

# NC 工作機械における可変パルス数計時法を用いた 主軸モータによる力センサレス切削抵抗制御

石橋央成\*, 藤本博志 (東京大学)

Force Sensorless Control of Cutting Resistance for NC Machine Tools  
by Spindle Motor Control Utilizing Variable Pulse Number T-method  
Teruaki Ishibashi\*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

## Abstract

This paper proposes a force sensorless control of cutting resistance for numerical control (NC) machine tools by spindle motor. In conventional NC machine tools, spindle speed is set as constant during machining, and the spindle speed is determined according to operator's experience. The proposed method estimates cutting resistance by disturbance observer, and determines the spindle speed in which the cutting resistance follows the reference value. In addition, a novel method for velocity calculation (Variable Pulse Number T-method) is proposed to reduce the velocity measurement noise and to improve the robustness of disturbance observer.

キーワード：NC 工作機械, 切削抵抗, エンドミル加工, 主軸角速度制御, 可変パルス数計時法, 外乱オブザーバ  
(NC machine tools, cutting resistance, end milling, spindle speed control, variable pulse number T-method, disturbance observer )

## 1. はじめに

産業界では数値制御 (NC) による工作機械が, マザーマシンとして重要な役割を担っている。そのため工作機械には常に高速・高精度化が要求されており, これらを実現するための研究開発が盛んに行われている。

加工精度を悪化させる原因として, 切削抵抗, 工具やワークの変形, びびり振動, 熱膨張が挙げられる。びびり振動とは切削加工中, 諸原因によって工具が振動する現象のことである<sup>(1)</sup>。切削抵抗は工具たわみの原因であり<sup>(2)</sup>, 工具やワークへ直接的な負荷となるためその挙動には注意が必要である。

切削抵抗の測定には力センサや加速度センサを追加するのが一般的だが, 工作機械への取り付けが容易でない点やコスト面などの理由から実用的ではない。切削抵抗の予測, 制御に関する先行研究には, 数学モデルに基づきあらかじめ切削抵抗を予測する手法<sup>(3)-(5)</sup>が報告されているが, モデル化の際にワークや工具に関するパラメータが既知である必要がある。しかし, これらのパラメータは切削中の工具摩耗や切削熱によって変動するため, 上述した手法は実用的ではない。

文献(6)ではステージのモータへの負荷から切削抵抗を推定し, ステージ速度制御を行う手法が提案されている。しかしながら, 多軸加工機ではステージの位置, 姿勢制御との干渉の発生や, ボールねじで発生する摩擦力と切削抵抗を区別することが困難であるという問題がある。

本稿で提案する手法は, 切削抵抗のモデル化を行い, 送り速度, 主軸角速度と切削抵抗の関係を表すモデル中の係数  $k$  を外乱オブザーバと最小二乗法を用いて推定する。得られたモデルに基づき, 主軸の角速度制御を行うことで, 切削抵抗の制御を行う。

本手法では, 主軸モータのエンコーダ情報を用いた外乱オ

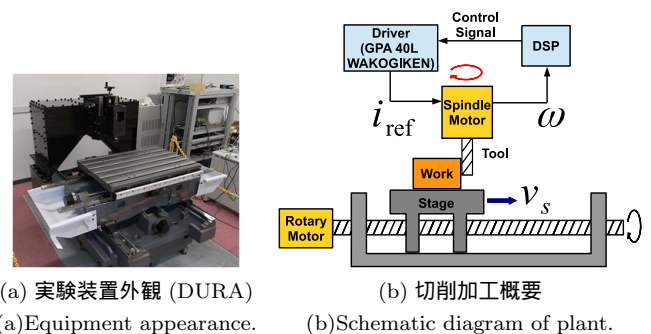


図 1 実験装置

Fig. 1. Experimental equipment.

ブザーバによって切削抵抗を推定するため, 追加のセンサを必要とせず, ステージイナーシャの変動にロバストであるという利点がある。主軸を制御するためステージとの干渉が無く, 切削抵抗制御と位置, 姿勢制御を独立に行うことが可能である。

また, 外乱オブザーバはエンコーダの量子化誤差に起因するノイズの影響を受けるため, 本稿ではさらに, 光学エンコーダ量子化による計測ノイズを低減するための可変パルス数計時法 (VPNT-method) を提案する。

## 2. 制御対象

本章では, 制御対象と, 切削抵抗の簡易モデルについて述べる。

**2.1 主 軸** 本研究に用いた実験装置を図 1(a) に示す。また, 切削加工中の制御対象の様子を図 1(b) に示す。ステージを水平方向へ送り, ステージに固定されているワークを工具に押し当てることによって切削を行う。切削中には工具とワークの間に切削抵抗が生じる。

本稿ではステージ送り速度を一定とし, 主軸モータを制御

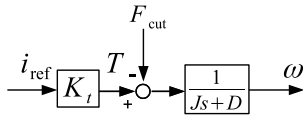
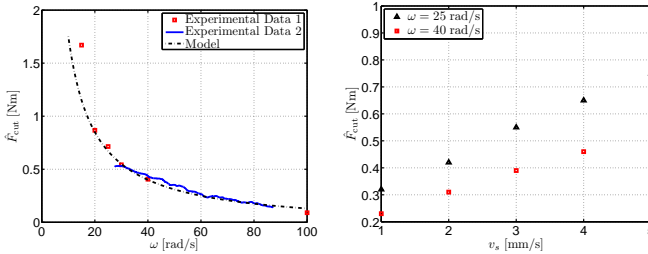


図 2 制御対象ブロック図  
Fig. 2. Block diagram of plant.

表 1 主軸パラメータ  
Table 1. Parameters of spindle.

Driver	GPA40L(WAKOGIKEN)
Inertia $J$	$4.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Friction coefficient $D$	$2.0 \times 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{s}$
Torque coefficient $K_t$	$0.92 \text{ Nm/A}$



(a) 切削抵抗と主軸角速度の関係  
(a) Relationship between cutting resistance and angular velocity.  
(b) 切削抵抗と送り速度の関係  
(b) Relationship between cutting resistance and stage velocity.

図 3 切削抵抗測定結果  
Fig. 3. Measurements of cutting resistance.

することによって切削抵抗制御を行う。切削中の制御対象のブロック図を図 2 に示す。 $v_s$  [mm/s] はステージ送り速度である。 $i_{\text{ref}}$  [A] を電流指令、 $K_t$  [Nm/A] をトルク定数、 $T$  [Nm] を出力トルクとすると、

$$T = K_t i_{\text{ref}} \dots \dots \dots (1)$$

が成り立つ。本稿では切削抵抗を主軸モータへの外乱トルクとし、 $F_{\text{cut}}$  [Nm] と表記する。 $J$  [kg · m<sup>2</sup>] を工具を含めた主軸のイナーシャ、 $D$  [Nm · s] を主軸モータの摩擦係数、 $\omega$  [rad/s] を主軸角速度とすると、

$$\omega = \frac{1}{Js + D} (T - F_{\text{cut}}) \dots \dots \dots (2)$$

が成り立つ。本研究で使用したドライバ及び、主軸モータのパラメータを表 1 に示す。

2.2 切削抵抗モデル 切削抵抗は切り屑厚さに比例すると仮定し、簡易モデル化を行う。主軸角速度とステージ送り速度を用いると、(3) 式となる。

$$F_{\text{cut}} = k \frac{v_s}{\omega} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $k$  [N] はワークの材質や切り込み幅、切り込み深さによって変動するパラメータであり、以降、切削抵抗係数と称す。

切削実験によって得られた主軸角速度  $\omega$  と外乱オブザーバによって推定された切削抵抗  $\hat{F}_{\text{cut}}$  の関係を図 3(a) に示す。測定では、ワークとしてケミカルウッドを使用し、 $v_s = 4 \text{ mm/s}$  と

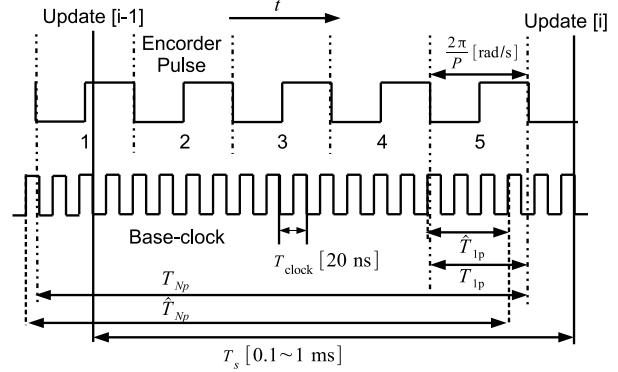


図 4 エンコーダ処理法  
Fig. 4. Principle of velocity detection.

し、切り込み幅、切り込み深さはそれぞれ 5, 14 mm で行った。図中、Experimental Data 1 は  $\omega = 15, 20, 25, 30, 40, 100 \text{ rad/s}$  にて測定したデータである。また、Experimental Data 2 は  $\omega = 27 \sim 88 \text{ rad/s}$  の領域にて主軸角速度  $\omega$  をランプ状に増加させながら測定したデータである。切削抵抗と主軸角速度には反比例の関係が見られた。

送り速度  $v_s$  と外乱オブザーバによって推定された切削抵抗  $\hat{F}_{\text{cut}}$  の関係を図 3(b) に示す。送り速度と切削抵抗には比例関係が見られた。

簡易切削抵抗モデルと実測値の傾向が一致しているため、本モデルに基づき制御系の設計を行う。

### 3. エンコーダ処理法

本章では、従来の角速度検出手法と提案する可変パルス数計時法について述べる。

3.1 角速度検出方法 代表的な角速度検出手法として、計数法 (M-method)、計時法 (T-method)、同期計数法 (S-method)<sup>(7)</sup>、平均計時法<sup>(8)</sup> が挙げられる。

計数法は低速度域において精度が悪化する性質を持つ。同期計数法はサンプリング時間内に通過するパルス数の変化に同期し演算する手法であり、全速度域において高精度な速度検出が行える。計時法は高速度域で精度が悪化するという性質をもつ。平均計時法は計測する速度域に合わせてあらかじめカウントパルス数  $N_p$  を設定することで、計時法に比べ、より高速度域まで高精度計測が可能となる。平均計時法では、カウントパルス数  $N_p$  をある値に固定するため、計測する速度域が変化した場合には精度の悪化や、位相遅れの増大の問題が生じる。

可変パルス数計時法は、計測する速度が変化する状況を考慮した、平均計時法に基づく角速度検出手法である。本手法ではカウントパルス数  $N_p$  が計測する角速度に応じて逐次変化する。検出アルゴリズムを第<3.3>節にて述べる。

3.2 検出精度 角速度検出手法の概要を図 4 に示す。 $P$  をエンコーダ分解能、 $N_s$  をサンプリング時間内に通過するパルス数、 $T_{\text{clock}}$  [s] を Base-clock の量子化時間、 $T_s$  [s] をサンプリング時間、 $T_{1p}[i]$  [s] を 1 パルスが通過する実際の時間、 $\hat{T}_{1p}[i]$  [s] を Base-clock による  $T_{1p}[i]$  の計測値、 $T_{Np}[i]$  [s] を  $N_p$  パルス通過する実際の時間、 $\hat{T}_{Np}[i]$  [s] を Base-clock に

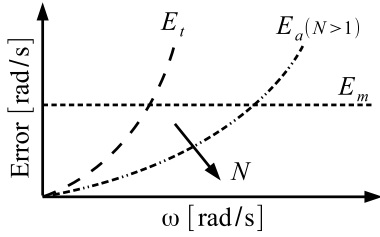


図5 角速度検出誤差

Fig. 5. Angular velocity detection error.

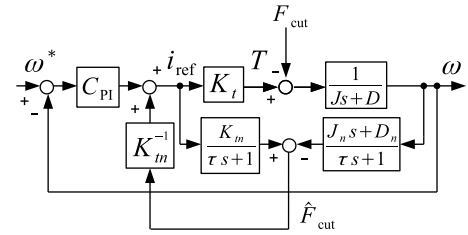


図6 角速度制御系ブロック図

Fig. 6. Block diagram of angular velocity control.

よる  $T_{N_p}[i]$  の計測値とする。

各手法の角速度算出式を (4)~(6) 式に示す<sup>(8)</sup>。

$\omega_m, \omega_t, \omega_a$  [rad/s] はそれぞれ計数法, 計時法, 平均計時法によって算出される角速度を表す。

$$\omega_m[i] = \frac{2\pi N_s[i]}{P} \frac{1}{T_s} \dots (4)$$

$$\omega_t[i] = \frac{2\pi}{P} \frac{1}{\hat{T}_{1p}[i]} \dots (5)$$

$$\omega_a[i] = \frac{2\pi N_p[i]}{P} \frac{1}{\hat{T}_{N_p}[i]} \dots (6)$$

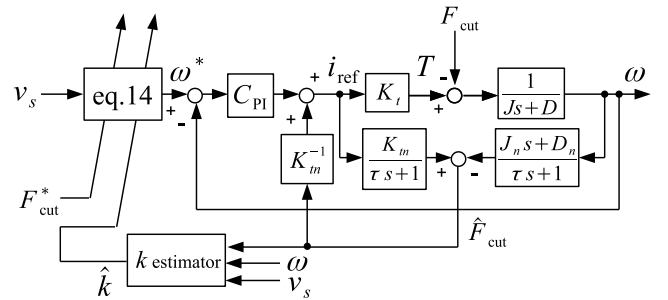


図7 切削抵抗制御系ブロック図

Fig. 7. Block diagram of cutting resistance control.

検出誤差は, 計数法ではエンコーダ分解能に起因する。一方, 計時法, 平均計時法ではエンコーダ分解能と Base-clock の分解能に起因する。

計数法, 計時法, 平均計時法の検出最大誤差  $E_m, E_t, E_a$  [rad/s] は (7)~(9) 式となる<sup>(8)</sup>。また, 検出誤差の概念図を図5に示す。

$$E_m[i] = \frac{2\pi}{P \cdot T_s} \dots (7)$$

$$E_t[i] = \frac{2\pi}{P} \frac{T_{clock}}{\hat{T}_{1p}[i](\hat{T}_{1p}[i] + T_{clock})} \dots (8)$$

$$E_a[i] = \frac{2\pi}{P} \frac{T_{clock}}{\hat{T}_{1p}[i](N_p \hat{T}_{1p}[i] + T_{clock})} \dots (9)$$

ここで,  $\hat{T}_{N_p} = N_p \hat{T}_{1p}$  として近似を行った。  $T_{clock}$  は  $T_{1p}$  に比べ十分小さいことを考慮すると, 平均計時法は計時法に対して誤差が  $1/N_p$  に減少する。

3.3 可変パルス数計時法 可変パルス数計時法の角速度検出は以下の手順に従って行われる。

- (1) 前の更新タイミングから通過するパルス数  $N_p[i]$  をカウントする。
- (2)  $N_p[i]$  がカウントアップされるタイミングに同期して, 前の更新タイミングから経過した時間  $T_{N_p}[i]$  を Base-clock を用いて計測する。
- (3) 次の更新タイミングになった時点で, それまでに保持していた  $N_p[i]$  と  $\hat{T}_{N_p}[i]$  を用いて (10) 式に基づき角速度検出を行う。

$$\omega_v[i] = \frac{2\pi N_p[i]}{P} \frac{1}{\hat{T}_{N_p}[i]} \dots (10)$$

ここで,  $\omega_v$  [rad/s] は可変パルス数計時法によって算出される角速度である。

#### 4. 切削抵抗制御設計

本章では, 切削抵抗制御系の設計について述べる。

4.1 制御系設計 角速度制御系ブロック図を図6に示す。PI 制御器を用い, フィードバックによって角速度制御を行う。コントローラ  $C_{PI}$  の各ゲインは極配置法によって重根となるよう設計した。ゲイン決定式を以下に示す。

$$C_{PI} = \frac{K_P s + K_I}{s} \dots (11)$$

$$K_P = \frac{2J\omega_p - D}{K_{tn}}, \quad K_I = \frac{J\omega_p^2}{K_{tn}} \dots (12)$$

ここで,  $\omega_p$  [rad/s] は角速度制御系の極であり, 本稿では 100 rad/s とした。

さらに外乱オブザーバを用いることによって切削抵抗による外乱の非干渉化を行った。外乱オブザーバのローパスフィルタの時定数  $\tau$  [s] はエンコーダのノイズを考慮し,  $1/(2\pi \cdot 200)$  s とした。

4.2 係数  $k$  の推定 切削抵抗モデル (3) 式に基づき, 切削抵抗係数  $k$  の推定を行う。あるサンプルにおける出力  $y$  は, 未知パラメータ  $\theta$ , 入手可能な信号  $\eta$  を用いて, 以下のように表されるとする。

$$y = \theta \eta \dots (13)$$

ここで, (13) 式における出力  $y$  には切削抵抗  $\hat{F}_{cut}$ , 未知パラメータ  $\theta$  には切削抵抗係数  $k$ , 入手可能な信号  $\eta$  には  $v_s/\omega$  が対応する。未知パラメータである切削抵抗係数  $k$  の推定には一括最小二乗法を用いる。

切削抵抗はツールの回転角に伴って変動する。ツールが1回転する間の切削抵抗の平均値を制御するため, 現サンプル点から  $n_r$  回転分 ( $n_r$ : 整数) の区間の計測データを用いて制御周期ごとに  $\hat{k}$  の更新をリアルタイムで行う。

4.3 角速度指令値生成 切削抵抗制御ブロック図を図

7に示す。切削抵抗モデル(3)式と推定値 $\hat{k}$ を用いて、切削抵抗が指定した値 $F_{cut}^*$ となるよう(14)式に基づき、角速度指令値 $\omega^*$ を生成する。

$$\omega^* = \frac{\hat{k}}{F_{cut}^*} v_s \dots \dots \dots (14)$$

### 5. 可変パルス数計時法シミュレーション

本章では、角速度計測のシミュレーション結果を示す。インクリメンタルエンコーダ(8000 Pulse/Rev)を想定し、計数法と可変パルス数計時法のサンプリング時間は1ms, Base-clockの量子化時間は20nsとした。実際の切削加工中に発生する角速度のリプルを考慮し、平均計時法におけるカウントパルス数 $N_p$ は、角速度更新周期がサンプリング時間を越えないよう保守的に小さく $N_p = 100$ とした。

$\omega_0 = 104.825$  rad/sにおいて検出された角速度を図8(a), 図8(b)に示す。また、可変パルス数計時法におけるカウントパルス数 $N_p$ を図8(c)に示す。計数法、平均計時法に比べ、検出誤差が低減出来ていることが確認された。これは、平均計時法ではカウントパルス数を保守的に見積もる必要があることに比べ、可変パルス数計時法では各サンプリングごとに取りうる最大のカウントパルス数 $N_p$ を取ることができるためである。

### 6. 実験

本章では、可変パルス数計時法と、切削抵抗制御の実験結果を述べる。

**6.1 可変パルス数計時法実験結果** 計数法、計時法、平均計時法、可変パルス計時法によって検出される角速度を実験により比較する。

実験にはインクリメンタルエンコーダ(2000 Pulse/Rev)を使用する。計数法においてはエンコーダを四通倍して使用した。計数法と可変パルス数計時法のサンプリング時間は1ms, Base-clockの量子化時間は20nsとした。平均計時法におけるカウントパルス数 $N_p$ の値は、角速度更新周期がサンプリング周期1msを越えないよう保守的に小さく設定した。

実験は、図6に示す角速度制御を用いて一定角速度指令で角速度検出を行った。フィードバックする角速度情報には計数法によって得られた値を用いた。

図9(a), 図9(c)に各手法によって検出された角速度を示す。図9(b), 図9(d)に可変パルス数計時法におけるカウントパルス数 $N_p$ を示す。角速度指令値は $\omega^* = 15, 50$  rad/sとした。平均計時法におけるカウントパルス数はそれぞれ、 $N_p = 3, 12$ とした。

可変パルス数計時法では、カウントパルス数 $N_p$ がとりうる最大の値となっており、平均計時法における保守的に見積もったカウントパルス数より大きい値となっていることが確認された。

次に、計数法と可変パルス数計時法を適用し、切削抵抗のモニタリングを行った。切削抵抗推定値を図10に示す。切削条件として、主軸角速度指令値は $\omega^* = 20$  rad/s, 送り速度は $v_s = 2, 3$  mm/sで一定とした。計数法を適用した場合に比べ、可変パルス数計時法を適用することで推定値のノイズが低減されていることが確認された。

表2 切削条件

Table 2. Cutting conditions.

End mill	KOBELCO 4MC(2枚刃)
End mill $\phi$	12 mm
Work piece	Artificial timber MBO600
Free length of end mill	74 mm
Radial depth of cut	6 mm
Axial depth of cut	14 mm

**6.2 切削抵抗制御実験結果** 表2に示す切削条件で切削抵抗制御の実験を行った。角速度検出方法は可変パルス数計時法を適用した。 $k$ の推定に用いるサンプルデータは、主軸が1, 2回転分の区間のものを用いる( $n_r = 1, 2$ )。また、サンプルデータは主軸の位相 $2\pi/50$  radごとに取得する。切削抵抗の指令値は $F_{cut}^* = 0.3$  Nmとし、時刻0sに切削を開始する。

従来法の実験結果を図11に示す。従来法では、試験切削を行い、切削抵抗が指令値に追従する角速度を求め、その値を指令値として用いた。従来法では、切削抵抗の平均値と指令値に誤差が生じていることが確認された。この誤差は、ワークの硬度の不均一性や、ツールの状態の変化などの切削環境の変化に起因する。

提案法の実験結果を図12, 図13に示す。実験では安全のため主軸角速度指令値が15 rad/sを下回らないようリミッタをかけてある。切削中に $k$ の推定が行われ、切削抵抗の平均値が指令値に追従していることが確認できた。 $n_r$ を大きくすると、切削抵抗係数 $k$ の推定値の収束が遅くなることが確認された。 $n_r = 1$ において切削抵抗が指令値追従できていることを確認したため、本切削条件では、 $n_r = 1$ が適切な値である。

### 7. 結言

本稿では、主軸モータによるセンサレスの切削抵抗制御を提案した。実際のNC工作機械を用いて切削実験を行い、提案制御系により指令値に対して切削抵抗が追従可能であることを確認した。

また、外乱オブザーバの高精度化のための角速度検出法として、可変パルス数計時法を提案した。シミュレーションにより検出誤差の低減を確認し、実験によってその有効性を示した。

今後は、びびり振動問題を考慮した主軸角速度制御や、ステージ送り速度と主軸角速度の協調制御を行う。

### 8. 謝辞

本研究では、株式会社森精機製作所の石井眞二様、山本浩司様、寺田祐貴様から多くのご支援を頂いた。記して謝意を表する。

### 参考文献

(1) E. Shamoto, "Mechanism and Suppression of Chatter Vibrations in Cutting", Electric Furnace Steel, Vol. 82, No. 2, pp. 143-155(2011)(in Japanese)  
 (2) S. Yoshimitu, S. Satonaka, Y. Kawano, Z. Dunwen and S. Yamashita, "Two-dimensional Monitoring System for Tool Behavior in End Milling with Small Diameter Tool", Journal of JSPE, Vol. 77, No. 9, pp. 889-894(2011)(in Japanese)  
 (3) S. Ibaraki, M. Sakahiro, H. Saraie, A. Matsubara and Y.

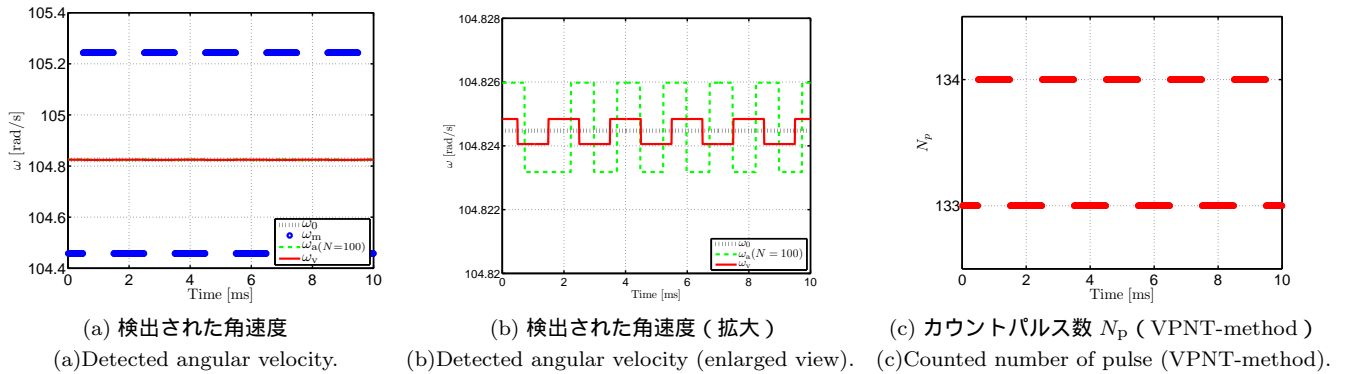


図 8 角速度検出シミュレーション結果

Fig. 8. Simulation results of angular velocity detection.

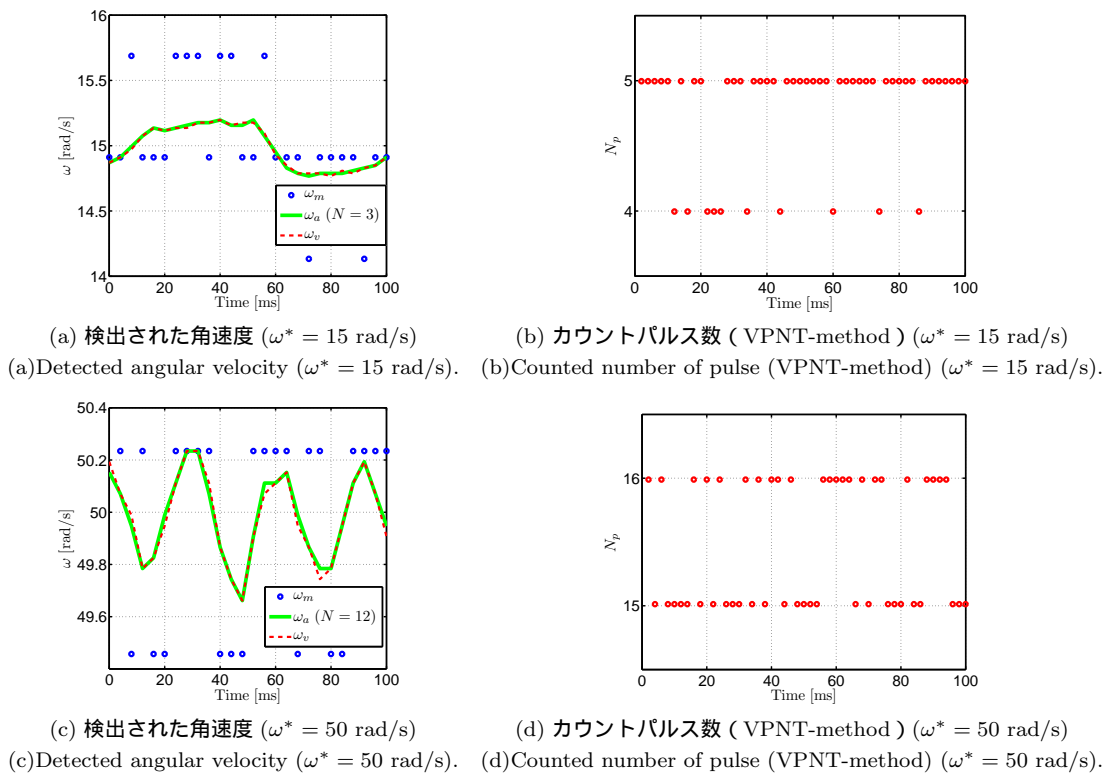
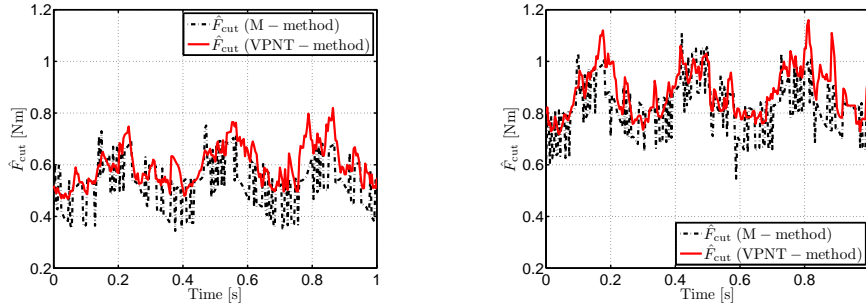


図 9 角速度計測結果

Fig. 9. Experiment results of angular velocity detection.

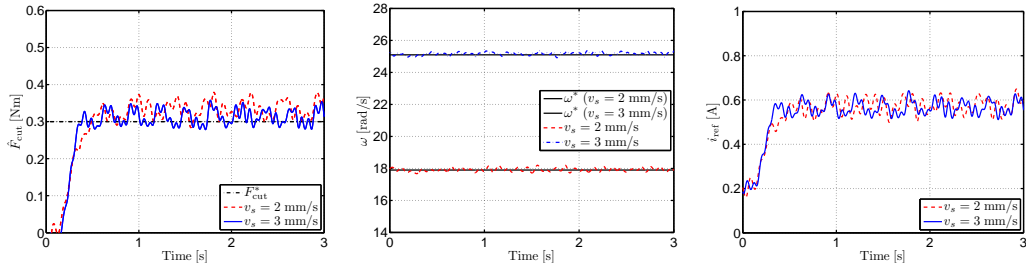
- Kakino, “On the Monitoring of Cutting Forces in End Milling Processes: An Estimation Method by Geometrically Combining Force Vectors of Servo Motors and a Spindle Motor”, Journal of JSPE, Vol. 70, No. 8, pp. 1091–1095(2004)(in Japanese)
- ( 4 ) S. Ibaraki, T. Yasuda, A. Matsubara, M. Murozumi and Y. Kakino, “On the Monitoring of Cutting Forces in End Milling Processes (2nd Report): An Application to the Identification of a Prediction Model of Cutting Forces within Canned Cycles and Feedrate Control”, Journal of JSPE, Vol. 72, No. 2, pp. 224–228(2006)(in Japanese)
- ( 5 ) S. Nishida, Y. Kakino, K. Fujimoto and H. Nakagawa, “A Study on End-milling of die/mold with Constant Cutting Force by Feed Rate and Spindle Speed Control”, Journal of JSPE, Vol. 73, No. 3, pp. 367–371(2007)(in Japanese)
- ( 6 ) T. Shimizu, H. Fujimoto, and Y. Hori, “Force sensorless control of cutting force for NC machine tools based on the response surface method”, IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC–11–053, pp. 23–28(2011)(in Japanese)
- ( 7 ) T. Tsuji, T. Hashimoto, H. Kobayashi, M. Mizuochi and K. Ohnishi, “A wide-range velocity measurement method for motion control”, in IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, pp. 510–519(2009)
- ( 8 ) Y. Sudou, Y. Kakinuma, K. Ohnishi and T. Aoyama, “Development of chatter vibration detection utilizing disturbance observer (1st report) Precise sensor-less process monitoring utilizing average T method”, Journal of JSPE, Vol. 77, No. 7, pp. 707–712(2011)(in Japanese)



(a) 切削抵抗推定値 ( $v_s = 2$  mm/s) (b) 切削抵抗推定値 ( $v_s = 3$  mm/s)  
 (a) Estimated cutting resistance ( $v_s = 2$  mm/s). (b) Estimated cutting resistance ( $v_s = 3$  mm/s).

図 10 外乱オブザーバによる切削抵抗推定結果

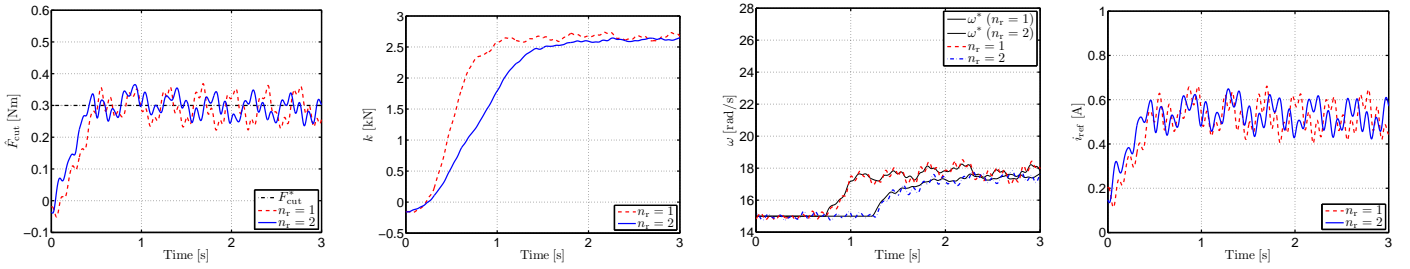
Fig. 10. Results of estimated cutting resistance by disturbance observer.



(a) 切削抵抗  $\hat{F}_{cut}$  (a) Cutting resistance  $\hat{F}_{cut}$ . (b) 主軸角速度  $\omega$  (b) Angular velocity of spindle  $\omega$ . (c) 電流指令  $i_{ref}$  (c) Current command  $i_{ref}$ .

図 11 実験結果 (従来法)

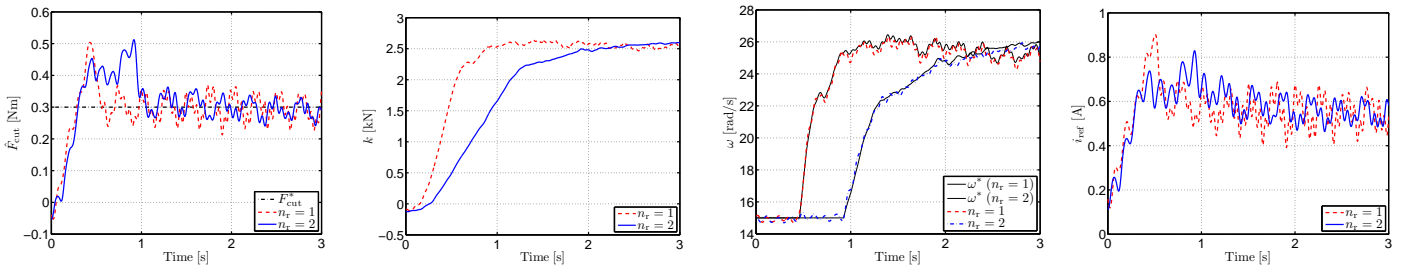
Fig. 11. Experimental results (conventional method).



(a) 切削抵抗  $\hat{F}_{cut}$  (a) Cutting resistance  $\hat{F}_{cut}$ . (b) 切削抵抗係数  $k$  (b) Cutting resistance coefficient  $k$ . (c) 主軸角速度  $\omega$  (c) Angular velocity of spindle  $\omega$ . (d) 電流指令  $i_{ref}$  (d) Current command  $i_{ref}$ .

図 12 実験結果 (提案法  $v_s = 2$  mm/s)

Fig. 12. Experimental results (proposed method  $v_s = 2$  mm/s).



(a) 切削抵抗  $\hat{F}_{cut}$  (a) Cutting resistance  $\hat{F}_{cut}$ . (b) 切削抵抗係数  $k$  (b) Cutting resistance coefficient  $k$ . (c) 主軸角速度  $\omega$  (c) Angular velocity of spindle  $\omega$ . (d) 電流指令  $i_{ref}$  (d) Current command  $i_{ref}$ .

図 13 実験結果 (提案法  $v_s = 3$  mm/s)

Fig. 13. Experimental results (proposed method  $v_s = 3$  mm/s).