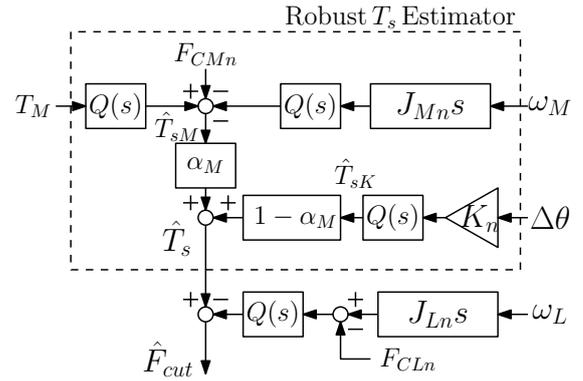


図4 ロバスト T_s 推定を前提とした加工力オブザーバ.

Fig. 4. Block diagram of cutting force observer based on robust T_s estimation.

化が実現され、先行研究で見られた問題を解決する。

本章では、はじめに提案手法の前提となる加工力推定機構、伝達力推定機構について説明し、次に被駆動部に関するパラメータ推定機構と適応化手法について述べる。

〈3・1〉 加工力オブザーバ 本稿で採用している加工力オブザーバのブロック線図を Fig. 4 へ示す。図中波線で囲まれているブロックによってモータ部変数とねじれ剛性 K の変動に対してロバストな伝達力 T_s 推定を、駆動側エンコーダによる ω_M と負荷側エンコーダによる ω_L の併用によって広帯域加工力推定をそれぞれ実現している。

ここで、工作機械が Fig. 2(c) のモデルと同等に振る舞いと仮定した時、伝達力 T_s を入力とした時の被駆動質量 J_L に関する運動方程式は

$$T_s = J_L \cdot \dot{\omega}_L + F_{CL} \cdot \text{sgn}(\omega_L) + F_{cut} \quad (2)$$

で表される。 F_{CL} は速度方向に依存する摩擦項である。今、

T_s が後述の手法によって \hat{T}_s として推定されるとき、

$$\hat{F}_{cut} = Q(s)F_{cut} = \hat{T}_s - Q(s) \left\{ J_{Ln} s \omega_L + F_{CLn} \cdot \text{sgn}(\omega_L) \right\} \quad (3)$$

によって推定加工力 \hat{F}_{cut} が得られる。ただし、 $Q(s)$ は微分実現のための適切な次数の Low-pass filter(LPF) であり、 \hat{T}_s は $Q(s)$ と同帯域の LPF を内包している。

〈3・2〉 ロバスト伝達力推定 Fig. 4 中波線で囲まれたロバスト伝達力推定は

$$\hat{T}_{sM} = Q(s) \left(T_M - J_{Mn} s \omega_M - F_{CMn} \cdot \text{sgn}(\omega_M) \right) \quad (4)$$

$$\hat{T}_{sK} = Q(s) \frac{1}{s} (\omega_M - \omega_L) K_n = Q(s) \Delta \theta K_n \quad (5)$$

で記述される 2 種類の T_s 推定手法を混合比 α_M で配合することによってロバスト化が実現されている。 \hat{T}_{sM} はモータ側外乱オブザーバによる推定 [10]、 \hat{T}_{sK} は駆動側と負荷側の相対変位に注目した推定手法 [11] である。ここで、それぞれの推定誤差分散が

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{T}_{sM}}^2 &= \dot{\omega}_M^2 \sigma_{J_M}^2 + J_{Mn}^2 \sigma_{\dot{\omega}_M}^2 + \sigma_{F_{CM}}^2 \\ \sigma_{\hat{T}_{sK}}^2 &= (\theta_M - \theta_L)^2 \sigma_{K_n}^2 + K_n^2 \sigma_{\theta_M}^2 + K_n^2 \sigma_{\theta_L}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

で表される時、 α_M を

$$\alpha_M = \frac{\sigma_{\hat{T}_{sK}}^2}{\sigma_{\hat{T}_{sM}}^2 + \sigma_{\hat{T}_{sK}}^2} \quad (7)$$

にて与えることによってモデル化誤差と測定誤差に対して最小誤差分散での伝達力推定が実現される。ただし、 σ はモデルパラメータの分散を示す。エンコーダ量子化ノイズに起因する測定誤差分散は、エンコーダ分解能が q の時に

$$\sigma^2(q) = \int_{-\frac{q}{2}}^{\frac{q}{2}} \frac{1}{q} x^2 dx = \frac{q}{12} \quad (8)$$

によって与えられ、 $\dot{\omega}$ の等価的な分解能としてサンプリング周期 t_s に対して q/t_s^2 を仮定している。詳しい導出や仮定は文献 [9] を参照されたい。

〈3・3〉 逐次最小二乗法を用いたパラメータ推定 提案法である Fig. 3 において、ID と明記されたブロックでは逐次最小二乗法 (RLS) に基づくパラメータ推定が行われるが、これは discontinuous projection と条件付きパラメータ更新によってロバスト化されている [12]。本アルゴリズムにおいては、時刻 k におけるリグレッサ $\varphi[k]$ が後述する PE (Persistent excitation) 条件を満足する時、 L サンプルの矩形窓を有する RLS 法を利用して、推定パラメータベクトル $\hat{\theta}[k]$ を

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + \text{Proj}_{\theta}(\mathbf{E}[k]) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[k] &= \mathbf{P}[k] \varphi[k] \{y[k] - \varphi^T[k] \hat{\theta}[k-1]\} \\ &\quad - \mathbf{P}[k] \varphi[k-L] \{y[k-L] - \varphi^T[k-L] \hat{\theta}[k-1]\} \end{aligned} \quad (10)$$

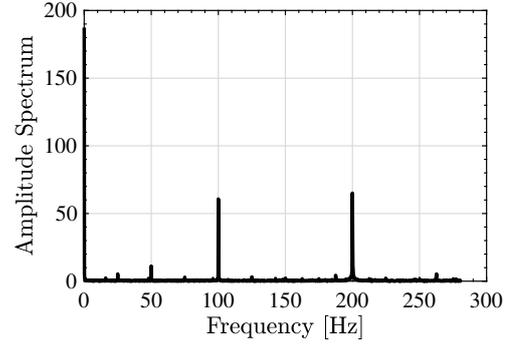


図5 NVX5000 による切削加工における推定加工力の周波数解析。

Fig. 5. Frequency analysis of the estimated machining force in NVX5000.

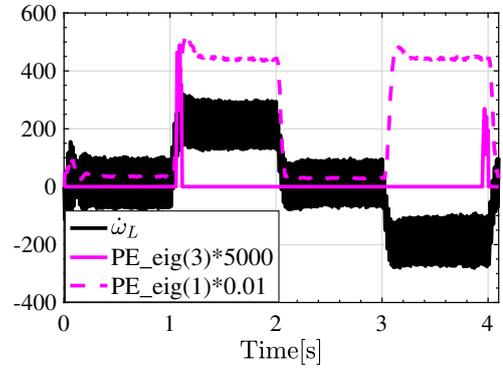


図6 PE 条件判別。

Fig. 6. Discrimination of PE condition.

$$\mathbf{P}[k] = \mathbf{Q}[k] - \frac{\mathbf{Q}[k] \varphi[k-L] \varphi^T[k-L] \mathbf{Q}[k]}{1 + \varphi^T[k-L] \mathbf{Q}[k] \varphi[k-L]} \quad (11)$$

$$\mathbf{Q}[k] = \mathbf{P}[k-1] + \frac{\mathbf{P}[k-1] \varphi[k-L] \varphi^T[k-L] \mathbf{P}[k-1]}{1 + \varphi^T[k-L] \mathbf{P}[k-1] \varphi[k-L]} \quad (12)$$

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}_j}(\cdot_j) := \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{\theta}_j = \theta_{j \max} \text{ \& } \cdot_j > 0 \\ 0 & \text{if } \hat{\theta}_j = \theta_{j \min} \text{ \& } \cdot_j < 0 \\ \cdot_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

により更新し、PE 条件を満足しない際は $\mathbf{P}[k] = \mathbf{P}[k-1]$ として更新を行わない。また、 $\text{Proj}_{\hat{\theta}}$ 関数によって推定パラメータの範囲を指定しており、これにより更新される加工力オブザーバの最低限の性能が保証される。

工作機械の被駆動ステージに適用するにあたり、未知パラメータ J_L , F_{CL} を式 (2) の運動方程式に基づいて RLS 法に用いるリグレッションモデルを設計したいが、本来 F_{cut} は未知である。そこで、加工力の周波数特性に注目してリグレッションモデルを設計する。Fig. 5 に DMG 森精機社製の NVX5000 を用いた実際の加工試験において、その推定加工力の周波数成分を解析した結果を示す。ただし Fig. 5 の加工力推定には設計値を用いた加工力オブザーバを用いて

いるため、目安としての利用に留めていることを留意されたい。Fig. 5 より、加工力は直流成分と回転工具がワークに接触する際に生じる高周波成分で構成されていることがわかる。これより、式 (2) の両辺を帯域が低い LPF, $Q_{RLS}(s)$ を用いてフィルタ処理することで F_{cut} が推定区間 L において一定値であると仮定できる。この仮定のもと加工力 F_{cut} の直流成分を推定対象に含めたりグレッションモデルを以下に示す。

$$y = \varphi^T \theta \quad (14)$$

但し、 $y = Q_{RLS}(s)\hat{T}_s$, $\varphi^T = Q_{RLS}(s)[\omega_L, \text{sgn}(\omega_L), 1]$, $\theta = [J_L, F_{CL}, F_{cut}^{DC}]^T$ である。 F_{cut}^{DC} は加工力 F_{cut} の直流成分に該当し、パラメータ推定に利用なお、このリグレッションモデルは先行研究 [9] によりモデル化誤差に対してロバストな伝達力が推定されていることを前提としている。

PE 条件に関して考える。PE 性とは、信号の励起度合いに関する指標であり、その入力信号が適切に励起されている時にパラメータ推定値が真値に収束することが保証されている。適当な動作における状態量ベクトル φ の PE 性を判別するため、次式に示す行列 $M[i]$ の最小固有値の時間変化を Fig. 6 のマゼンタ実線として示した。

$$M[i] = \frac{1}{L} \sum_{l=i-L}^i \varphi[l]\varphi[l]^T \quad (15)$$

式 (15) は [13] における PE 条件算出法の一つであり、 L は RLS 法の矩形窓長さに対応する。Fig. 6 にて、1s と 4s にて PE 性が正定となっており、これは速度反転 (= $\text{sgn}(\omega_L)$ の変化) に対応している。このような PE 条件が確認されるのは推定パラメータ中の F_{CL} と F_{cut}^{DC} との分離可能条件に依存していると考えられる。しかし、速度反転時のみパラメータ推定を行うのでは推定機会が乏しく実用的ではない。そこで、試行錯誤的に検討した結果、厳密な PE 性正定条件の代わりとして角加速度 ω_L の絶対値が一定値以上になる状態を本稿における PE 条件とした。ここで、式 (15) をオンラインでの PE 条件判断に用いないのは、状態量などを PE 性の指標として扱う方が計算量や推定条件のチューニングの面で有利なためである。参考として Fig. 6 に時間変化の大きな他の固有値の時間変化 (マゼンタ破線) とその際の ω_L (黒実線) をまとめている。

以上に述べた推定機構によって推定された被駆動側変数を用いて加工力オブザーバの対応する変数 (Fig. 4 中の J_{Ln} , F_{CLn}) を更新し、Fig. 3 に示した適応加工力オブザーバを実現する。

4. 実験

有効性の検証するために提案手法 (Fig. 3) と従来手法であるロバスト伝達力推定を前提とした加工力オブザーバ (Fig. 4) を比較した。

〈4・1〉 条件 実験では、被駆動側変数が変動した

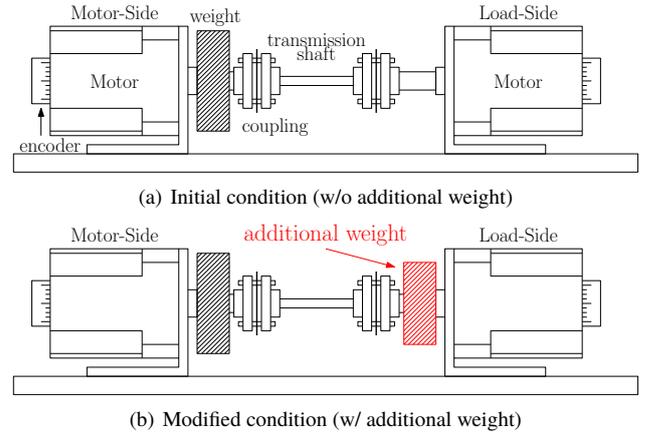


図7 おもりの有無により加工によるワークの質量変動を模擬した実験機。
Fig. 7. Experimental setup w/ and w/o additional weight on the load-side, simulating inertia variation during machining.

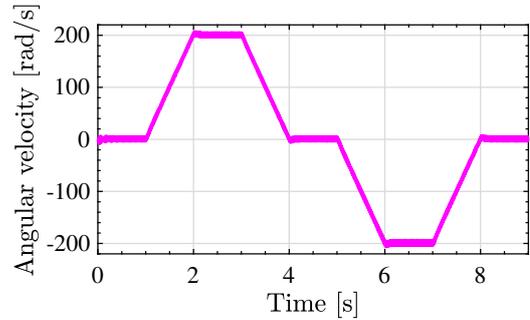


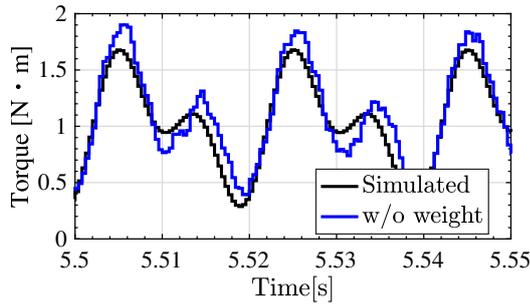
図8 実験における負荷側角速度。
Fig. 8. Trajectory of load-side angular velocity in experiment.

表2 実験条件
Table 2. Experimental conditions.

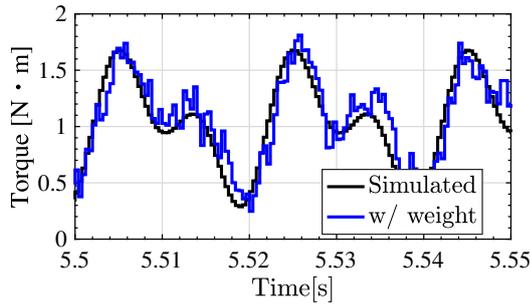
Sampling period	t_s	0.4 ms
Encoder resolution	q	20 bit
Estimation length of RLS	L	100 samples
Cutoff frequency	$Q(s)$	150 Hz
Cutoff frequency	$Q_{RLS}(s)$	5 Hz

時の提案法の有効性を検証する。はじめにオブザーバの設計パラメータとプラントが一致している Fig. 7(a) の環境にて、提案手法と従来手法の双方で加工力推定を推定し比較する。次に、被駆動側モータにおもりを接続した Fig. 7(b) の状態に変更することでワークの変更などによる質量変動を再現し、同様の比較実験を行った。この時、各オブザーバの設計パラメータは変更しない。

提案手法、従来手法の各オブザーバ設計では、ステージに何も載っていない工作機械を模擬した Fig. 7(a) の状態において取得されたパラメータ (Table 1) を用いる。ロバスト伝達力推定機構に設定するモデルパラメータの分散 (σ_{J_M} , σ_{J_K} , $\sigma_{F_{DM}}$) はそれぞれのパラメータが $\pm 3\sigma$ の区間で次の誤差を持つようなものとして与えた。



(a) w/o additional weight.



(b) w/ additional weight.

図9 提案手法による F_{cut} 推定（追加するおもりの有無による比較）.

Fig. 9. F_{cut} estimation by proposed observer (w/ and w/o additional weight).

$$J_M : \pm 5\%, K : \pm 30\%, F_{CM} : \pm 50\%$$

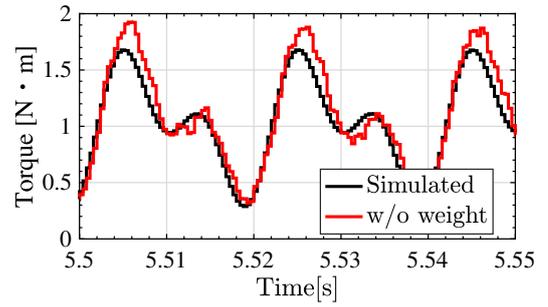
また、パラメータ推定機構 ID では、以下のようにパラメータの範囲を定めている。

$$J_L \in (0.0005, 0.002), F_{CL} \in (0.0, 0.2), F_{cut}^{DC} \in \mathbb{R}$$

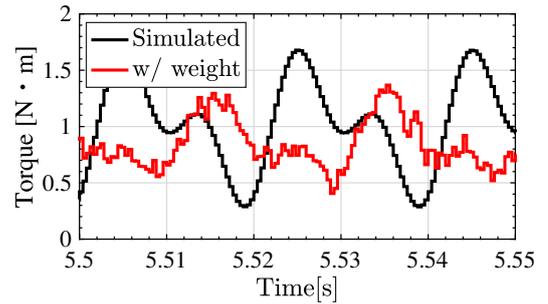
その他の装置設定やオブザーバの帯域などは Table 2 へまとめている。

被駆動側のモータを用いて加工力を模擬したトルクを加え、加工力の推定結果を観測する。実験装置はノミナルプラントの剛体モードに対して 5Hz に重根極配置した PI 速度制御を実装し、その速度軌道は切削加工時の往復動作を想定して Fig. 8 に示す動作を行う。負荷側モータから入力する模擬加工力は、Fig. 5 を加工力の目安として 1N の直流成分と振幅が 0.5N で周波数がそれぞれ 50Hz と 100Hz の正弦波振動を足し合わせた信号を採用した。重切削においては加工工具の歯の接触周波数が支配的になることが測定により確認されており [6]、またインパルス状の加工力が生じた場合にも駆動側と負荷側の双方のエンコーダを用いた加工力推定機構によって共振によるゲイン・位相影響が除去され、 $Q(s)$ フィルタの帯域内で高次高調波を推定できるという理由からこの実験設定は妥当である。

〈4・2〉 実験結果 提案手法によって推定された推定加工力 \hat{F}_{cut} と入力した模擬加工力の時間応答比較を Fig. 9 に、



(a) w/o additional weight.



(b) w/ additional weight.

図10 従来手法による F_{cut} 推定（追加するおもりの有無による比較）.

Fig. 10. F_{cut} estimation by conventional observer (w/ and w/o additional weight).

表3 推定誤差 RMS 値の比較

Table 3. RMS of the estimated errors.

	Prop. (adaptive)	Conv. (fixed parameters)
w/o additional weight	0.1305	0.1242
w/ additional weight	0.1754	0.4616

従来手法による推定結果を Fig. 10 へ示す。模擬加工力と推定値の公平な比較のために、 $Q(s)$ と同遮断周波数の LPF で模擬加工力をフィルタ処理した上で比較している。それぞれの図において、Fig. 9(a), Fig. 10(a) がおもりのない初期状態、Fig. 9(b), Fig. 10(b) がおもりを追加した状態の推定結果を示している。提案手法の推定結果を示した Fig. 9 より、提案手法ではおもり追加の有無にかかわらず模擬加工力をよく推定していることが確認できる。一方で、従来手法の推定結果である Fig. 10 はおもり追加前には良好な推定結果を示しているものの、おもり追加後に著しく推定精度が悪化していることがわかる。さらに、各手法によって推定された推定加工力 \hat{F}_{cut} と模擬加工力との誤差の RMS 値をまとめた Table 3 より、おもりの追加後に従来手法 (Conv.) では誤差の RMS 値が 4 倍ほどに増加しているのに対し、提案手法 (Prop.) ではその誤差増加が抑えられている。

ここで、おもり追加後の RLS 法によるパラメータ推定の様子を Fig. 11 に示す。Fig. 11 において、黒線がおもり追加前のパラメータ推定遷移、マゼンタ線がおもり追加後のものを指す。おもり追加前後のパラメータ推定結果を比較す

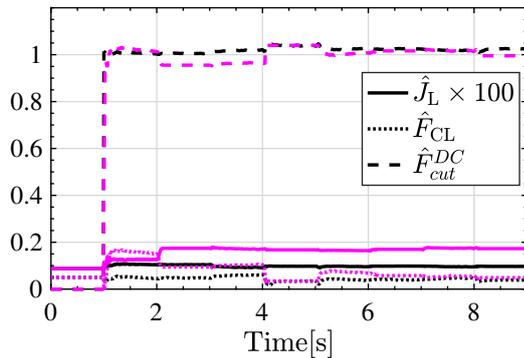


図 11 逐次最小二乗法によるパラメータ推定 (黒線：追加おもりなし，マゼンタ線：追加おもりあり)。
Fig. 11. Parameter estimation by RLS algorithm (black line: w/o weight, magenta line: w/ weight).

ると， \hat{F}_{CL} の収束値が相違ない反面，おもり追加後により \hat{J}_L が大きく推定されており環境の変動に応じた推定及び加工力推定オブザーバの更新が行われていると言える。

以上より，提案手法によって被駆動側変数変動の逐次推定に基づく適応化加工力オブザーバが実現されていると考えられる。

5. 結論

本稿ではボールねじ送り機構を有する工作機械における加工力推定において，ワークやその固定具を含む被駆動部の質量変動や環境変化による摩擦変動の影響によって推定精度が悪化してしまう先行手法に対し，被駆動部に関するパラメータを逐次最小二乗法によって推定し，かつ得られたパラメータによって加工力推定機構を逐次更新することでその問題を解決する手法を提案した。工作機械と同様の特性を有する実験装置を用いた実験によって提案手法と従来手法の比較を行い，その有効性を検証した。今後の研究課題としては，本稿で無視した粘性摩擦係数の考慮や，推定条件の妥当性考察，実際への工作機械の適用などが挙げられる。

参考文献

- (1) K. Javed, R. Gouriveau, X. Li, and N. Zerhouni, "Tool wear monitoring and prognostics challenges: a comparison of connectionist methods toward an adaptive ensemble model," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 29, no. 8, pp. 1873–1890, 2018.
- (2) M. Nouri, B. K. Fussell, B. L. Ziniti, and E. Linder, "Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 89, pp. 1–13, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.011>
- (3) A. I. Azmi, "Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites," *Advances in Engineering Software*, vol. 82, pp. 53–64, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.12.010>

- (4) H. Saraie, M. Sakahira, S. Ibaraki, A. Matsubara, Y. Kakino, and M. Fujishima, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Forces Based on Spindle Motor and Servo Motor Currents in Machining Centers," *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21*, 2003.
- (5) Y. Kakinuma and T. Kamigochi, "External sensor-less tool contact detection by cutting force observer," *Procedia CIRP*, vol. 2, no. 1, pp. 44–48, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.05.037>
- (6) Y. Yamada and Y. Kakinuma, "Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 9–12, pp. 3337–3348, 2016.
- (7) S. Yamada and H. Fujimoto, "Precise External Torque Estimation for Two-Inertia System Considering Modeling Errors," *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 2018–June, no. 3, pp. 5238–5243, 2018.
- (8) S. Yamato, A. Sugiyama, N. Suzuki, N. Irino, Y. Imabeppu, and Y. Kakinuma, "Enhancement of cutting force observer by identification of position and force-amplitude dependent model parameters," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 9–12, pp. 3589–3605, 2019.
- (9) S. Yamada and H. Fujimoto, "Minimum-variance load-side external torque estimation robust against modeling and measurement errors," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 2, pp. 117–124, 2020.
- (10) M. Matsuoka, T. Murakami, and K. Ohnishi, "Vibration suppression and disturbance rejection control of a flexible link arm," *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, vol. 2, pp. 1260–1265, 1995.
- (11) J. Suzuki, T. Murakami, and K. Ohnishi, "Position and force control of flexible manipulator with position sensitive device," *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC*, pp. 414–419, 2002.
- (12) H. Fujimoto and B. Yao, "Multirate adaptive robust control for discrete-time non-minimum phase systems and application to linear motors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 4, pp. 371–377, 2005.
- (13) K. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, ser. Dover Books on Electrical Engineering. Dover Publications, 2008.