

18 微細切削加工技術構築支援システム

安東隆志

1 目的

携帯型情報家電製品に必要な微細金型製作には微細な切削加工が必要であり、微細切削加工に使用する微小な切削工具の折損による切削不良が問題となりつつある。しかし、微細領域での切削工具に作用する力・トルクの計測技術や切削加工条件が整備されていないのが現状である。そこで、切削中の微小な力・トルク計測技術と切削加工条件を整備するためのシステムを構築するために、平成 21～22 年度〔独〕科学技術振興機構地域ニーズ即応型において、当センターと(有)大阪製作所と共同で取り組んだ研究開発について報告する。

2 事業概要

2.1 研究開発概要

当該研究開発では図 1 に示す磁気浮上ステージを製作し、これを活用して既存のトルク計測機器では計測不可能な微小トルクの計測制御技術と微小トルク自動制御技術の研究に取り組んだ。以下では、当該研究開発で取り組んだ内容について報告する。

2.2 磁気浮上ステージの製作

磁気浮上ステージは電磁力によってステージを浮上させることにより、完全非接触でステージの位置・姿勢を制御する装置である。電磁石に流れる電流をフィードバック制御することにより、ステージがバネで弾性支持されているかのように挙動する。したがって、バネ定数が数値として得られるならば位置・姿勢と同時にステージに作用する力を計測することができる。しかし、電磁力はバネのような線形特性を示さないため、当該研究ではモデル規範適応制御による線形化を適用した。また、電圧フィードバック方式の電力増幅器では電磁石のコイルのインダクタンスによって電磁石駆動電流に遅延が生じ、ステージに振動が生じるが電流フィードバック増幅器を採用することにより振動発生の問題を解決した。

2.3 モデル規範適応制御による非線形系の線形化

一般的に磁気浮上系は電磁石の非線形性、電磁石特性のばらつきによる外乱力が生じるので精密な位置決めや力の計測が困難である。そこで、モデル規範適応制御を利用して非線形な磁気浮上システムを規範となる線形モデルに一致させる手法について研究した。

まず、x 方向と y 方向の $\pm 1 [\mu\text{m}]$ のステップ入力に対して適応制御を実施する前後を比較した結果、適応制御実施前のステップ応答は、x 方向には $-9 [\mu\text{m}]$ 、y 方



図 1 磁気浮上システム概観

向には $-3.5 [\mu\text{m}]$ のずれがあった。しかし、適応制御実施後では x 方向と y 方向のステップ変位は $\pm 1 [\mu\text{m}]$ となり、目標軌道とステージの運動軌道が一致し、適応制御による線形化の効果を確認できた。その結果、ステージに作用する外乱力を排除でき、精密な位置制御と力計測が可能となった。

2.4 位置制御分解能

当該研究開発では $0.2 [\mu\text{m}]$ の位置制御分解能を目標としており、特に微小切削工具の回転軸まわりのマイクロレベルのトルク計測に必要な x 方向と y 方向の位置制御には厳しい分解能が要求される。そこで、x 方向と y 方向の位置のばらつきを計測して位置制御分解能を検証した。その結果、x 方向と y 方向の両者において振動振幅は、ほぼ $\pm 0.2 [\mu\text{m}]$ になることを確認した。

2.5 逐次最小二乗法による力学パラメータ推定

微小切削工具に発生する力・トルクを計測するためには磁気浮上ステージに作用する弾性力を正確に計算しなければならない。そのためには、磁力が発生する粘弾性定数を正確に推定する必要がある。当該研究開発では、まず、逐次最小二乗法により作成された離散時間状態方程式モデルによるオブザーバを構成し、オブザーバによりステージの速度を推定した。オブザーバで推定した速度はステージの位置を数値微分して得られる速度よりもノイズが低減されているので、この速度を数値微分することによりステージの加速度が得られる。運動法則により、加速度、速度、位置は線形関係にあるので、これらに逐次最小二乗法を適用することにより、速度と位置に

かかる係数行列として粘弾性定数を推定した。その結果、加速度により求まる慣性力と、速度と位置により求まる粘弾性力は一致し、磁気浮上ステージに発生する粘弾性力を検証した。

2.6 力・トルクの計測分解能の検証

当該研究では直径 10 ~ 100 [μm] の切削工具に作用する力・トルクの計測を目標としているので、力・トルクの計測分解能の検証を行った。まず、切削工具の回転軸となる z 軸まわりのトルクと z 軸方向力の計測分解能を確認した。無負荷の状態でのトルクと力の計測値のばらつきが計測分解能を決めるので、無負荷の状態での z 軸まわりのトルクと z 方向の力のばらつきを調べた。その結果、z 軸まわりのモーメントは 1.5 [μNm] 以下、z 軸方向の力は ±10 [mN] 以下となった。

2.7 微小な力・トルクの自動制御

磁気浮上システムを用いた微細穴加工実験装置を製作し、ドリルに発生する力を計測するだけでなく、ドリルと被削材の相対的な位置を変化させることによりドリルに発生する微小な力を制御できることを検証した。原理的には、ドリルを被削材に近づければ力は増加し、逆に被削材から遠ざければ力は減少する。さらに、ドリルと被削材の相対位置と速度を適切に保てば両者に発生する定常的な力を一定に保つことができる。そこで、ドリルと被削材の相対位置の増分を制御することによりドリルに発生する力を制御する手法について検討した。微小トルクを制御するためには、ドリルに発生する力を制御しなければならない。ドリルに発生する力は、ドリルと被削材との相対位置を適正に変化させることにより制御することができる。当該研究開発では、図 2 に示すように、アルミニウムの板材に直径 50 [μm] のドリル加工で発生する力を -100 [mN] (-10 グラム) に制御することに成功した。

2.8 インターフェイスプログラムの構築

微細切削加工技術構築支援システムは現場作業者が使用することを目標としているので、一般のアプリケーションプログラムと同様な使いやすいシステムでなければならない。特に視覚的な表示は重要である。そこで、

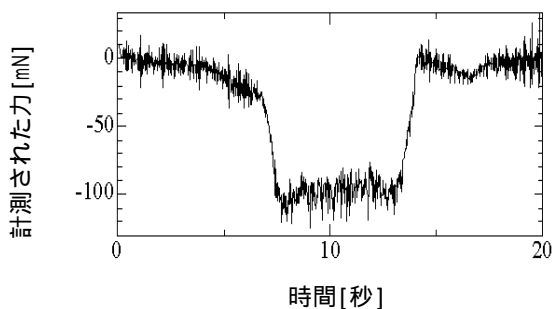


図 2 ドリル回転軸方向力の力制御

通常のパーソナルコンピュータで使用できるインターフェイスプログラムを構築した。操作用インターフェイスプログラムには、磁気浮上ステージの設定位置(目標位置)、浮上位置、力とトルクが数値で表示される。また、力とトルクをグラフ表示することにより、加工中の力とトルクの変化や挙動を視覚的・直感的に知ることができる。計測した力とトルクをデジタルデータとしてハードディスクなどの記憶媒体に保存することができるので、加工条件と計測された力・トルクを組み合わせることで保存することにより、データベースへの登録に利便性を有し、データの活用にも効果を発揮する。

2.9 微小ドリルによる微細穴加工

当該研究開発では、直径 10 ~ 100 [μm] の微小ドリルを使用して、アルミ、鋼、ステンレスなどの被削材に対して微細穴加工実験を行い、ドリルに発生する力・トルクを計測した。また、科学技術振興機構から提供されたデジタルハイスピードカメラで加工部分を撮影し、視覚的側面からも微細切削加工の現象解明にも取り組んだ。

延性材料である金属だけでなく、耐食性を有する石英ガラスの微細穴加工を行った。ガラスは脆性材料であり、一般的には切削加工に適さない。しかし、ドリルに発生する力・トルクを制御することにより切削が可能であるが確認された。

2.10 微細切削加工技術構築支援システムの検証

微細切削加工技術構築支援システムを現場で使用するために、工作機械に設置して現場作業者が使用する場合に発生する問題を抽出し、改良・改善を行った。特に、作業者の利用のし易さを向上させることが重要であるので、使用者の意見を蓄積し、システムの仕様やデータの表示・保存について改良・改善を行い、どこまで微細な穴加工が実現できるか検討した。

磁気浮上システムを有限会社大阪製作所の工作機械に設置し、動作検証を行った。当初、工作機械の回転主軸を回転させることによって生じる振動が工作機械テーブルに伝達して磁気浮上ステージに影響を与えるのではないかと懸念したが、工作機械上の振動は極めて小さく、問題ないことを確認した。

3 結 論

当該事業で製作した微細切削加工技術構築支援システムでは、位置制御分解、力計測分解能、トルク計測分解能に対して十分な性能が得られることを確認した。また、微細切削加工技術構築支援システムを活用して、微細穴加工技術にも取り組み、当該システムの有効性を確認した。

(文責 安東隆志)

(校閲 福地雄介)