

# 外乱オブザーバを応用したセンサレス工具接触検知技術の高精度化

慶應義塾大学 ○永仮 智子 ◎柿沼 康弘

## 要旨

超精密加工において、工具刃先位置の正確な把握が加工精度の向上に繋がる。しかし従来の工具刃先位置検知技術では、作業者がセンサ等を用いて検知するため、作業者の技術力により精度と作業時間にばらつきが生じる。そこで外乱オブザーバを用いたセンサレス工具接触検知技術を提案し、極小径工具におけるサブマイクロオーダの工具接触検知技術の開発を目指す。本研究では、雑音除去した推定反力の時間変化を利用し、確率論に基づく閾値設定を行うことで検知精度の向上を図った。

## 1. 緒論

電子機器・光学機器の高性能化・小型化の要求に伴い、超精密加工に求められる加工精度は年々向上している。高い加工精度の実現には、要求相応の位置決め精度・運動精度が必要不可欠である。一方では段取り工程において各要素の座標位置を極めて正確に決定する必要があり、セッティングが加工精度に及ぼす影響は大きい。中でも極小径工具と被削材間の距離を把握するための工具刃先位置検知は加工精度に直結するばかりでなく、工具破損の回避にもつながる。工具接触検知にかかる作業時間は熟練度に依存するため、高精度かつユーザビリティの高い工具刃先自動検知技術の開発が求められている。

先行研究として、外乱オブザーバを応用したセンサレス工具接触検知技術を提案することで、高いユーザビリティを実現した。しかし加工条件によって検知精度にばらつきが生じるという問題がある。本研究ではこの問題を解決することで、加工条件に関わらず高精度な工具接触検知技術の開発を行う。

## 2. 外乱オブザーバを用いた力推定技術

工具接触時に発生する反力を推定する反力推定オブザーバを図1に示す。

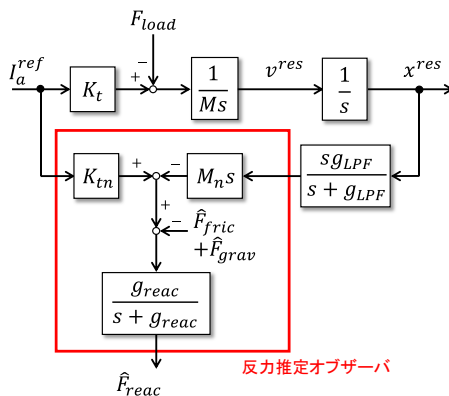


図 1. 反力推定オブザーバ

図1における $F_{load}$ はステージにかかる負荷、 $F_{fric}$ は摩擦力、 $F_{grav}$ は重力を示す。反力推定オブザーバにより反力 $F_{reac}$ は式1から算出できる。

$$\hat{F}_{reac} = \frac{g_{reac}}{s + g_{reac}} (K_{tn} I_a^{ref} - M_n \dot{x}^{res} - \hat{F}_{fric} - \hat{F}_{grav}) \quad (1)$$

式1において、 $g_{reac}$ は反力推定オブザーバのカットオフ周波数、記号 $\hat{\cdot}$ は推定値、 $_n$ は公称値を示す。ここで、反力推定オブザーバによる反力推定では、質量 $M$ やモータの推力定数 $K_t$ のパラメータ変動に比べ、摩擦力、重力が推定精度に与える影響が大きいため、摩擦力と重力には高い精度が求められる。

本研究では、この反力推定オブザーバを、フィードフォワードコントローラと外乱オブザーバを導入した位置制御系に組み込

んだ制御系を用いる(図2)。この制御系は、外乱抑圧特性と目標値追従性に優れロバストで高精度な位置制御を可能とする。

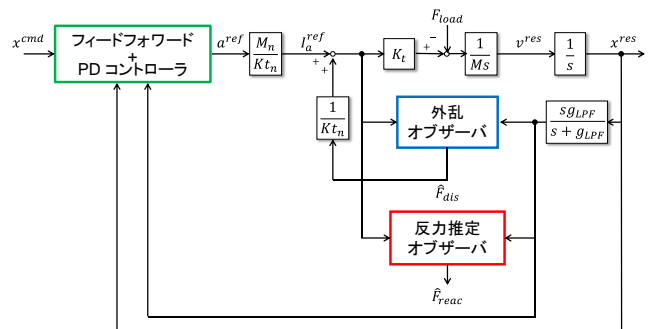


図 2. 反力推定オブザーバを組み込んだ位置制御系

## 3. センサレス工具接触検知技術の高精度化

先行研究では、反力推定オブザーバにより推定した工具接触時の反力を監視することで工具接触を検知した<sup>[1]</sup>。この手法では被削材に硬脆材であるガラスを用いた場合の検知精度は高いが、延性材であるアルミ合金を用いた場合の検知精度は低いという問題があった。そこで本研究では、検知精度の低いアルミ合金を使用した場合でも、高い検知精度を実現できる手法の開発を目指した。

ガラスとアルミ合金に対して、ある閾値を設定し接触検知を行った場合の推定反力の挙動を図3に示す。同一の送り速度の条件下で工具が被削材に接触した場合、被削材によって接触時に生じる力の時間変化が異なるため、閾値に達するまでの時間差が生じる。つまり、アルミ合金の場合、検知精度が低下することがわかる。

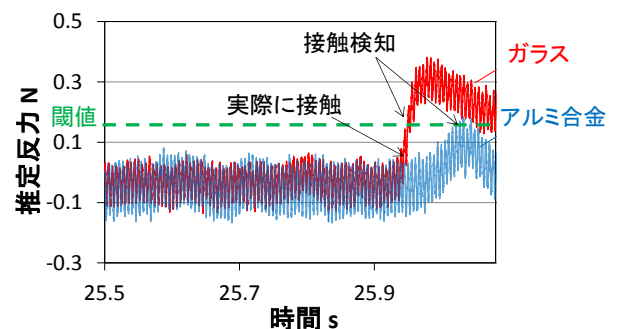


図 3. 異なる被削材の接触時の推定反力

そこで本研究ではこの問題を解決するために、単に力を監視するのではなく、最小二乗法によって力を線形近似することにより、力の時間変化を求め監視することで工具接触を検知する手法を提案する。最も古いデータと新しいデータを入れ替え、力の時間

変化の計算を繰り返し行うことで、リアルタイムの力の時間変化を算出した。

さらに検知精度を向上させるため、確率論に基づく信頼性の高い閾値設定を行った。誤検知が起きる原因として、量子化誤差による高周波ノイズ、磁極などの低周波ノイズ、主軸回転数に応じたノイズがある。このうち低周波ノイズは、力の時間変化を計算する際に、推定した現在の力情報から過去の力情報の移動平均値を差し引いたものを使用することで除去でき、主軸回転数に応じたノイズはノッチフィルタ処理を行うことで除去できる。従って、量子化誤差によって生じた高周波ノイズを超えないような閾値設定を行えば良いことになる。ノイズの平均値を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とし閾値を $\mu + \alpha\sigma$  ( $\alpha$ : 定数) と設定する。160000 サンプル中でこの閾値を超えるサンプルがひとつも観測されず、かつ最も低い閾値を適切な閾値とした。最も低い閾値を採用する理由としては、閾値を高く設定しすぎると誤検知は起こらないが、検知に遅れが生じ、検知精度が劣化してしまうためである。本研究では、 $\mu + 4\sigma$  が採用され、さらなるロバスト性を実現させるため、サンプルが3回連続で閾値を超えた場合を検知と判断することとした。これにより誤検知の確率は  $3.19 \times 10^{-14}$  になる。

#### 4. 超精密3軸立形加工機

反力推定オブザーバを実装した超精密3軸立形加工機を図4に示す。駆動部にリニアモータおよびエアガイドを採用することで非接触駆動となり摩擦力を補償している。さらにZステージには重力補償としてエアバランサを採用している。このように力推定時に問題となる摩擦力和重力を機械的に補償しているため、高精度な反力推定を可能とする。本研究で用いた制御系のパラメータを表1に示す。このパラメータ使用時のZステージの位置決め精度は30nm、力推定精度は0.05Nを達成した(図5)。

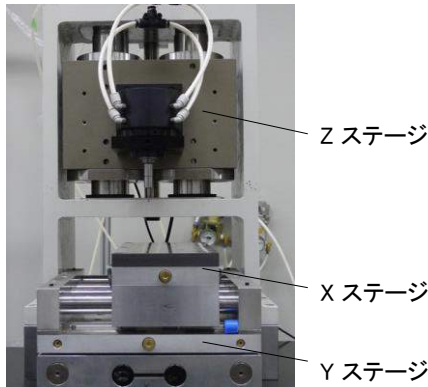
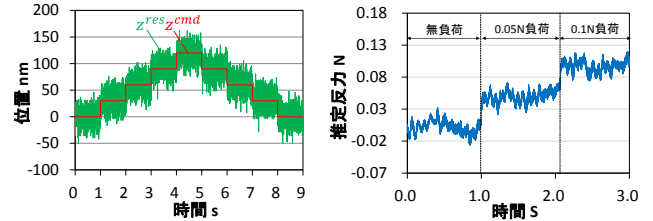


図 4. 超精密3軸立形加工機

表 1. 制御系のパラメータ

駆動部公称質量	$M_n$	19.81kg
公称推力定数	$K_{tn}$	29.0N/A
サンプリングタイム	$T_s$	125 $\mu$ s
位置比例制御ゲイン	$K_{vp}$	50
速度比例制御ゲイン	$K_{vp}$	200
擬似微分カットオフ周波数	$g_{LPF}$	600rad/s
外乱オブザーバカットオフ周波数	$g_{dis}$	600rad/s
反力推定オブザーバカットオフ周波数	$g_{reac}$	10rad/s



(a)位置決め精度 (b)力推定精度

図 5. Z ステージの性能

#### 5. 提案手法の実験による検証

提案手法の有効性をZ軸方向の接触検知実験により検証する。工具には工具径 $\phi 0.1$ mmのスクエアエンドミル、被削材にはアルミ合金を使用した。接触時の力と力の時間変化の様子を図6に示す。図6より、力を監視する先行研究に比べて力の時間変化を監視する本手法のほうが、素早く接触を検知できることが確かめられた。次に回転数を上げ接触検知実験を行い、接触時に発生した接触痕の様子を図7に示す。力の時間変化を監視することで小径工具、アルミ合金を使用した場合でもサブマイクロの検知精度を達成した。これは回転数を高くすることで、接触時の衝撃力が大きくなり、力の時間変化が増大したためであると考えられる。

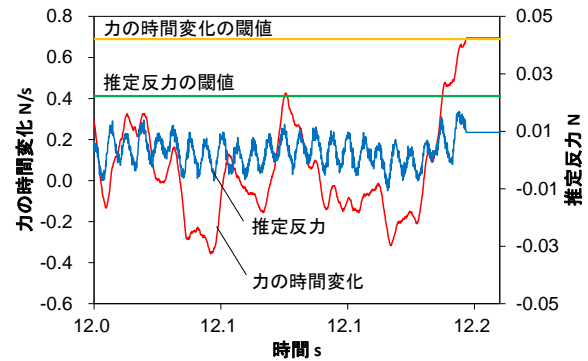


図 6. 接触時の力と力の時間変化の様子

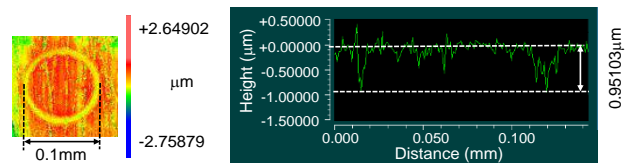


図 7. 接触痕の様子

#### 6. 結論

外乱オブザーバを利用した工具接触検知において、力の時間変化に基づく検知手法ならびに確率論に基づく閾値設定手法を提案した。小径工具とアルミ合金を用いて接触検知実験を行った結果、サブマイクロオーダーの検知精度を達成した。

#### 7. 参考文献

[1] Y. Kakinuma, T. Kamigochi: "External Sensor-less Tool Contact Detection by Cutting Force Observer", 1<sup>st</sup> CIRP Global Web Conference on Interdisciplinary Research in Production Engineering, Vol.2, (2012), pp44 - 48