

平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		しんのひでのり		所属研究機関・部局・職		東京工業大学・精密工学研究所・教授	
研究代表者氏名		新野 秀憲					
研究課題名	和文	ナノデバイス製造用超精密・微細加工システムの開発					
	英文	Development of Ultraprecision & Ultrafine Machining System for Fabricating Nano-Devices					
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		13,800	18,800	19,700	11,500	10,500	74,300
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
新野 秀憲	東京工業大学・精密工学研究所・教授	工作機械工学 超精密加工学 設計方法論	研究開発統括、システムの概念設計及び基本設計				
橋詰 等	東京工業大学・精密工学研究所・助教授	超精密加工学 超精密位置決め メカトロニクス	システムの構造設計及び詳細設計 加工制御、特にナノモーションコントロール				
吉岡 勇人	東京工業大学・精密工学研究所・助手	超精密加工学 加工計測 モニタリング	加工状態のモニタリング、ナノ加工実験、 マイクロファブリケーション技術				
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>本研究は、先端科学技術に必要な不可欠な各種機能素子の製造を加工対象として、nm オーダで3次元複雑形状の超精密加工を広範囲に、かつ高効率に実現可能な超精密・微細加工システムを開発することを目的とする。開発する加工システムは、総ての駆動軸（直線運動及び回転運動）に空気静圧軸受及びダイレクトドライブ機構を適用し、高剛性、かつ完全非接触による運動誤差最小化構造を有する。また、主要構成要素であるテーブル系は位置決め分解能 1nm 及び最高駆動速度 50m/min、回転主軸系は最高回転数 100,000rpm 及び回転精度 3nm を実現可能とする。そのため、以下に示すようなシステム要素やシステム機能について研究開発を行い、最終段階でそれらを組み合わせて加工システム全体を完成する。また、最終年度では、実際に各種材料のナノ加工を行うと共に、構築した加工システムの総合的な性能評価を行い、その妥当性と工業有用性を確認する。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 完全非接触 X-Y- ナノメートル位置決めテーブルシステムの開発 (2) 鉛直（Z軸）方向超精密・高速位置決めテーブルシステムの開発 (3) エアタービン駆動超精密・高速エアスピンドルの開発 (4) 供給空気の温度制御による加工システム構造体の熱変形抑制システムの開発 (5) アクティブ制振機能を具備した熱対称高剛性フレーム構造の構築 (6) 超精密・微細加工状態認識システムの開発 <p>以上のように本研究では、独自の概念に基づく新機能、新構造を実現した加工システムを実現する。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

ナノデバイス製造用超精密・微細加工システムを構築するため、平成 14 年度以降、当初研究計画・方法に沿って、これまでに以下の複数の要素研究を遂行し、いずれについても有用な研究成果を得ることができた。それらの研究成果の一部は、既に「研究成果の発表状況」に示すように国内外の学術誌に公表しており、今後も順次発表予定である。

(1) 完全非接触 X-Y-θ ナノメートル位置決めテーブルシステムの開発

研究代表者及び研究分担者が提案したハイブリッドリニア駆動機構の概念を展開し、図 1 のような完全非接触によるボイスコイルモータ駆動 X-Y-θ ナノメートル位置決めテーブルシステムを新たに開発した。また、テーブルの支持には、多孔質空気軸受を採用し、テーブル背面からの真空吸引を用いることにより格段の高剛性化を図っている。位置決め特性の評価を行った結果、図 2 のようにナノメートル位置決めが可能であり、図 3 のように同時多軸制御も可能であることを確認した。

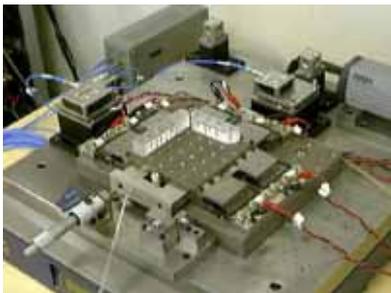


図 1 X-Y-θ ナノテーブルシステム

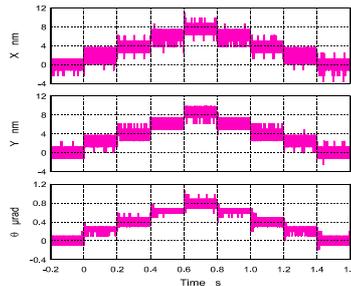


図 2 微小ステップ応答の一例

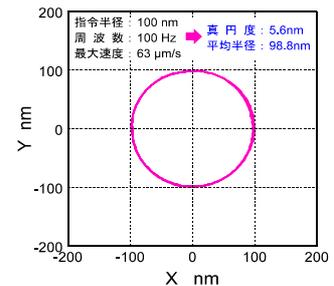


図 3 同時 2 軸制御による円運動の一例

(2) リニアモータ駆動空気静圧テーブルシステムへのセンサレスモニタリング機能の実現

ナノ加工領域では加工力が小さく、外乱に対象信号が埋もれ、加工点近傍にセンサを設置できない、といった理由から加工状態認識が困難であるとされている。そこで完全非接触リニアモータ駆動テーブルの特性を最大限に活用し、センサを用いることなく、図 4 の原理に基づきリニアモータの制御系により高精度、高分解能で加工力を推定し、加工状態認識を行うという全く新たな原理に基づく加工計測技術を確立した。図 5 には、加工力の推定結果を動力計と比較して示す。両者が良く一致していることから、十分な精度で加工力を推定できることがわかる。

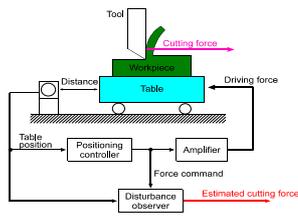


図 4 センサレスモニタリングの概念

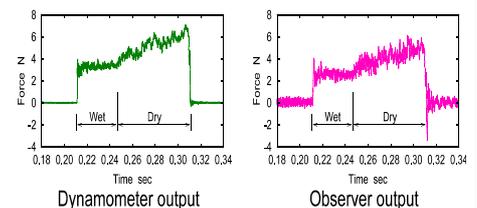


図 5 加工力の予測結果と動力計との比較

(3) インプロセスマイクロセンサによる加工状態モニタリングシステムの開発

加工点近傍の微小な加工状態変化に伴う信号を高精度、かつ高分解能で検出するため、温度の時間微分を検出する熱流束計測に基づくインプロセスマイクロセンサをダイヤモンド工具刃先にマイクロファブリケーション技術を用いて搭載することに成功した。また、開発した図 6 のインプロセスマイクロセンサにより、切り屑の排出状況、切り込み等の加工条件の検出、工具・工作物の接触検知など、様々な加工状態をインプロセスモニタリングできることを実証した。

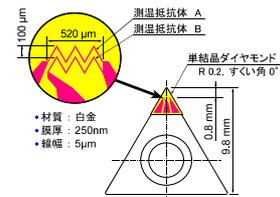


図 6 インプロセスマイクロセンサの構造

(4) 供給空気温度制御による熱変形抑制システムの開発

超精密・微細加工システムにおいては、内部熱源により構造体に生じる熱変形予測が重要な課題である。そこで、本研究では空気静圧スピンドルからの排出空気温度変動をフィードバックすることにより、供給空気温度制御を行い、加工中の主軸の軸方向の熱変形を抑制できる図 7 のような簡便かつ合理的な新たな構造体の熱変形抑制方法を開発した。実際に種々の加工条件を想定した高回転領域において高速スピンドルの熱膨張を図 8 のように最小に保持することに成功した。なお、提案した熱変形抑制方法は、主軸系以外の構造体の熱変形抑制にも応用可能である。

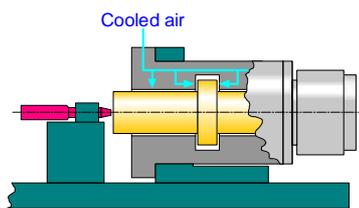


図 7 給気冷却による主軸の熱変形抑制の概念

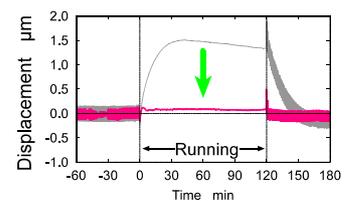


図 8 熱変形抑制の一例

特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

独創性や新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性

(1) 完全非接触 X-Y- ナノメートル位置決めテーブルシステム

直線運動を担う 1 自由度のテーブルを多段に重ね合わせた従来のテーブルシステムの構造を踏襲する限り、広い加工空間において高剛性、長ストローク、コンパクト、安定化構造を同時に満足するテーブルシステムを構築することはできない。本研究では、多重拘束、冗長構造による高剛性、低重心構造を特徴とする図 9 のような独自の構造概念に基づく多自由度ナノメートル位置決めテーブルシステムを開発した。これは直線・回転の 3 自由度を平面運動として実現する低重心の理想的なテーブル構造を有し、ナノ駆動を必要とする様々な用途に対応可能である。

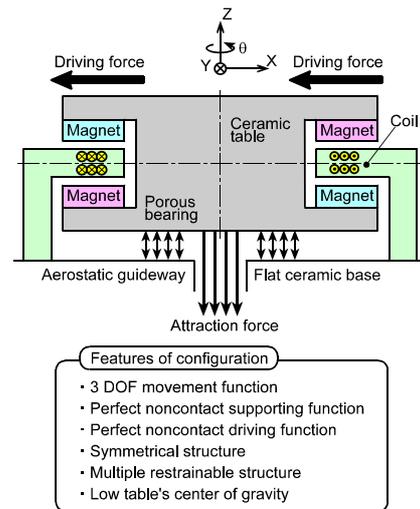


図 9 X-Y- ナノメートル位置決めテーブルシステム概念

(2) センサレスモニタリング機能

ナノメートルスケールの超微細加工においては、加工システム自体が高度な加工状態認識機能を具備することが必要不可欠であるが、高精度・高感度・高安定性・コンパクト性を有するナノ加工に対応可能な効果的な実用センサは存在しない。本研究ではリニアモータの特性を活用して特定のセンサなしに、加工力を推定する図 4 に示す新たな計測原理に基づくセンサレスモニタリング方法を提案した。提案したシステム機能は、テーブルシステムのコントローラに組み込まれる。次世代生産環境においては加工システムが「システム健全性モニタリング」といった新たな機能を具備することが求められるが、そのような観点からも構造体に組み込み可能な有用な概念である。

(3) インプロセスマイクロセンサによる加工状態モニタリングシステム

熱計測は、高精度、高応答の加工計測には不向きとされていたが、センサのマイクロ化による熱容量の最小化、温度の時間微分による熱挙動の迅速検出、加工点近傍への設置可能性という特性を備えた図 6 に示すマイクロセンサを開発することにより、ナノ加工における微小な挙動をも検出可能なインプロセス加工計測が可能になった。提案したインプロセスマイクロセンサを用いて従来の加工計測では困難であった正確な接触検知や微小切り込み制御も可能である。

(4) 供給空気温度制御による構造体の熱変形抑制システム

本研究では排出空気温度をモニタリングすることにより、構造体近傍で供給空気温度を制御する図 7 のようなシンプルな熱変形抑制システムを構築した。実際に空気静圧スピンドルの熱変形抑制に適用し、様々な運転条件により、スピンドルの熱膨張を最小に抑制可能であることを確認したが、様々な熱問題の解決に対しても有用な手段となり得る。

(5) ハイブリッドリニア機構による数 100mm 範囲のナノモーションコントロール

本研究では在来の圧電素子等を組み込んだ粗微動ステージとは、原理的に大きく異なる図 10 のようなハイブリッドリニア機構の実現と展開を図っている。提案した駆動機構を実現することにより、数 100mm スケール運動範囲の中でナノ位置決め、あるいはサブナノメートル位置決めが可能になる。このことは、大物加工物のナノ加工をも可能とするものであり、それによる波及効果は計り知れない。

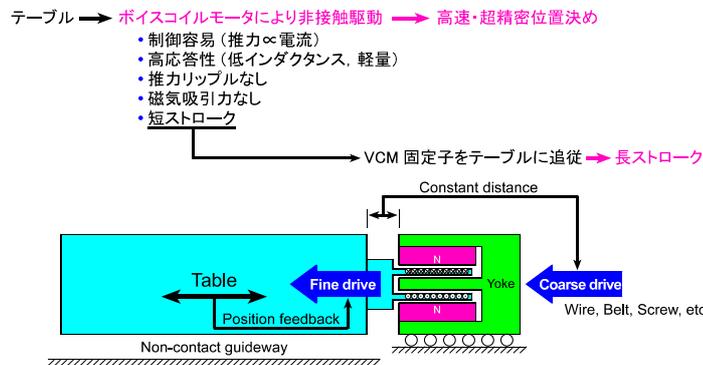


図 10 ハイブリッドリニア駆動機構概念

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

学術誌掲載論文

(1) 完全非接触多自由度X-Y-ナノ位置決めテーブルシステムの開発に関わる研究成果

H.Shinno, H.Hashizume, H.Yoshioka, T.Shinshi and K.Sato, X-YθNano-Positioning Table System for a Mother Machine, Annals of the CIRP (Annals of the International Institution for Production Engineering Research), Vol.53, No.1, (掲載可, to be Published) (2004).

(2) 超精密・微細加工状態認識システムの開発に関わる研究成果

H.Yoshioka, H.Hashizume and H.Shinno, In-Process Microsensor for Ultraprecision Machining, IEE Proc.-Science, Measurement and Technology., Vol.151, No.2, pp121-125, (2004).

(3) 超精密・微細加工状態認識システムの開発に関わる研究成果

H.Shinno, H.Hashizume and H.Yoshioka, Sensor-Less Monitoring of Cutting Force during Ultraprecision Machining, Annals of the CIRP (Annals of the International Institution for Production Engineering Research), Vol.52, No.1, pp.303-306, (2004).

(4) 加工システムの設計方法論に関わる研究成果

H.Shinno and H.Hashizume, Structured Method for Identifying Success Factors in New Product Development of Machine Tools, Annals of the CIRP (Annals of the International Institution for Production Engineering Research), Vol.51, No.1, pp.281-284, (2002).

(5) 供給空気の温度制御による超精密・微細加工システム構造体の熱変形抑制システムの開発に関わる研究成果

吉岡 勇人, 松村 晋平, 橋詰 等, 新野 秀憲, 給気温度制御による空気静圧主軸の熱変形抑制, 日本機械学会論文集 (C編), (論文 No.04-0388, 2004年3月26日受付) .

(6) 超精密加工システムの実現を支える要素技術に関わる研究成果

新野 秀憲, 橋詰 等, 新たなマザーマシンの実現を目指して, 精密工学会誌, Vol.70, No.2, pp.193-194, (2004).

(7) 新たな超精密・微細加工に関する研究成果

新野 秀憲, 橋詰 等, 加工環境制御超精密加工, 精密工学会誌, Vol.68, No.9, pp.1171-1174, (2002).

(8) 加工システムのSWOT分析に関わる研究成果

新野 秀憲, 橋詰 等, 八賀 聡一, 工作機械産業の国際競争力分析 (SWOT分析の提案とその応用), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.70, No.689, pp.307-314, (2004).

(9) 加工システム開発に必要なコア技術の評価に関わる研究成果

新野 秀憲, 橋詰 等, 八賀 聡一, 工作機械の製品開発方法論 (工作機械メーカーにおけるコアコンピタンスの評価方法), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.69, No.687, pp.3092-3099, (2003).

(10) 加工システム設計要因の分析に関わる研究成果

新野 秀憲, 橋詰 等, 吉岡 勇人, 八賀 聡一, 工作機械の製品開発方法論 (新製品開発における成功要因の構造化手法), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 68, No.671, pp.2196-2203, (2002).

(11) 加工システムのユーザビリティに関わる研究成果

H.Shinno, H.Hashizume, H.Yoshioka and K.Itoh, Product Development Methodology for Machine Tools(Usability Analysis of Man-Machine Interface), JSME International Journal, Series C, Vol.45, No.3, pp.815-820, (2002).

国際会議発表論文

上記の学術誌掲載論文(1), (3), 並びに(4)は,それぞれNancy(France), Montreal(Canada), Krakow(Poland)において2002年, 2003年, 2004年に開催されたCIRP General Assemblyにてそれぞれ講演発表を行った。従って,それらの重複分は省略する。

(12)H.Yoshioka, H.Hashizume and H.Shinno, In-Process Status Monitoring of Ultraprecision Cutting Using a Disturbance Observer, Proceedings of the 6th International Conference on Mechatronics Technology, Kitakyushu, Japan, September 29th-October 3rd, pp.47-51, (2002).

(13)H.Hashizume, H.Yoshioka and H.Shinno, An In-Process Micro-Sensor for Ultraprecision Machining, Proc. Of the 3rd euspenn International Conference, Eindhoven, The Netherlands, May 26th-30th, pp.729-732, (2002).

一般講演発表論文

(14) 松村 晋平, 吉岡 勇人, 橋詰 等, 新野 秀憲, 給気温度制御による空気静圧主軸の熱変形抑制, 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.152, (2003).

(15) 下田 寛, 橋詰 等, 新野 秀憲, ボイスコイルモータを用いた粗微動位置決め, 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.443, (2003).