

機関番号：35504
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560248
 研究課題名(和文) コンプライアンス特性を有するNC工作機械の開発とレンズ成型金型仕上げへの応用
 研究課題名(英文) Desktop NC Machine Tool with Compliance Control Ability and Its Application to Finishing Process of Lens mold
 研究代表者
 永田寅臣 (FUSAOMI NAGATA)
 山口東京理科大学・工学部・機械工学科・准教授
 研究者番号：50435070

研究成果の概要(和文)：本研究では $1\mu\text{m}$ の位置分解能を有する位置決め制御系と、 0.178N 程度の分解能で磨き力を制御できる力制御系を兼ね備えたコンプライアンス特性を有するデスクトップ型のNC工作機械を研究開発し、今後益々需要の増えることが予想される微細曲面金型を高品位に仕上げることができる低価格な磨きシステムを実現していくための基本技術を構築した。直径 4mm のLEDレンズ成型用金型の仕上げ実験によりその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this report, a novel desktop NC machine tool with compliance controllability is presented for finishing a metallic mold with small curved surface. A small ball-end abrasive tool is attached to the tip of z-axis. The control system is composed of a force feedback loop, a position feedback loop and a position feedforward loop. The force feedback loop controls the polishing force with a resolution of about 0.178N . The NC machine tool delicately removes small cusps on a mold, and finishes the surface with high quality. The effectiveness and the promise of the NC machine tool have been confirmed through actual finishing experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：知能機械システム

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム、コンプライアンス、工作機械、弱干渉制御

1. 研究開始当初の背景

ピックアップレンズやLEDレンズに代表される光学部品等の微細な3次元自由曲面を有する超精密金型の加工技術は、精密工作機械の急速な進歩に伴い年々技術力が向上している。しかし、そのような金型の最終仕上げ工程では自動化がほとんど進んでおらず、未だ熟練者による手仕上げに支えられている状況にある。これまでも幾つかの自動磨き

装置が提案、報告されているが、非常に高額な設備コストが必要となるだけでなく、最も高い現場ニーズである機械加工後の非常に小さなカスプライン除去を含む磨き作業や、機械加工に伴う表面変質層の均一除去と仕上げには対応できていない。また、エッジだれが発生しやすいなどの問題から、実際の金型製造現場ではほとんど利用されていない。このほか、既に産業界には力を制御できるロ

ポットや、高剛性な超精密位置決め制御により高精度の3次元加工を実現しているNC工作機械も存在するが、機械加工後の仕上げの工程にはほとんど対応できていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究開発では、 $1\mu\text{m}$ 程度の位置分解能を有する位置決め制御系をベースにして、磨き力を繊細に制御できる力制御系を兼ね備えたコンプライアンス特性を有するデスクトップ型のNC工作機械を研究開発し、今後益々需要の増えることが予想される微細曲面金型を高品位に仕上げることができ低価格な磨きシステムを実現していくための基本技術の構築を目的とする。

3. 研究の方法

3年間を通じ、以下の研究ステップを経て研究目的の達成を図った。

(1) 産業用ロボットをベースとした仕上げシステムの適用限界の確認実験

まず、既に開発している金型磨きロボットのベースとなっている垂直多関節型産業用ロボットを用いた位置と力の計測実験により、位置と力の分解能、および実効剛性について考察し、型直径6mm程度のプラスチックレンズ成型用金型など微小な自由曲面を有するワークにも対応可能な仕上げシステムを構築していく上での問題点を定量的に抽出する。この場合、株式会社メイホーが所有するオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットを用いて実験を行う。

(2) デスクトップ型NC工作機械の試作開発と実効剛性の測定

方法(1)で得られた課題を解決するために、位置分解能に優れたデスクトップ型のNC工作機械を設計開発する。システムのサイズは $850\times 700\times 700\text{mm}$ 程度である。 $1\mu\text{m}$ の位置決め分解能を有する単軸ロボットを直交座標系において組み合わせる。単軸ロボットは、ベース、リニアガイド、ボールねじ、ACサーボモータが一体となった設計とする。X, Y, Z各軸の有効ストロークはそれぞれ400mm, 300mm, 100mm程度である。Z軸用ロボットには固定用ジグと力覚センサを介して工具回転数の自動調整のためのスピンドルを搭載する。方法(1)と同様に位置と力の計測実験を行い、実用領域における力の分解能と実効剛性について検討し、柔らかめの工具により $0.03\text{N}/\mu\text{m}$ 程度の実効剛性を発揮できる設計とする。実用領域とは、竹製工具を用いた熟練者の手仕上げを参考にし、目標力30N程度以下の力制御系を想定している。なお、位置と力の計測実験では、型直径30mmおよび20mmのプラスチックレンズ成型金型に対してボールエンド砥石(ボール直径:5mm, 3

mm, 1mm)を接触させることで位置制御と力制御の分解能を評価する。

(3) コンプライアンス特性を発揮させるための倣い制御系の検討と実装

試作したデスクトップ型NC工作機械を制御対象にして、仕上げに必要となるコンプライアンス特性の実現方法について検討する。具体的には、位置制御系、力制御系、位置と力の弱干渉制御系のハイブリッド制御を実現するための新しい制御法について検討する。力制御系の安定性に大きな影響を及ぼすゲインの調整については、系の実効剛性を用いた臨界減衰条件によりシステムティックに調整できる方法について検討する。

Windowsのマルチメディアタイマーにより、制御周期1msのパルス指令による制御系を設計する。なお、倣い制御系の評価実験では、型直径30mm, 20mm, 15mmのプラスチックレンズ成型金型に対して、木製ボールエンド工具(ボール直径:5mm, 3mm, 1mm)を倣わせることで位置制御性能と力制御性能を評価する。

(4) レンズ成型用金型の仕上げのための目標軌道の生成に関する検討

レンズ成型用金型を仕上げるための目標軌道としては、仕上げ跡が残らないように連続した曲線で構成されたパスを用いなければならないが、通常使用されているほとんどの3次元CAD/CAMでは機械加工用の等高線パスしか生成できず、必ず不連続なパスが含まれる。このため、提案する磨きシステムのために、連続した曲線で構成された目標軌道の生成法について検討する。

レンズ成型用金型の手仕上げに携わっている熟練作業員から聞き取り調査を行い、目標軌道としてはスパイラル形状のパスが最も望ましいとの結論を得ている。このため、本サブテーマでは汎用のCAD/CAMが生成する等高線パス(3軸加工用CLデータ)を、提案する仕上げシステムに適用できるスパイラルパス(多軸加工用CLデータ)に自動変換する機能について検討する。3軸加工用CLデータは一般的であるが並進移動のための情報しか持っておらず、力を加えるべき方向などを参照することはできないため、それらを併せ持つ多軸加工用CLデータが必要となる。

具体的には、等高線パスをスパイラルパスに変換した後、法線方向のベクトルを計算し付加していくソフトウェアについて検討し、軌道生成器として完成させる。これにより、手間のかかる目標軌道の作成工程を省略できるだけでなく、従来のCAD/CAMシステムと高い親和性を発揮できるシステムを構築できる。

(5) 繊細な磨きのエネルギーを生成できるウッドスティック工具のための微小摺動制御法の検討

一般的に精密機械における摺動現象は位置決め精度および加工品の形状精度を低下させる要因として問題視されることが多いが、本研究では微小摺動により磨きのエネルギーを微調整することで周速度の低い領域においても安定した仕上げ品質を得ることを目的とする。

まず、磨き斑を効率的に除去するための繊細な磨きのエネルギーを発生させるために、3次元CAD/CAMが算出する基本工具経路データ(CLデータ)に基づく微小摺動制御法を新たに検討する。微小摺動ベクトルは、工具の進行方向と直交する方向に一定の大きさで規則正しく出力されるべきであるが、ハイエンドな3次元CAD/CAMであってもそのような摺動動作に対応した工具経路を生成できるものは存在していない。そこで、CAMのメインプロセッサが生成する多軸制御用CLデータをもとに微小摺動ベクトルを算出できる新たなポストプロセッサを開発する。

つぎに、微小摺動のためのベクトルが付加されたCLデータに基づく倣い制御法を設計し、LEDレンズ成型用金型の仕上げ実験により、磨き斑の除去効果について検証する。

4. 研究成果

前章で述べた研究方法を実施することで以下の研究成果が得られた。

(1)平成20年度

既に開発している金型磨きロボットのベースとなっている垂直多関節型産業用ロボットを用いた位置と力の計測実験により、位置と力の分解能、および実効剛性について考察し、型直径6mm程度のプラスチックレンズ成型用金型など微小な自由曲面を有するワークにも対応可能な仕上げシステムを構築していく上での問題点を抽出した。

つぎに、垂直多関節型産業用ロボットの問題点を解決するために図1のような位置分解能に優れたデスクトップ型のNC工作機械を設計開発した。システムのサイズは850×700×700mm程度である。1μmの位置決め分解能を有する単軸ロボットを直交座標系において組み合わせた。単軸ロボットは、ベース、リニアガイド、ボールねじ、ACサーボモータが一体となっている。X、Y、Z各軸の有効ストロークはそれぞれ400mm、300mm、100mm程度である。Z軸用ロボットには、固定用ジグと小型力覚センサを介して工具回転数の自動調整のためのスピンドルを搭載している。垂直多関節型産業用ロボットと同様に位置と力の計測実験を行い、実用領域における力の分解能と実効剛性について検討し、静的な状態で0.178N/μm程度の実効剛性を発揮させることができた。実用領域とは、竹製工具を用いた熟練者の手仕上げを参考にし、目標力30N程度以下の力制御系のことを指す。



図1 試作したデスクトップNC工作機械

(2)平成21年度

試作したデスクトップ型NC工作機械を制御対象にして、仕上げに必要なコンプライアンス特性の実現方法について検討した。位置制御系、力制御系、位置と力の弱干渉制御系のハイブリッド制御を実現するための新しい制御法を提案・設計し、図2に示すように実機に適用した。力制御系の安定性に大きな影響を及ぼすゲインの調整については、系の実効剛性を用いた臨界減衰条件によりシステムティックに調整できる方法について検討し、有効性を確認した。これにより、直径4mm程度のLEDレンズ成型用金型の表面に、先端直径1mmのウッドスティック工具を目標軌道に沿って倣わせることが可能になった。



図2 コンプライアンス特性による倣い機能

つぎに、提案したNC工作機械を動作させるために、連続した曲線で構成された目標軌道の生成法について検討した。レンズ成型用金型の手仕上げに携わっている熟練作業員から聞き取り調査を行い、目標軌道としてはスパイラル形状のパスが最も望ましいとの結論を得たため、低価格な汎用のCAD/CAMが生成する等高線パスをスパイラルパスに自動変換する機能について検討した。このスパイラルパスは3軸加工用CLデータと同じ形式であるが、並進移動のための情報しか持っておらず力を加えるべき方向などを参照することはできないため、それらを併せ持つ多

軸加工用 CL データが必要となる。このため、等高線パスをスパイラルパスに変換した後、法線方向のベクトルを計算し付加していくソフトウェアについても検討し、軌道生成器として完成させた。もちろん、ハイエンドの CAM が生成できるスパイラルパスに基づく多軸制御用 CL データを目標軌道として用いることもできる。本成果により、手間のかかる目標軌道の作成工程を省略できるだけでなく、従来の CAD/CAM システムと高い親和性を発揮できるシステムを構築できた。図 3 にはウッドスティック工具で LED レンズ成型用金型を仕上げるための目標軌道として用いたスパイラルパスを示す。



図 3 位置と方向の情報からなる目標軌道

(3)平成 22 年度

研究最終年度は、繊細な磨きのエネルギーを生成できるウッドスティック工具のための微小摺動制御法の検討し、磨き実験により有効性を検証した。まず、磨き斑を効率的に除去するための繊細な磨きのエネルギーを発生させるために、3次元 CAD/CAM が算出する CL データに基づく微小摺動制御法を新たに設計した。微小摺動ベクトルは、工具の進行方向と直交する方向で、かつ、ワークの表面に沿って一定の大きさで規則正しく出力されるべきであるが、ハイエンドな 3次元 CAD/CAM であってもそのような摺動動作に対応した工具経路を生成できるものは存在していなかった。そこで、CAM のメインプロセッサが生成する多軸制御用 CL データをもとに微小摺動ベクトルを算出できる新たなポストプロセッサを開発した。つぎに、微小摺動のための速度ベクトルが付加された CL データに基づく倣い制御法を設計し、既に試作開発しているデスクトップ型 NC 工作機械に実装した。その後、図 4 に示すように実際の LED レンズ成型用金型上の 4 mm の凹曲面部の仕上げ実験により、磨き斑を効率的に除去できる効果があることを確認した。図 5 には仕上げ前と後の表面性状を示す。

以上の研究成果により、今後益々需要の増えることが予想される微細曲面金型を高品位に仕上げることができる低価格な磨きシステムを実現していくための基本技術を構

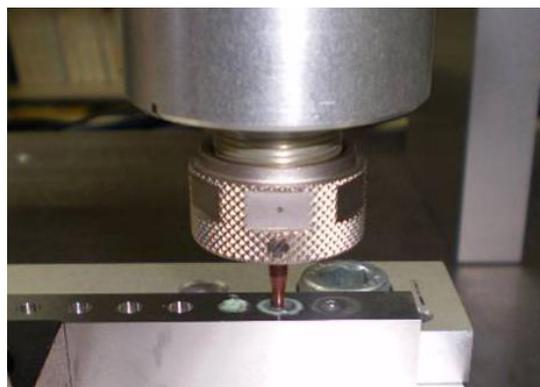


図 4 LED レンズ成型金型の仕上げ

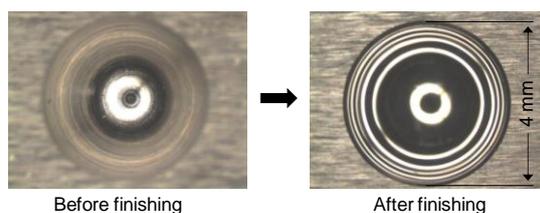


図 5 仕上げ前後の表面観察

築することができた。

(4)今後の研究計画

実際に商品となる LED レンズ成型用金型には、例えば直径 3.6 mm の半球状凹形の成型部が 180 個以上もあるため、長時間にわたり安定した仕上げ性能を発揮できなければ実ラインへの適用は困難である。このため今後は、今回の試作システムをもとに

- 1) 3次元切削加工モードと倣い仕上げモードを併せ持つ「マルチ加工モードを有するデスクトップ型 NC 工作機械」を開発し、それを応用した
- 2) ウッドスティックツールのオンライン自動ツールイングについて検討する。

これらの継続研究により、摩耗したウッドスティック工具の形状を再生させながら長時間の連続仕上げが可能になるものと期待される。

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 12 件)

① F. Nagata, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto and K. Watanabe, CAD/CAM-based Position/Force Control for a Ball-end Abrasive Tool and Its Application to an Industrial Robot, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, No. 4, pp. 742-752, 2008.

② F. Nagata, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto, K. Tsuda, O. Tsukamoto, M. Komino and Y. Kusumoto, Application of Open

Architectural Industrial Robots And Its Simulation Technique, *International Journal of Computer Research*, Vol. 17, No. 1/2, pp. 1-40, 2008.

③ F. Nagata, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto and K. Watanabe, Intelligent Desktop NC Machine Tool with Compliant Motion Capability, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 13, No. 2, pp. 423-427, 2009.

④ 永田, 谷, 溝渕, 長谷, 芳賀, 尾本, 渡辺, コンプライアンス特性を有するデスクトップ型 NC 工作機械の開発と LED レンズ金型仕上げへの適用実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 75, No. 752, pp. 292-300, 2009.

⑤ F. Nagata, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto and K. Watanabe, A Desktop NC Machine Tool with a Position/Force Controller Using a Fine-Velocity Pulse Converter, *Mechatronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 671-679, 2009.

⑥ F. Nagata, T. Mizobuchi, S. Tani, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga, Impedance Model Force Control Using a Neural Network-Based Effective Stiffness Estimator for a Desktop NC Machine Tool, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 28, Nos. 2/3, pp. 78-87, 2009.

⑦ F. Nagata, T. Mizobuchi, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga and M. Omoto, CAD/CAM-Based Stick-Slip Motion Control and Its Application to an Orthogonal-Type Robot, *Journal of Tribology and Surface Engineering*, Vol. 1, Nos. 3/4, pp. 287-304, 2010.

⑧ F. Nagata, T. Tanabe, G. Matsumura, K. Watanabe, Maki K. Habib, T. Hase and Z. Haga, Position-Based Impedance Control Using Inner Servo System and Its Application to a Desktop NC Machine Tool, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 3, Nos. 3/4, pp. 168-186, 2010.

⑨ F. Nagata, T. Mizobuchi, S. Tani, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe and M. K. Habib, Stick-Slip Motion Control Based on Cutter Location Data for an Orthogonal-Type Robot, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 15, No. 1, pp. 106-110, 2010.

⑩ F. Nagata, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe and M. K. Habib, CAD/CAM-Based Force Controller Using a Neural Network-Based Effective Stiffness Estimator, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 15, No. 1, pp. 101-105, 2010.

⑪ F. Nagata, K. Watanabe, Adaptive Learning with Large Variability of Teaching Signals for Neural Networks And

Its Application to Motion Control of an Industrial Robot, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 8, No. 1, pp. 54-61, 2011.

⑫ F. Nagata, T. Mizobuchi, K. Watanabe, M. K. Habib, T. Hase, Z. Haga and M. Omoto, Automatic Tool Truing for an LED Lens Cavity Lapping System, *International Journal of Robotics and Automation*, accepted.

[学会発表] (計 12 件)

① F. Nagata, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto and K. Watanabe, Intelligent Desktop NC Machine Tool with Compliance Control Capability, *Procs. of the 13th Int. Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 13th '08)*, pp. 779-782, 2008.

② F. Nagata, S. Tani, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto, K. Watanabe and M. K. Habib, Basic Performance of a Desktop NC Machine Tool with Compliant Motion Capability, *Procs. of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2008)*, WC1-5, pp. 1-6, 2008.

③ F. Nagata, S. Tani, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto, K. Watanabe, Orthogonal-Type Robot with a CAD/CAM-based Position/Force Controller, *Procs. of 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation*, pp. 1-6, 2009.

④ F. Nagata, T. Mizobuchi, S. Tani, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe and M. K. Habib, Impedance Model Force Control Using Neural Networks for a Desktop NC Machine Tool, *Procs. of IEEE Int. Sym. On Industrial Electronics (ISIE 2009)*, pp. 1428-1433, 2009.

⑤ F. Nagata, S. Tani, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe, Desktop NC Machine Tool with Abilities of Compliant Motion and Stick-Slip Motion, *Procs. of ASME InterPACK Conference 2009*, PACK2009-89042, pp. 1-7, 2009.

⑥ T. Mizobuchi, F. Nagata, S. Tani, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe, Cartesian-Type Robot with Neural Network-Based Position/Force Controller and Its Application to LED Lens Mold Finishing, *Procs. of 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2009)*, 1P4-1, pp. 1-6, 2009.

⑦ F. Nagata, T. Mizobuchi, S. Tani, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe and M. K. Habib,

Stick-Slip Motion Control for an Orthogonal-Type Robot, *Procs. of the 15th Int. Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 15th '10)*, pp. 930-933, 2010.

⑧ F. Nagata, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe and M. K. Habib, Impedance Model Force Control Using a Neural Network-Based Effective Stiffness Estimator, *Procs. of the 15th Int. Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 15th '10)*, pp. 697-700, 2010.

⑨ F. Nagata, T. Mizobuchi, S. Tani, T. Hase, Z. Haga, K. Watanabe, M. K. Habib and K. Kiguchi, Desktop Orthogonal-Type Robot with Abilities of Compliant Motion and Stick-Slip Motion for Lapping of LED Lens Molds, *Procs. of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010)*, pp. 2095-2100, 2010.

⑩ F. Nagata, T. Mizobuchi, M. K. Habib, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga, Skillful Stick-Slip Motion Control of a Cartesian-Type Robot, *Procs. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2010)*, pp. 3577-3582, 2010.

⑪ F. Nagata, T. Mizobuchi and K. Watanabe, STICK-SLIP MOTION CONTROL OF AN CARTESIAN-TYPE ROBOT, *CD-ROM Proceedings of World Automation Congress (WAC2010)*, ISORA36, pp. 1-7, 2010.

⑫ F. Nagata, T. Mizobuchi and K. Watanabe, A Workmanlike Orthogonal-type Robot for Finishing an LED Lens Mold, *Procs. of SCIS & ISIS 2010*, pp. 1271-1277, 2010.

[図書] (計4件)

① F. Nagata, S. Tani, T. Mizobuchi, T. Hase, Z. Haga and K. Watanabe, Desktop Cartesian-Type Robot with Abilities of Compliant Motion and Stick-Slip Motion, Robot Manipulators, New Achievements, pp. 241-254, IN-TECH, 2010

② F. Nagata, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto, K. Tsuda, O. Tsukamoto, M. Komino and Y. Kusumoto, Position/Force Control and Its Application to Open Architectural Industrial Robots, New Robotics Research, one chapter, 43 pages, NOVA Science Publisher, 2010.

③ F. Nagata, T. Mizobuchi, K. Watanabe, T. Hase, Z. Haga and M. Omoto, Stick-Slip Motion Control of a Wood-Stick Tool for Lapping an LED Lens Mold, Computer Science Research and Technology, pp. 191-206, NOVA Science Publisher, 2011.

④ F. Nagata, K. Watanabe and Maki K. Habib, Mechatronics Systems Based on CAD/CAM, MECHATRONICS, ISTE/Wiley, pp. 1-27, 2011.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01Detail.php?act=nam&kin=ken&diu=A19749>

6. 研究組織

(1)研究代表者

永田 寅臣 (NAGATA FUSAOMI)

山口東京理科大学・工学部・機械工学科・准教授

研究者番号 : 50435070

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし