

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560121

研究課題名（和文） マイクロ・ナノ加工機の地動・直動外乱振動抑制デザイン

研究課題名（英文） Design method to control ground vibration and direct vibrations for micro-nano machine tools

研究代表者

松原 厚（MATSUBARA ATSUSHI）

京都大学大学院工学研究科・教授

研究者番号：80243054

研究成果の概要（和文）：

マイクロ・ナノ加工機においては、サブミクロンオーダーの精度の高速な工具運動が必要となるため、工具端の微小振動が問題となる。問題となる振動としては、設置床からの振動である地動外乱振動と機械内部の送り運動に伴い発生する外乱による直動振動がある。本研究では、床-除振機構-加工機の力学モデルの構築を行い、このモデルによってサーボを含む工具-工作物の相対振動の解析と加工機設計や制御アルゴリズムの考案を行った。

研究成果の概要（英文）：

Accurate tool motion is required for the micro-nano cutting and grinding machines, and micro-vibration is one of very important issues. Vibrations are categorized in the in-direct disturbance from the ground and direct disturbance from the machine actuators. In this research, the dynamic model of the floor, anti-vibration devices, and the machine is developed. By using this model, the relative vibration between the tool and workpiece is analyzed and anti-vibration design/control method is proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・機械工学， 細目：生産工学・加工学

キーワード：工作機械， 振動制御， マイクロ・ナノ加工， サーボ系 ， 除振・制振

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノ加工機においては、サブミクロンオーダーの精度の高速な工具運動が必要となるため、工具端の微小振動が問題となる。問題となる振動としては、設置床からの振動である地動外乱と機械内部の送り運動

に伴い発生する慣性力や切削力により機械自身が加振されて発生する直動振動がある。これらの振動を抑制する技術は、能動制振と受動制振に分かれ、特に能動制振技術が半導体製造分野で研究されてきたが、切削加工機のようにある程度の加工負荷がかかり、かつ

加減速動作が多様な機械では、かえって運動精度を悪化させるという問題がある。

工具-工作物間のダイナミクスを決めるのは床~加工機~サーボ-送り機構~工具~加工プロセスの特性であり、除振機能と制振機能はトレードオフの関係がある。システム全体は変位と力を介在した力学チェーンで結ばれて、かなり複雑になっているため、個々の最適化ではトータルでの制振性能が向上しない。本研究では、これらの力学チェーンをモデル化し、機械構造の持つ慣性・剛性・減衰特性を設計しながら除振・制振・サーボ系を融合し、工具端での運動精度を向上するための設計制御方法を明らかにする。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、床-除振機構-加工機の力学モデルの構築を行い、このモデルによってサーボを含む工具-工作物の相対振動のメカニズムの解析と振動抑制のための設計法や制御アルゴリズムの考案を行うことである。

## 3. 研究の方法

本研究では、①マルチボディモデルとサーボモデルを組み合わせ、床-除振機構-加工機の動的なモデルを構築し、②シミュレーションによって振動特性を解析し、③設計・制御のための力学モデルを導出し、④機械構造系と制御系の設計指針を得るという方法を用いる。

### (1) 除振機構を有する加工機の力学特性と最適設計

方法論の検証のために門型3軸の高精度加工機を製作し除振台上に設置した。図1は解析用のマルチボディモデルである。本モデルにより、図2、3に示すように、地動外乱と直動外乱による工具端への影響が正確に予想できるようになった。

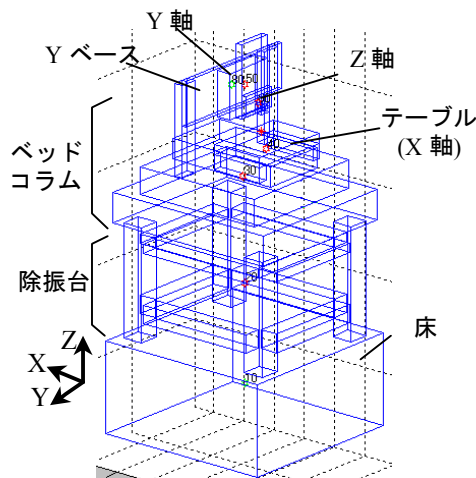


図1 除振台上に設置した門型加工機のマルチボディモデル

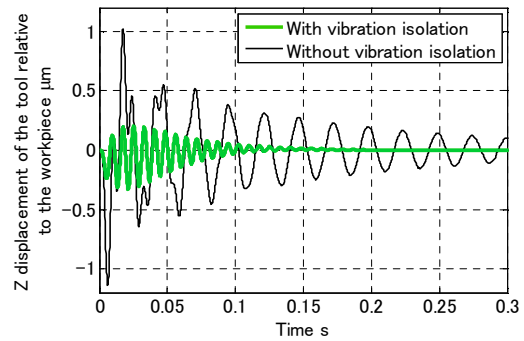


図2 地動外乱の影響（工具-工作物間変位）

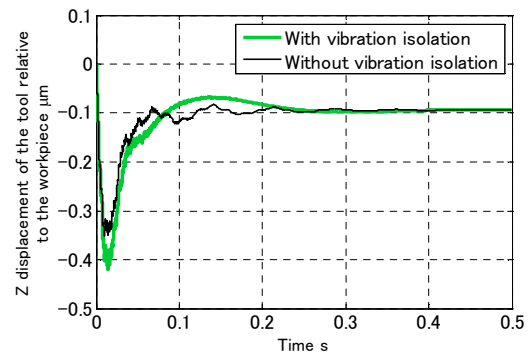


図3 直動外乱の影響（工具-工作物間変位）

解析用マルチボディモデルを用いて、設計指針を得るために低次元モデル（3 慣性モデルと2 慣性モデル）を作成し、同様に直動外乱から工具-工作物間相対変位の応答が計算できることを検証した。

図4は、このモデルから得られた直動外乱から工具-工作物間相対変位への伝達特性を表したブロック線図である。2 慣性モデルの1 次モードの固有振動数を  $\Omega_1$ 、加工機の固有振動数を  $\Omega_b$ 、ベース側等価質量を  $m_b$ 、工具側等価質量を  $m_a$  としたときに直動外乱  $f_a$  による1 次モードの振動振幅は  $1/(m_a + m_b)$ 、 $(\Omega_1/\Omega_b)^2$  に比例することがわかった。また、2 次モードの振幅については工具-工作物間相対変位は  $1/m_a$  に比例する。以上により構造設計変更による高精度化の指針に従って、門型加工機のコラム剛性を変更した。この構造変更を行った場合、振動振幅を図5に示すようにサブミクロンレベルまで低減できた。

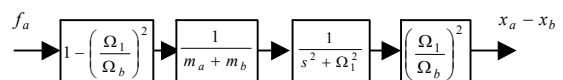


図4 直動外乱から工具-工作物変位までの伝達特性

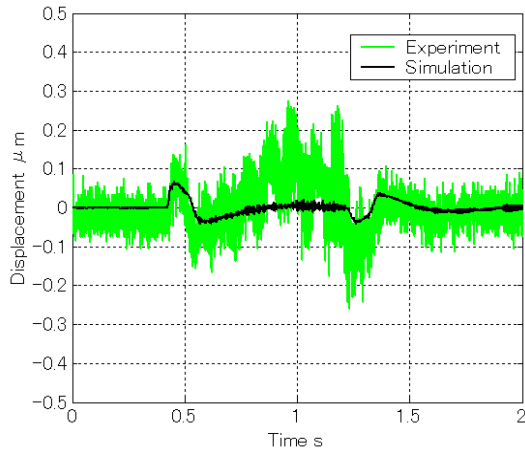


図5 伝達特性解析による設計変更の効果 (コラム剛性を向上)

(2) 床に設置した加工機の力学特性と振動抑制制御

①設置剛性の解析

重量が大きい工作機械は除振台上に載せられない。したがって、設置床の特性を考慮した設計を行う必要がある。特に床と加工機の設置剛性を知ることが問題となるためこれを実験と解析で求める方法を考案した。この方法では重量に応じて真実接触面積が変化し、剛性も変化するという仮定をおき(図6)、支持点数による実際の縦型マシニングセンタの垂直振動の固有振動数の変化が予想できることを検証した。

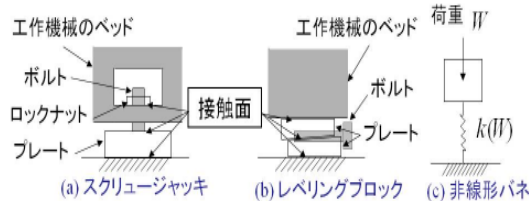


図6 設置剛性のモデル

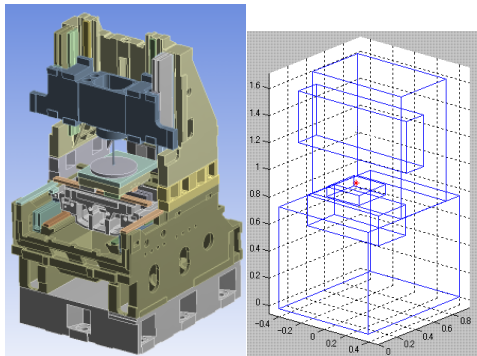


図7 実験に使用した縦型マシニングセンタとマルチボディモデル

②マルチボディモデルに

設置剛性を含めた加工機全体を図7に示すマルチボディモデルでモデル化した。このモデルにより、高速輪郭円運動時に円弧軌跡誤差が発生する原因が、設置剛性を含む加工機の動的な変形によるものであることがわかった(図8)。

③振動制御

得られた解析モデルを低次元化して、以下の制御系の設計を行った。

a) フィードバック制御系のハイゲイン化を行う。

b) 図9に示す規範モデルを用いたフィードバック制御系によって工具端の応答性を確保しつつ、振動を抑制する。

規範モデルはロッキング振動モードを励起しないように設定し、シミュレーションで運動軌跡がサブミクロンになることを確認した(図10)。この制御系を実機のNC制御系に実装して、実機でテストを行った結果、円弧誤差、コーナ誤差をサブミクロンレベルに抑制できることを検証した。

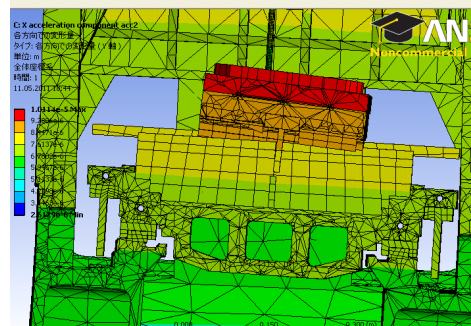


図8 ロッキング連成による工具-テーブル間の動的な変位

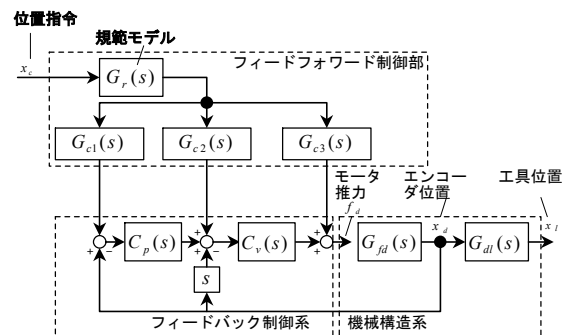


図9 規範モデルを用いた制御系

4. 研究成果

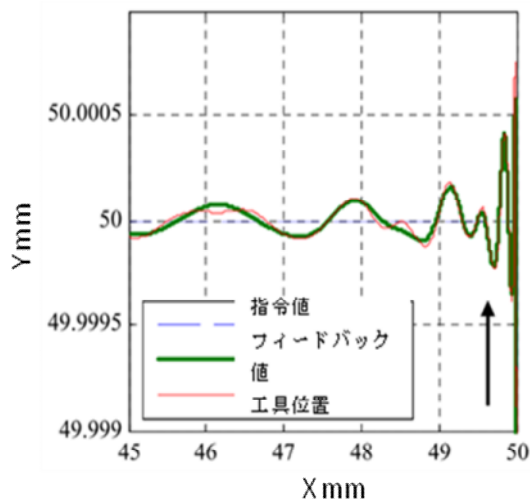
以下に研究成果をまとめる。

(1) 加工機の工具端に発生する振動について、サーボ系に起因する振動については従来多くの研究があった。本研究では設置系

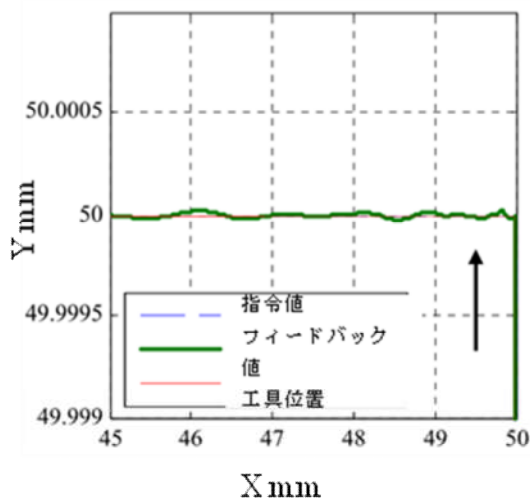
を含む加工機全体の振動（特にロッキング振動）が、工具端運動誤差に大きな影響を与えること、またその原因について解析した。特に除振装置を持つ加工機、床設置した加工機の両方の現象を明らかにした。

(2) パッシブ型の除振装置を持つ加工機については、加工機の剛性が地動外乱と直動外乱抑制のトレードオフに影響していることをモデルで明らかにした。またこのモデルから外乱の伝達特性を計算し、外乱抑制の設計が可能であることを示した。

(3) 床に設置した加工機については、設置剛性の要因が設置面積に影響する点を明らかにした。マルチボディシミュレーションにより、高速輪郭運動時の誤差が設置系を含めた加工機のダイナミクスに起因することを示した。低次元化モデルをベースに、規範モデルを用いたフィードフォワード制御を設計し、軌跡振動をサブミクロンレベルにできることを示した。



(b) 規範モデル無し



(a) 規範モデル有り

図10 規範モデルを用いた振動制御（コーナでの軌跡誤差）

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

① D. Kono, A. Matsubara, K. Nagaoka, K. Yamazaki: Analysis method for investigating the influence of mechanical components on dynamic mechanical error of machine tools, Precision Engineering, Vol.36, pp.477-484, 2012.

② 河野大輔, 松原 厚, 岡田琢巳, 廣岡孝彦; 安田安志, 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 77, no. 775, pp. 1078-1085, 2011.

〔学会発表〕（計5件）

① 河野大輔, 稲垣 孝洋, 松原 厚, 山路伊和夫: 工作機械の支持剛性の推定に関する研究, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会, 首都大学東京, pp. 351-352, 2012/3/16

② 河野大輔, 松原 厚, 剛体マルチボディモデルを用いた高精密加工機の振動評価, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会, 金沢, 2011/9/20.

③ 稲垣孝洋, 松原厚, 河野大輔, 接触剛性が工作機械の支持剛性を与える影響に関する研究, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会, 金沢, 2011/9/20.

④ 稲垣 孝洋, 松原 厚, 河野大輔: 工作機械のロッキング振動の解析, 精密工学会 2011年度関西地方定期学術講演会, pp. 76-77, 2011/6/30.

⑤ 廣岡 孝彦, 松原 厚, 河野 大輔, 安田 正志, 岡田 琢巳: パッシブ除振台上に設置した高精密加工機の振動解析, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会, 神戸大学, pp.79-80, 2009/9/12.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 厚 (MATSUBARA ATSUSHI)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80243054

(2) 連携研究者

茨木 創一 (IBARAKI SOICHI)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 80335190

(3) 連携研究者

河野 大輔 (KONO DAISUKE)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 80576504