

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24226004

研究課題名(和文)高度機能集積形マザーマシンシステムAIMSの実現とそれによる工作機械工学の体系化

研究課題名(英文)An advanced integrated mother machine system(AIMS) and formulation of machine tool engineering based on the development process

研究代表者

新野 秀憲(Shinno, Hidenori)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：40196639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 145,090,000円

研究成果の概要(和文)：広域三次元加工空間におけるナノメートルスケールの形状創成機能およびオンマシン複合計測機能を備えた革新的な高度機能集積形マザーマシンシステム(Advanced Integrated Mother Machine System, AIMS)のプロトタイプを実現する。更に、AIMSおよびその構成要素の概念設計から製造、調整、性能評価に至る一連の研究開発プロセスや技術的知識の定式化、体系化を行うことにより、新たな学術領域である「工作機械工学」を確立する。

研究成果の概要(英文)：Demands for three-dimensional nano-machining over a large working range have recently increased in a variety of industrial sectors. This research project aims at developing an advanced integrated mother machine system(AIMS) equipped with both an integrated form generating function and an on-machine integrated measuring function. In addition, the novel machine tool engineering is established by analyzing the development processes and the engineering skills for developing the overall AIMS and its structural modules.

研究分野：工作機械工学，生産加工，設計方法論

キーワード：工作機械 超精密加工 構造設計 生産加工 計測 機械加工 エネルギー加工

1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会の到来に伴い、高速情報通信、先端メカトロニクス分野を中心に様々な製品の高性能化への要求が急速に高まっている。特に、大物の超精密三次元形状創成の加工要求が国内外で著しく高まっている。それら超精密部品から構成される高附加価値製品には、在来製品とは比較にならない新機能と新構造の付与が可能となる。

現状におけるナノメートル精度の加工要求に対して小サイズの二次元加工を主体とした半導体プロセスによる加工で対応することが一般的である。本研究で対象とする大加工空間における三次元ナノ加工技術およびそれを実現する上で必要不可欠なマザーマシン(母なる機械、様々な機械をつくるための工作機械)の研究開発ニーズが高まっていることから、今後、本研究に関連する研究開発が生産加工分野における大潮流になることが予測される。

2. 研究の目的

本研究では、理想的な広域三次元ナノ形状創成機能とオンマシン複合計測機能を具備した高度機能集積形マザーマシンシステム(Advanced Integrated Mother Machine System, AIMS)およびその構成要素を実現し、それらの研究開発プロセスや技術的知識を定式化、体系化すると共に、新たな学術領域として「工作機械工学(Machine Tool Engineering)」を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、在来のマザーマシンを超えた新たな概念に基づくAIMSを実現するため、以下の要素研究を遂行する。

(1) 要素研究 P₁「ナノ平面運動制御テーブル系」

運動体の非接触支持、非接触案内、ならびに非接触駆動により、運動誤差発生要因、たとえば案内面における摩擦、バックラッシュなどの非線形現象を排除することにより、理想的なナノ平面運動を実現する。

(2) 要素研究 P₂「ナノ鉛直直動制御機能」

加工反力、構造体の振動、それらに起因する誤差発生要因等を外乱オブザーバにより補償可能な重力補償機能を備えたnmスケールの運動制御を実現する。

(3) 要素研究 P₃「ハイブリッド駆動機能」

粗動・微動機構、電磁・空気アクチュエータ等のハイブリッド化により、相互に機能補完を行い、運動範囲や応答帯域の拡大、誤差発生要因の相殺等により、単純な加算結果以上の性能を得る。

(4) 要素研究 P₄「インテリジェント回転主軸系」

新たなセンサ、アクチュエータ、軸受、回転駆動系、制御系により、高性能回転主軸系を実現する。

(5) 要素研究 P₅「熱的・力学的安定化構造」

新素材の適用、熱流の制御、発熱と冷却のバランス、熱対称 Box-in-Box フレーム構造などにより、熱的・力学的に安定な構造体を実現する。

(6) 要素研究 P₆「オンマシン複合計測機能」

レーザスペックル、エバネッセント光、ハイパースペクトル情報による加工空間における加工対象の多機能計測、さらにそれら情報による加工条件の再設定や修正加工などの加工制御機能の高度化を図る。

(7) 要素研究 P₇「ハイブリッド加工機能」

非接触インテリジェント工具としての高い潜在能力を有する高密度エネルギービームを機械加工と組合せることによってハイブリッド加工機能を実現する。

(8) 要素研究 P₈「工作機械工学の体系化」

広域三次元空間におけるnm分解能のハイブリッド加工機能と複合計測機能を具備したAIMSを構築すると共に、それらの研究開発プロセスの定式化、体系化により、新たな学術領域「工作機械工学」を確立する。

本研究の開発対象であるAIMSは、研究期間内に上述した要素研究に対応する主要構成要素を研究計画に沿って順次、開発し、最終年度にそれらを統合させる。

4. 研究成果

研究期間内に、当初の研究計画調書で設定した研究目的および到達目標に基づいてAIMSの実現に必要な以下の要素研究 P₁ ~ P₈を遂行した。以下にそれら代表的な研究成果を集約する。

(1)要素研究 P₁

ナノメートルスケールの形状創成を実現するためには、サブナノメートルスケールの位置決め分解能を有するテーブル系の実現が必要不可欠である。

これまでの研究で既に広域平面運動テーブルシステムのコアテクノロジーを保有しているため、本要素研究では、ボイスコイルモータを組合せたハイブリッド駆動による誤差発生要因を低減した超精密位置決めテーブルシステムが、200mm×200mmの運動範囲、位置決め分解能0.3nmの実現を確認した。

(2)要素研究 P₂

ナノメートルオーダの位置決め分解能を有する鉛直方向位置決め機構について、真空吸引による重力補償機能を有するナノ鉛直直動制御機能を実現した。特に本要素研究では、従来、回転軸への適用に留まっていた磁性流体シールを直動機構に適用した新たな非接触重力補償機能を組み込んだ鉛直運動機構を実現した。その性能評価を行った結果、10nmの位置決め分解能を達成可能なナノ鉛直直動機構を実現した。

なお、本要素研究の成果「Noncontact gravity compensator with magnetic fluid seals, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,

Vol10, No.5, (2016)」に対して,長谷川徳之,吉岡勇人,新野秀憲は,2017年6月19日に工作機械技術振興賞(論文賞)を受賞した.

(3) 要素研究 P₃

三次元ナノスケールの形状創成のためには,高精度の旋回位置決めテーブルが必要不可欠である.

本要素研究では,電磁アクチュエータおよび空気圧アクチュエータを組合せ,高トルクかつ高精度な旋回位置決め運動を可能とするハイブリッド駆動旋回テーブル系を開発した.2.4Nmの偏心荷重の負荷状態において微小ステップ駆動を行った結果,当該旋回テーブル系は,高負荷状態においても0.00002°の角度位置決め分解能の実現を確認した.

(4) 要素研究 P₄

高速回転によるフライス加工でナノメートルスケールの微細形状創成を実現するためには,工具先端を高精度に制御する必要がある.主軸系を含めた駆動要素の質量が大であると慣性の影響により,微小な変位制御が困難であることから,工具近傍のみを駆動するFast Tool Servo(FTS)が有効である.従来,固定工具である旋削加工を対象としたFTSでは, piezo圧電素子が用いられているものの,高速回転工具の場合,配線が必要な piezo圧電素子の適用は困難である.

本要素研究では,外部から磁界を付与することにより,寸法変化が可能な超磁歪素子をアクチュエータとして組み込むことにより,回転工具の微小,高速,高精度な変位制御を可能とした.更に,超磁歪素子近傍に設置したコイルにより,工具先端の変位を検知する自己検知機能を組み込むことにより,外部に変位センサを設置することなく,工具先端の変位をフィードバック制御可能なインテリジェント機能を実現した.

なお,本要素研究の成果「超磁歪素子の自己検知機能を利用した微小位置決め機構の開発,日本機械学会論文集第81巻第832号(2015-12)」に対して2017年4月20日に日本機械学会賞(論文),2016年12月9日にFA財団論文賞をそれぞれ受賞した.また,The 17th International Machine Tool Engineers' Conferenceにおいて公表された研究成果「Tool Servo System driven by giant magnetostrictive element for milling process」に対して,吉岡勇人,新野秀憲,田村勇樹の3名は,2016年11月20日にExcellent Poster Awardを受賞した.

(5) 要素研究 P₅

工作機械およびその構成要素の熱変形は,加工精度と加工能率に直接的に影響する重要な誤差発生要因であり,熱変形の抑制は所要の工作機械の性能を達成する上で必要不可欠である.

本要素研究では,空気静圧軸受とエアタービンを用いて非接触支持・非接触駆動を行うことにより,摩擦による発熱を抑制すると共に,エアタービンの断熱膨張による冷却と軸

受発熱を均衡させることにより,熱変形を抑制可能な回転主軸を新たに開発し,その性能を確認した.

(6) 要素研究 P₆

オンマシン(械上)で触針,画像等を用いて加工後の工作物形状等を計測・評価する様々な方法が開発されている.しかし,砥石の目詰まりや研削焼けに代表されるように,識別が困難な工作物状態や加工現象が数多く存在し,決め手となるオンマシン測定方法は確立されていない.

本要素研究では,オンマシンによるレーザスペクトルによる表面の微細形状の評価方法を提案し,その有用性を確認した他,目視観察では識別が困難な加工現象や加工状態を高空間分解能,高波長分解能,高測定速度で広範な分光スペクトルを取得可能なハイパースペクトルカメラを用いたオンマシン計測方法を提案した.特にハイパースペクトルカメラを用いた研削プロセスのモニタリングでは光学顕微鏡で識別困難な研削焼けの発生過程を明確に可視化可能であることを確認した.更に,本要素研究では,工具と工作物間の距離を高精度に検出し,切り込み量の制御を行うために,単結晶ダイヤモンド工具刃先におけるエバネッセント場を利用して,工具と工作物間の距離を10nmオーダの分解能で検出可能な新たな計測方法を開発した.この計測方法の適用により,工具切り込み量の高精度制御が可能であることを確認した.

なお,本要素研究の成果の一部「A newly developed STM-based coordinate measuring machine」に対して,澤野宏,後閑利通,吉岡勇人,新野秀憲は,2013年3月14日に精密工学会沼田記念論文賞を受賞した.

(7) 要素研究 P₇

次世代生産環境における加工機能として様々な加工対象に合理的に対応可能な機械加工と高密度エネルギービームによるハイブリッド加工の重要性が高まることが予想される.

本要素研究では,機械加工システムに新たな非接触加工ツールとして高いポテンシャルを備えるファイバレーザシステムを搭載した新たな加工系を実現した.さらに先端複合材料である炭素繊維複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)を加工対象として,最適な加工条件を策定するための方法論を提案した.光ファイバによる導光によることから,在来のレーザシステムに比べて格段にフレキシブルな加工が可能であることを確認した.

(8) 要素研究 P₈

AIMSおよびその構成要素の設計仕様の策定から,概念設計,基本設計,詳細設計,製造,組立,調整,完成に至る一連の工程,各工程における入出力情報,技術的知識,手順を整理,分析することにより,各工程の定式

化を行った。それらの結果に基づいて工作機械工学の体系化を行った。工作機械における問題解決のための方法論、工作機械工学の教育方法を提示し、それらの重要部分について日本工作機械工業会主催・工作機械基礎講座、日本工作機械工業会編・工作機械設計学（基礎編）にそれぞれ反映した。

なお、本要素研究の成果の一部「工作機械の設計方法論に準拠した超精密工作機械の実現に関する研究」の研究業績に対して研究代表者は2014年2月21日に日本機械学会生産加工・工作機械部門研究業績賞を受賞した。また一連の研究成果「製造産業を牽引する革新的マザーマシンの開発」が、産業集積の維持・発展とものづくり技術の高度化、高附加価値化の進展に貢献した功績と認められ、研究代表者は2017年10月2日に平成29年度東京都功労者表彰（技術振興功労）を受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

- (1) A newly developed zero-gravity vertical motion mechanism for precision machining, H.Yoshioka, H.Shinno, J.Zhu, M.Uchiumi, *CIRP(The International Academy for Production Engineering) Annals- Manufacturing Technology*, 査読有, Vol.66, No.1, (2017), pp.389-392.
- (2) Noncontact Gravity Compensator with Magnetic Fluid Seals, N.Hasegawa, H.Yoshioka, H.Shinno, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 査読有, Vol.10, No.5, (2016), pp.1-10.
- (3) On-machine surface texture measuring system using laser speckle pattern analysis, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol.10, No.1, (2015), pp.69-77.
- (4) 超磁歪素子の自己検知機能を利用した微小位置決め機構の開発, 田村勇樹, 吉岡勇人, 新野秀憲, 澤野宏, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.832, (2015), pp.1-13.
- (5) A low-profile planar motion table system driven by steel belt, H.Yoshioka, H.Shinno, H.Sawano, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol.9, No.6, (2015), pp.739-745.
- (6) Multi-dimensional assessment of nano/micro scale surface texture using laser speckle pattern analysis, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 査読有, Vol.7, No.1, (2015), pp.1-13.
- (7) High performance hydrostatic bearing using a variable inherent restrictor with a thin metal plate, H.Sawano, Y.Nakamura, H.Yoshioka, H.Shinno, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol.41, (2015), pp.78-85.
- (8) A thermally stable aerostatic spindle system equipped with self-cooling function, Y.Tamura, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 査読有, Vol.8, No.6, (2014), pp.1-10.
- (9) Magnetically preloaded aerostatic guideway for high speed nanometer positioning, T.Tsumura, H.Yoshioka, H.Shinno, H.Sawano, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 査読有, Vol.8, No.4, (2014), pp.1-11.
- (10) Monitoring of distance between diamond tool edge and workpiece surface in ultraprecision cutting using evanescent light, H.Yoshioka, H.Shinno, H.Sawano, R.Tanigawa, *CIRP(The International Academy for Production Engineering) Annals - Manufacturing Technology*, 査読有, Vol.63, No.1, (2014), pp.341-344.
- (11) Surface texture assessment of ultra-precision machined parts based on laser speckle pattern analysis, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Precision Engineering*, 査読有, Vol.38, No.1, (2014), pp.1-8.
- (12) A framework for systematizing machine tool engineering, H.Shinno, H.Yoshioka, H.Sawano, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol.7, No.6, (2013), pp.760-768.
- (13) A newly developed rotary-linear motion platform with a giant magnetostrictive actuator, H.Yoshioka, H.Shinno, H.Sawano, *CIRP Annals(The International Academy for Production Engineering) - Manufacturing Technology*, 査読有, Vol.62, No.1, (2013), pp.371-374.
- (14) 工作機械工学の体系化(マザーマシンに関わる研究活動と将来展望), 新野秀憲, 日本機械学会論文集(C編), 査

- 読有, Vol.79, No.808, (2013), pp.4527-4534.
- (15) A newly developed STM-based coordinate measuring machine, H.Sawano, T.Gokan, H.Yoshioka, H.Shinno, *Precision Engineering*, 査読有, Vol.36, No.4, (2012), pp.538-545.
- (16) A newly developed ripple-free precision toroidal type motor, H.Yoshioka, Y.Kurisasi, H.Sawano, H.Shinno, *CIRP Annals(The International Academy for Production Engineering) - Manufacturing Technology*, 査読有, Vol.61, No.1, (2012), pp.363-366.

〔学会発表〕(計 23 件)

- (1) ハイパースペクトルデータに基づく研削砥粒表面の定量的評価, 中村優之, 吉岡勇人, 新野秀憲, 2018年精密工学会春季大会学術講演会, (2018).
- (2) Approach detection of diamond cutting tool by using Photoelectric effect, H.Yoshioka, M.Akiyama, H.Shinno, *The Inter. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, JSME, (2017).
- (3) Rotary-axial positioning system with giant magnetostrictive element, Y.Tamura, H.Yoshioka, H.Shinno, *Procedia CIRP*, Vol.46, (2016).
- (4) Surface texture assessment based on analysis of laser speckle, H.Yoshioka, H.Shinno, M.Shimizu, H.Sawano, *The 17th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2016).
- (5) Tool servo system driven by giant magnetostrictive element for milling process, *The 17th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2016).
- (6) Recent machine tool engineering in precision and intelligence laboratory, H.Shinno, *Tokyo Institute of Technology RWTH Aachen University Joint Symposium for Inter. Industry - Academia Collaboration*, (2015).
- (7) Noncontact gravity compensator with magnetic fluid seals, N.Hasegawa, H.Yoshioka, H.Shinno, *The 8th Inter. Conf. on Leading Edge Manufac. in 21st Century*, (2015).
- (8) Direct measurement of relative distance between tool and workpiece using an evanescent light, H.Yoshioka, R.Tanigawa, H.Sawano, H.Shinno, *Proceedings of the 16th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2014).
- (9) High performance hydrostatic bearing using a variable inherent restrictor, H.Sawano, Y.Nakamura, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proceedings of the 16th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2014).
- (10) Magnetic fluid seal for linear motion system with gravity compensator, Y.Mizutani, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufac. Eng.*, Capri, (2014).
- (11) Multi-dimensional assessment of precision machined surface texture based on laser speckle pattern analysis, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 9th CIRP Conf. on Intelligent Computation in Manufac. Eng.*, Capri, (2014).
- (12) 超多点法による高速かつロバストな広範囲表面形状測定, 村井花菜, 澤野宏, 吉岡勇人, 新野秀憲, 第10回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, (2014).
- (13) 磁歪素子の自己検知機能を用いた微小位置決め機構, 田村勇樹, 澤野宏, 吉岡勇人, 新野秀憲, 第10回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会, (2014).
- (14) High performance hydrostatic bearing with a variable inherent restrictor, H.Sawano, Y.Nakamura, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 12th Inter. Symposium in Fluid Control, Measurement and Visualization*, Nara, (2013).
- (15) Magnetic attraction force preloaded aerostatic guideway for high speed nano positioning system, T.Tsumura, H.Yoshioka, H.Shinno, H.Sawano, *Proc. of the 7th Inter. Conf. on Leading Edge Manufac. in 21st Century*, Matsushima, (2013).
- (16) A long-range straightness measurement with motion error compensation, T.Komiyama, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proceedings of the 7th Inter. Conf. on Leading Edge Manufac. in 21st Century*, Matsushima, (2013).
- (17) Sensorless monitoring of machining torque on tilting platform driven by hybrid actuator, H.Yoshioka, M.Hayashi, H.Sawano, H.Shinno, *Proc. of the 13th Inter. Conf. of the European Society for Prec. Eng. and Nanotechnology*,

- Vol.1, (2013).
- (18)Hydrostatic bearing with high bulk modulus fluid, K.Kuze, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Emerging Tech. in Prec. Eng. XIV*, (2012).
- (19)A thermally stable high speed spindle system equipped with self-cooling function, Y.Tamura, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Emerging Tech. in Prec. Eng. XIV*, (2012).
- (20)Surface texture assessment of ultra-precision machined parts using a laser speckle method, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 15th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2012).
- (21)An ultra-precision machining system equipped with an on-machine noncontact profile measuring function, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 15th Inter. Machine Tool Engineers' Conf.*, (2012).
- (22)Surface texture characterization of ultra-precision machined parts based on laser speckle pattern analysis, M.Shimizu, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 12th Inter. Conf. of the European Society for Prec. Eng. and Nanotechnology*, Vol.1, (2012).
- (23)A newly developed nano-pattern generator equipped with an on-machine measuring function, H.Sawano, H.Yoshioka, H.Shinno, *Proc. of the 12th Inter. Conf. of the European Society for Prec. Eng. and Nanotechnology*, Vol.2, (2012).

〔図書〕(計11件)

- (1)未来生産システムの中核加工機能を担う革新的工作機械, 新野秀憲, 日本機械学会RC266次世代産業を牽引する工作機械に関する研究分科会・成果報告書, (2016), pp.50-53.
- (2)Machine tools for micro- and nanometer scale processing (Chapter II), H.Shinno, *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier Ltd (UK), (2014), pp.15-26.
- (3)Ultraprecision, H.Shinno, *CIRP (The International Academy for Production Engineering) Encyclopedia of Productive Engineering*, Springer Verlag, (2014), pp.1269-1272.
- (4)機械工学分野ロードマップ, 新野秀憲, 理学・工学分野における科学夢口

- ードマップ2014, 日本学術会議第3部, (2014), pp.111-118.
- (5)はじめての精密工学「精密加工におけるインプロセス計測」, 吉岡勇人, 精密工学会誌, Vol.80, No.7, (2014), pp.646-649.
- (6)革新的工作機械技術に関する研究活動の全貌と将来展望, 新野秀憲, 日本機械学会RC257革新的工作機械技術に関する研究分科会・成果報告書, (2014), pp.4-12.
- (7)日本機械学会RC257革新的工作機械技術に関する研究分科会・研究シーズ集, 新野秀憲編, (2013), pp.1-30.
- (8)超精密加工システム「ANGEL」の構造と加工事例, 吉岡勇人, 機械と工具, Vol.3, No.8, (2013), pp.8-12.
- (9)工作機械と新素材加工における高効率化技術, 新野秀憲, 機械と工具, Vol.3, No.1, (2013), pp.67-69.
- (10)超精密・微細加工の今後を展望する, 新野秀憲, 機械技術, Vol.60, No.11, (2012), pp.16-17.
- (11)JSMEテキストシリーズ・機械工学総論, 新野秀憲, 吉岡勇人, 他計30名, 日本機械学会, (分担執筆)3.3.1-3.3.2項, (2012), pp.116-119.

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
〔その他〕
ホームページ
URL <http://www.upm.pi.titech.ac.jp>

6. 研究組織

- (1)研究代表者
新野 秀憲 (SHINNO, Hidenori)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号: 40196639
- (2)研究分担者
吉岡 勇人 (YOSHIOKA, Hayato)
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授
研究者番号: 90361758
- (3)研究分担者
澤野 宏 (SAWANO, Hiroshi)
明治大学・工学部・専任講師
研究者番号: 40514295