

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04215

研究課題名（和文）工作機械主軸の軸心位置制御による非円形・非軸対称内筒加工の創製

研究課題名（英文）Creation of non-circular and non-axisymmetric inner cylinder machining method by controlling the axis' center position of the machine tool spindle

研究代表者

森本 喜隆（Morimoto, Yoshitaka）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00290734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：自動車の基幹部品であるEVモータ用ケーシング、自動車内燃機関の部品であるシリンダ、EVモータ用ケーシングでは、熱変形等により真円度が数十 μm 程度に、自動車用内燃機関モヘッド、シリンダ間を締結する際の弾性変形と熱変形で数十 μm 程度の非円形断面形状となる。本研究では、電磁力により主軸とモータステータが非接触支持され、かつラジアル方向力と回転トルクを同時に発生させるベアリングレスモータを主軸にビルトインする。この主軸により、独自に算出する非軸対称非円形内筒加工によるボーリング加工を行う、EVモータや内燃機関の内筒形状を高精度に創生する世界初の高機能主軸の開発とそれをういた加工技術の確立に挑戦する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この加工方法の実現により内燃機関が熱効率45%以上を達成するキーファクターとなり得る。さらに、EVモータでは、日速時のコギング現象の回避を達成することで、乗り心地の改善、運動性能の向上に寄与する。学術的には、外乱オブザーバを実装することにより加工状態の推定が高精度に行われ、それに基づく加工条件の適切化ならびに、高精度輪郭加工の実現により、学術的意義も極めて高い。社会的には、この生産手法が実装されることにより、我が国自動車メーカーの技術的支援を通して生産性向上に資する。

研究成果の概要（英文）：EV motor casings, which are key parts of automobiles, cylinders, which are parts of automobile internal combustion engines, and EV motor casings, have a roundness of several tens of μm due to thermal deformation. It becomes a non-circular cross-sectional shape of several tens of μm due to elastic deformation and thermal deformation during fastening. In this research, the main shaft and the motor stator are supported by electromagnetic force without contact, and a bearingless motor is built into the main shaft to generate radial force and rotational torque at the same time. With this spindle, we developed and applied the world's first high-performance spindle to create the inner cylinder shape of EV motors and internal combustion engines with high precision by performing boring processing by independently calculating non-axisymmetric non-circular inner cylinder machining. We establish the processing technology that was used.

研究分野：工作機械

キーワード：工作機械 主軸 歳差運動 章動運動 外乱オブザーバ

1. 研究開始当初の背景

自動車の基幹部品であるEVモータ用ケーシング、自動車内燃機関の部品であるシリンダ、EVモータ用ケーシングでは、熱変形等により真円度が数十 μm 程度に、自動車用内燃機関もヘッド、シリンダ間を締結する際の弾性変形と熱変形で数十 μm 程度の非円形断面形状となる。本研究では、電磁力により主軸とモータステータが非接触支持され、かつラジアル方向力と回転トルクを同時に発生させるベアリングレスモータを主軸にビルトインする。この主軸により、独自に算出する非軸対称非円形内筒加工によるボーリング加工を行う、EVモータや内燃機関の内筒形状を高精度に創生する世界初の高機能主軸の開発とそれをういた加工技術の確立に挑戦する。

2. 研究の目的

近年、地球温暖化対策のため、電気自動車の普及と内燃機関のさらなる効率化が求められている。EVモータ用ケーシングでは、熱変形等により真円度が数十 μm 程度に、自動車用内燃機関もヘッド、シリンダを締結する時の変形と熱変形で数十 μm 程度の非円形断面形状となる。従来のダミーヘッド締付けによるボーリング加工では十分な形状精度を得ることが難しくなっており、この形状を加工できる内筒加工方法は出現していない。この形状精度の向上により、内燃機関では熱効率45%越えが期待できる。また、EVでは微速度域のコギングの解消、乗り心地性能の向上が期待できる。

本研究では、ラジアル方向力と回転トルクを同時かつ独立して制御することができるスピンドルを開発した。これにより、本主軸では主軸の回転運動と二次元位置制御が同時かつ同期して可能となる。特に、主軸の歳差運動、章動運動と主軸の回転位置に同期させて制御することで、図1のような数十 μm 程度の非軸対称・非円形断面形状の高精度なボーリング加工の実現が期待できる。さらに工具先端位置制御を実現するとき、工具先端は歳差運動、章動運動を行いながら加工を行うこととなる。一方、実際の加工で作用する切削抵抗による軌跡誤差の発生も考慮して、それを補償するような制御モデルを構築する必要がある。

そこで開発した主軸に、この切削抵抗を推定し、フィードバックすることにより、外乱を除去することができる。外乱オブザーバを設計・実装する。外乱オブザーバを工作機械に導入することで、外乱を精度よく除去することができ、加工形状の高精度化が期待できる。事前に主軸の位置制御シミュレーションで外乱を加え、外乱オブザー

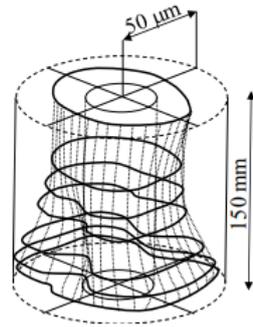


Fig.1 Diagram of non-circular machining

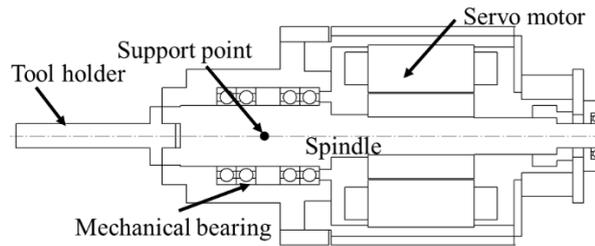


Fig.2 A schematic diagram of developed spindle unit

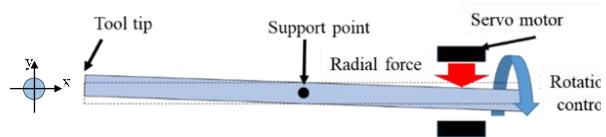


Fig.3 Simple model of spindle

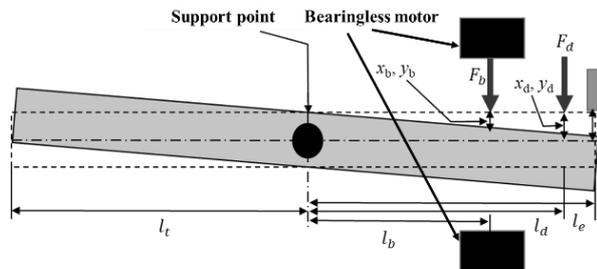


Fig.4 Measured Compliance Transfer Function

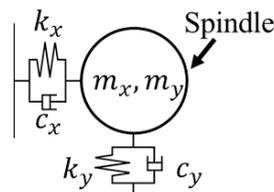


Fig.5 Two-way model of spindle

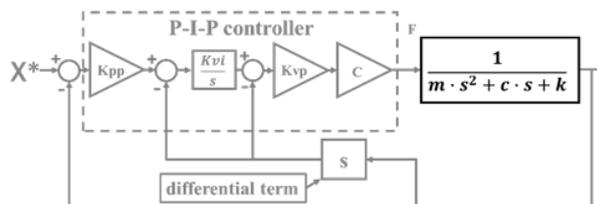


Fig.6 Block diagram for axial center position control

バによって外乱を推定，除去することができ，位置制御の性能が良くなることを確認した上で，試作主軸に外乱オブザーバを実装した状態で，実際にボーリング加工を行い，主軸に作用する切削力に対する外乱推定，除去効果を確認することによって，制御モデルの妥当性を確認した．以上により，内筒加工における新たな手法を提案し，生産性を損なうことなく，むしろ生産性をも向上させることを証明する研究となった．

3. 研究の方法

(1) 開発した主軸の概要

主軸軸心位置の制御により工具先端位置を制御する主軸を開発した．開発した主軸ユニットを図2に示す．本主軸は磁気軸受けとACモータの両方の機能を持つベアリングレスモータ^①を搭載している．ベアリングレスモータは主軸を回転させる回転トルクと主軸を非接触で支持する半径方向力を発生させることができる．回転制御と半径方向力の制御を同時かつ独立して行い，主軸を回転させながら回転角度位置と同期して位置制御が可能となる．この機能によって図3に示す工具先端位置を制御し，目的の断面形状を内筒加工することができる．

目標制御ストロークは約20 μm で，ベアリングレスモータの定格出力は4.5kWに設定されている．

(2) 主軸の位置制御モデルの構築

本研究では主軸の半径方向の運動は図4に示すように，制御点と観測点が異なり，さらに加工点は主軸のアンギュラベアリングの支持点から反対側に位置しているため，加工時には主軸は歳差運動と章動運動を同時に行うこととなる．ここで，主軸の弾性変形は無視して，図5に示すように支持点を基準に加工点，制御点，観測点が直線上に配置された一自由度系のモデルとして制御系を構築した．この場合，運動方程式は等価質量 m [kg]，減衰係数 c [N/(m/s)]，ばね定数 k [N/m]と半径方向の電磁力 f_x, f_y [N]を用いて式(1)，(2)のように表すことができる．ここで，半径方向の電磁力は主軸の回転位置に依存した目標位置が電磁力と比例することから K_c を力/変位の変換係数として運動方程式は式(3)，(4)のように表される．

制御周期は一定であるため，回転角度位置と半径方向位置は制御周期に同期して取得することが必要となる．

$$f_x(t) = m\ddot{x}_1(t) + c_x\dot{x}_1(t) + k_x x(t) \quad (1)$$

$$f_y(t) = m\ddot{y}_1(t) + c_y\dot{y}_1(t) + k_y y(t) \quad (2)$$

$$f_x = K_c x_{1t}(t) = K_c R(\theta(t)) \cos(\theta(t)) \quad (3)$$

$$f_y = K_c y_{1t}(t) = K_c R(\theta(t)) \sin(\theta(t)) \quad (4)$$

(3) 実測伝達関数による動特性パラメータの同定

主軸の位置制御は図6のようにP-I-Pコントローラを用いて制御を行っている．これにより，半径方向力を発生させるインバータの応答は十分に確保され，本研究で目指す，100Hz相当の位置制御を実現できる．次に，図6中の等価質量 m [kg]，ばね定数 k [N/m]，減衰係数 c [N/(m/s)]は，インパルスハンマによって主軸を加振し，変位を測定した実測伝達関数から算出した．ここでは主軸単体のコンプライアンス伝達関数について各方向に対するハンマリング結果から入出力の関係を求め，主軸を1自由度振動系として質量，減衰係数，ばね定数からなる制御モデルを構築した．

4. 研究成果

(1) 外乱オブザーバの実装による加工精度向上

この主軸を用いて内筒加工を行う際に発生する切削抵抗を外乱として推定，除去し加工精度を向上させるために外乱オブザーバを設計した．図7に外乱オブザーバを組み込んだ主軸の位置制御のブロック線図を示す．指令値をP-I-Pコントローラと電流-力変換係数によって力に変換し，外乱オブザーバで求めた外乱推定値をフィードバックして外乱を相殺する．プロ

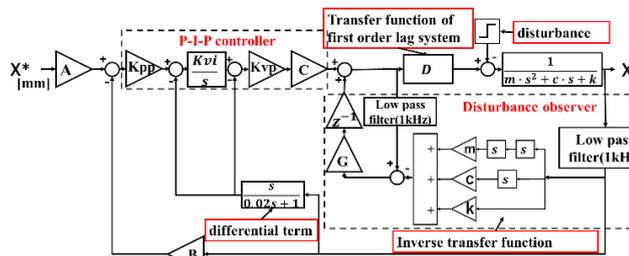


Fig.7 Block diagram with disturbance observer

Table1 Identified parameters (X-AXIS)

Parameter	Value	Description	Value
m [kg]	4.723	A (Unit coefficient)	10
c [N/(m/s)]	1340.64	B (Unit coefficient)	10000
k [N/m]	3	C (Current-force) [A/N]	44.27
K_{pp}	1410000	D (Trf of 1ST order lag system)	$4341s + 5569$
K_{vi}	0		$s^2 + 6053s + 55$
K_{vp}	400	G (Observer gain)	0.5

ック線図に用いるパラメータを表1に示す。

外乱オブザーバの性能を評価するため、実際の試作主軸を想定して、事前に外乱を除去するシミュレーションを行った。入力を0mとして静止状態とし、実際の内筒加工の切削抵抗を想定した外乱(0.05秒かけて10Nになる外乱)を加えた条件でシミュレーションを行い、外乱オブザーバの有無による外乱除去効果を確認した。図8に外乱オブザーバなしと外乱オブザーバありときのシミュレーション結果の主軸変位を示す。オブザーバフィードバックなしの場合は収束するのに

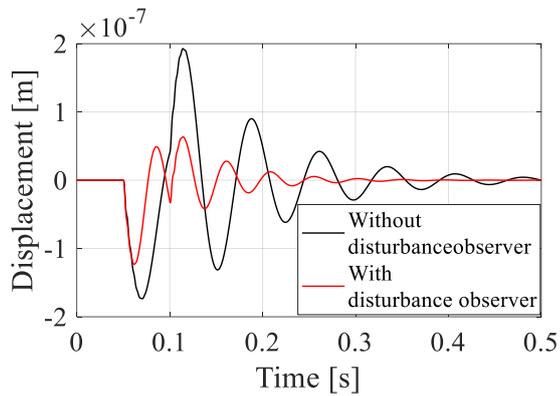


Fig.8 Output displacement

時間がかかるのに対しフィードバックを掛けた場合は収束する。また、フィードバックありの場合の変位の最小値はありの場合と比べ66%小さくなっている。よって、外乱オブザーバを用いた制御モデルは主軸の切削抵抗の影響の除去に関して有効であることがわかる。

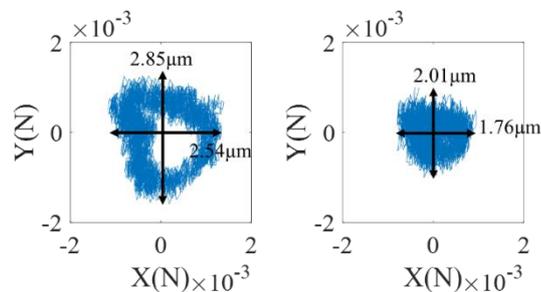
(2)加工実験による提案手法の検証

① 加工試験による外乱除去効果の確認

外乱オブザーバの性能を評価するため、実際の試作主軸を用いて内筒加工試験を行った。この手法の特徴に、必ずしも非円形非軸対称加工のみに適用されるのではなく、工具回転中心の振れをゼロ付近に制御することも可能であることが挙げられる。そこで、x,y軸の位置指令値を0mmとした原点支持制御の状態で行った。図9に外乱オブザーバありの状態となしの状態で加工を行った際のモータの変位、図10に外乱オブザーバありとなしのときのx,y方向の振幅の最大値の比較を示す。図9,10から、外乱オブザーバありの場合はなしの場合と比べ軸心位置が原点に近くなっており、外乱オブザーバありの方が約30%原点に近くなっていることが分かる。よって、外乱オブザーバを用いた制御モデルは主軸の切削抵抗の影響の除去に関して有効であることがわかる。

② 加工試験による外乱除去効果の確認

非円形内筒加工の性能を評価するため、実際の試作主軸を用いて内筒加工試験を行った。主軸一回転中に4回10μm程度の起伏が生じる形状をもつ花卉形状の状態で行った。図11に外乱オブザーバありの状態となしの状態で加工を行った際のモータの変位を示す。花卉軌跡の指令値と実際の変位を比較するため、このとき回転角度θごとの半径方向の差eを求めた。外乱オブザーバ無しの場合の偏差は3μm、外乱オブザーバありの場合の偏差は2.6μmとなった。非円形の加工形状でも外乱オブザーバによって、目標値と応答値の差が約15%小さくなり、外乱オブザーバのフィードバックによって外乱を除去し、加工精度が向上することを確認した。



(A) without observer (B)with disturbance observer

Fig.9 Displacement of motor

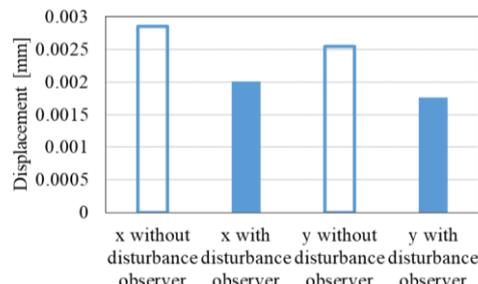


Fig.10 Compared result of both with and without disturbance observer

つぎに、工作物に切削動力計を取り付け、切削抵抗を求め、外乱オブザーバから導出される切削抵抗との比較を行った。外乱オブザーバの出力のみでは花卉軌跡の切削以外の影響もあるため、外乱オブザーバで導出した補正出力を周波数変換し、花卉軌跡の各周波数を抜き出し切削抵抗を算出した。切削動力計と外乱オブザーバで算出した切削抵抗を図12に示す。動力計による測定結果と外乱オブザーバから求めた切削抵抗は花卉形状をしており、抵抗値も約30%の誤差で計算できた。さらに改善

が必要であるが外乱オブザーバを用いた切削抵抗の推定が可能である。

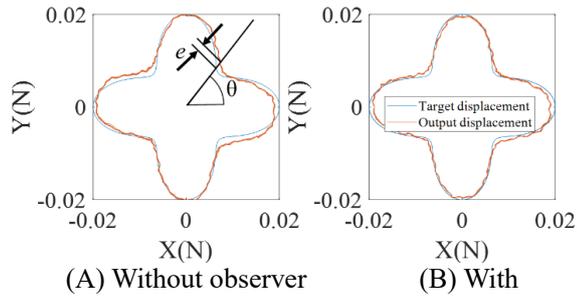
(3) おわりに

本研究では、半径方向力と回転トルクを同時に、同期して制御できる主軸モータを開発し、それにより工具先端位置の2次元位置制御と回転角度位置とを制御することが可能な主軸を開発し、以下の研究成果が得られた。

- ① 主軸回転数 20000min^{-1} を超える回転性能と 2000min^{-1} 以下において軸心位置制御を可能とする高性能モータを開発した。
- ② モータ制御系に、加工による外乱を考慮したオブザーバを実装した。ばね-ダンパ系の制御モデルで用いるばね定数、等価質量、減衰係数の同定を行い、これらのパラメータを外乱オブザーバに適用した。
- ③ 構築した外乱オブザーバは外乱の推定、除去ができることを予めシミュレーションにより確認した。
- ④ 原点位置制御、花卉形軌跡の加工実験において、外乱オブザーバの有効性を確認することができた。
- ⑤ $20\mu\text{m}$ 程度のストロークを実現し、提案する非軸対称、非円形自由曲面加工を形状精度 $2.5\mu\text{m}$ 以下の高精度で加工することに成功した。
- ⑥ 加工条件は従来の条件を維持しつつ、ダミーヘッドを要しないため、一工程を省くことが可能となり、生産性向上にも寄与することが証明された。
- ⑦ 今後は、実用機にこの主軸を搭載して、実証試験ならびに本加工手法の普及に取り組む。

<引用文献>

- ① Syunsuke Kobayashi, Masahide Oshima, "A Radial Position Control Method of Bearingless Motor Based on d-q-Axis Current Control", IEEE Transactions on Industry Applications vol.49 No4, (2013), pp.1827-1835.



observer
Fig.11 Displacement without disturbance observer

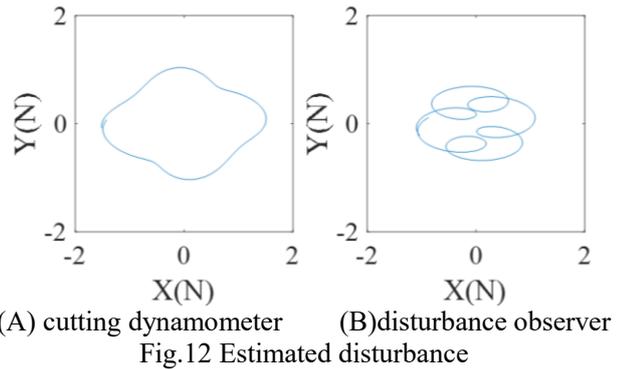


Fig.12 Estimated disturbance

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 秋保裕矢, 森本喜隆
2. 発表標題 軸心位置アクティブ制御型主軸の開発
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡部元紀, 森本喜隆
2. 発表標題 軸心位置アクティブ 制御型主軸の開発
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Akiho, Yoshitaka Morimoto
2. 発表標題 Active center position control of machine tool spindle
3. 学会等名 The 10th International Conference on leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋保裕矢, 森本喜隆
2. 発表標題 軸心位置アクティブ制御型主軸の開発
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	林 晃生 (Hayashi Akio) (50734430)	金沢工業大学・工学部・准教授 (33302)	
研究 分担者	大島 政英 (Oshima Masahide) (70233103)	公立諏訪東京理科大学・工学部・教授 (23604)	
研究 分担者	加藤 秀治 (Kato Hideharu) (90278101)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------