

## 論文の内容の要旨

論文題目 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究

氏名 内 田 裕 之

近年の工作機械に於いて、機械自身の高剛性化や高精度化の開発改良に、制御装置や加工工具などの急速な進歩が重畳し、その加工性能は目覚ましい進歩を遂げている。工作機械の代表例であるマシニングセンタに於いても、自動車部品市場向けに要求されるハイサイクル加工性能や精密金型市場向けに要求される高精度高品位加工性能は、年々着実に強化されている。中でも高品位加工に関しては、従来の高精度金型市場に加え、高機能携帯電話、所謂スマートフォンの登場が、この用途での工作機械の進化を加速させている。

工作機械の加工性能を決める制御装置側の要因としては、送り軸のサーボモータが重要な役割を占める。サーボモータの特性の中で、慣性モーメント以外はその特性値の良し悪しがほぼ一義的に決まる。即ち、最大トルクや連続定格トルクは大きければ大きい程良く、エンコーダの分解能や絶対精度は高ければ高い程良い。しかしながら、慣性モーメントだけは、そのサーボモータが搭載される送り軸の慣性モーメントとの比により、その工作機械の加工性能が大きく左右されるという特徴を持つため、より深い議論が必要となる。

一般に、加工時間の短縮を最優先とするハイサイクル加工では、サーボモータの慣性モーメントは制御装置が安定に制御出来る範囲で小さい方が好ましく、加工精度や加工面品位を最優先とする高精度高品位加工では、慣性モーメントは大きい方が好ましい、との経験則が存在する。しかしながら、この経験則を理論から実加工までを含めて定量的に論じた研究はこれまでに殆どなく、実際に同じ条件の下で実加工実験を行い、慣性モーメント比の違いが加工結果に与える影響を論じた研究は、これまでに全く存在しなかった。

そこで本論文では、慣性モーメント比の違いが実加工結果に与える影響というテーマを、以下の4つの観点から、多角的にかつ多くの実加工実験を実施して研究した。

- (1)力学モデルによる理論検証と、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの調査
- (2)慣性モーメントの異なるサーボモータとマシニングセンタとを組合せた実加工実験
- (3)上記実加工実験の測定結果とマシニングセンタの送り軸の挙動の測定結果との比較
- (4)高品位加工に着目しての、実在するワークピースを用いた追加実験と全実験の総括

これらの研究を通して、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、従来知られていた経験則をより具体的、定量的に裏付け、マシニングセンタの想定する加工対象に応じたサーボモータの最適選定の指標を確立した。また、近年市場の拡大が顕著な高品位加工の分野に於いて、慣性モーメント比の違いが実加工結果に与える影響を、様々な実加工事例と共に明らかにした。最後に、一連の研究結果を総括すると共に、高品位加工の全体像の把握、官能検査に頼らない評価指標など、今後の課題を明確化した。

以上の研究の成果を論文としてまとめるにあたって、上述の(1)(2)(3)(4)の4つの課題に関する議論の前後に序論と結論を論じる章を設けて、全6章からなる構成とした。

### 第1章 序論

1.1節から1.4節に至る全4節で、本研究の背景、従来研究の主な内容、本研究の目的と特長、本論文の構成を、順に論じた。1.2節では、サーボモータとその制御に関する文献と論文、及び工作機械と加工技術に関する文献と論文の中で、本研究の課題とした、両分野にまたがる研究をテーマとする論文を、学術情報データベ

ースを用いて抽出し、本論文の内容との差異を検証した。1.1 節と 1.3 節では、本論文で議論する内容が従来研究で論じられていなかった背景についても言及し、そこに本論文の目的と特長がある点を明記した。

## 第 2 章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

まず 2.1 節で、本章の概要を示し、次に 2.2 節で、マシニングセンタの動特性に影響するサーボモータの主な性能指標を開示した。2.3 節では、サーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸との慣性モーメント比に関して簡単な力学モデルによる考察を行った。一方 2.4 節では、実際に加工現場で稼働する合計 12 機種のマシニングセンタを対象として、そのサーボモータと機構部の送り軸の慣性モーメント比を調査し、その結果を分析した。即ち、2.3 節では理論的な考察を行い、2.4 節では実機の調査結果に基づいた分析を行い、2.5 節で両者の結果を比較し検証した。最後に 2.6 節で、本章の内容を総括した。本章で、慣性モーメント比に関する既存の経験則を、まずは概略的に裏付けた。

## 第 3 章 サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響

まず 3.1 節で、本章の概要を示し、次に 3.2 節で、本論文の中心となる、サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験による検証のための準備を整えた。具体的には、慣性モーメントのみが異なり他の特性がほぼ同一の 3 つのグループのサーボモータと、実加工が可能な小型マシニングセンタを、検証のための装置の中心とした。また 3.3 節では、実加工実験に先立ち、マシニングセンタを用いた加工の種類と、各々に於いてサーボモータに要求される主な仕様を開示した。加工内容としては、部品加工市場で必要とされるハイサイクル加工、金型加工市場で必要とされる高精度高品位加工の 2 つを取り上げた。そして 3.4 節で実加工実験の手法と結果を示し、3.5 節で結果を考察し、最後に 3.6 節で本章を総括した。本章で、慣性モーメント比に関する既存の経験則を、慣性モーメントの異なるサーボモータとマシニングセンタを組み合わせた実加工実験により、初めて具体的に実証した。

## 第 4 章 サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの送り軸とその駆動系に与える影響、及びその評価のための計測システム

まず 4.1 節で、本章の概要を示し、次に 4.2 節で、第 3 章で実施する実加工実験の際の、送り軸のサーボモータの挙動測定による検証の手法を開示した。具体的には、第 3 章と同じ実験装置で、加工プログラムを走らせて空運転を行い、その際の機構部の送り軸の挙動を、サーボモータのエンコーダから得られるフィードバック信号を用いて定量的に測定し、その結果を分析した。実加工実験は、工作機械の最終的な加工性能を把握出来る点に長所がある一方、サーボモータの挙動測定は、送り軸の挙動のみの評価が可能である点に長所がある。実際の現場では、この 2 つの手法を併用して、工作機械の加工性能を効率良く評価する事が多い。4.3 節から 4.5 節の流れは第 3 章の 3.3 節から 3.5 節の流れと同様で、4.5 節で一連の実験結果を考察し、最後に 4.6 節で本章を総括した。第 3 章で実証する慣性モーメント比に関する既存の経験則を、本章では別の手法で実証し、第 3 章を更に裏付けた。

## 第 5 章 慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

まず 5.1 節で、本章の概略を示し、次に 5.2 節で、焦点を高品位加工に絞り、その代表例である高精度金型や高級時計など、複数の実在する部品或いはそれを模したワークピースで実加工実験を実施した。続く 5.3 節で、一連の実加工実験の結果を整理し、5.4 節で、その結果に対する考察を行った。そして、一連の実加工実験を通して第 3 章、第 4 章で開示したテスト加工用ワークピースを高品位加工の評価に使用する妥当性も裏付けた。5.5 節では、高品位加工の全体像を考察すると共に、その定量的評価指標に関する今後の課題を開示し、最後に 5.6 節で本章を総括した。本章では、高品位加工に於ける慣性モーメント比の与える影響を、複数の現実に近い加工部品の実加工実験を通してより明確に裏付けた。

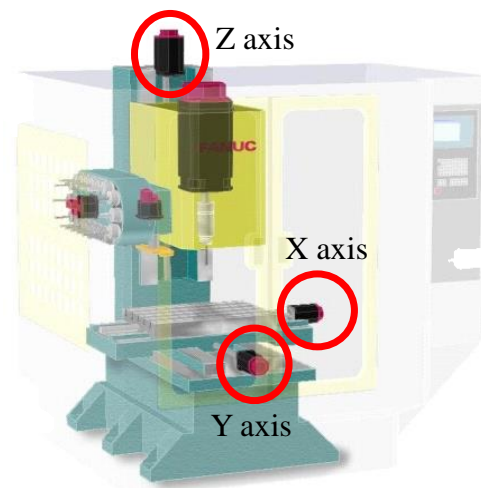
## 第6章 結論

6.1節で、本論文の中心となる第2章から第5章までの内容を要約し総括した。6.1節に示す本論文の結論の焦点は、慣性モーメント比に関する既存の経験則の、具体的、定量的な実証にある。また、第2章から第5章までの議論の過程で新たに考案した、幾つかの計算、調査、実験、評価に関する手法を列挙した。これらの新たな提案の中で、特に複数のサーボモータグループとマシニングセンタを準備した一連の実加工実験とその測定評価の手法は、この分野での今後の研究に於ける有効な指針となると考える。そして6.2節では、本論文で得られた結論を更に数理的に補強する追加研究が期待される項目を列挙した。最後に、慣性モーメント比を含めて高品位加工に影響を与える要素の全体像の把握と、官能検査に代わる高品位加工の定量的評価指標という2つの難題を取り上げた。高品位加工の全体像及び加工結果の定量的な評価指標の追求は、この分野での今後の大きな研究課題となると考える。

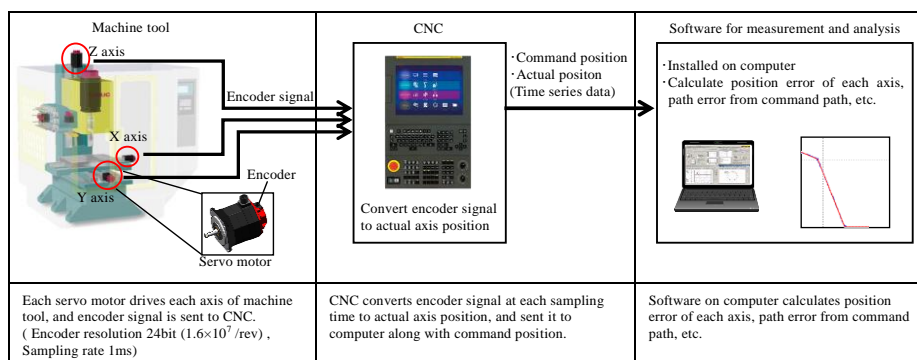
以上の研究を通して、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、従来知られていた経験則をより具体的、定量的に裏付け、マシニングセンタの想定する加工対象に応じたサーボモータの最適選定の指標を確立した。また、近年市場の拡大が顕著な高品位加工の分野に於いて、慣性モーメント比の違いが実加工結果に与える影響を、様々な実加工事例と共に明らかにした。最後に、一連の研究結果を総括すると共に、高品位加工の全体像の把握、官能検査に頼らない評価指標など、今後の課題を明確化した。



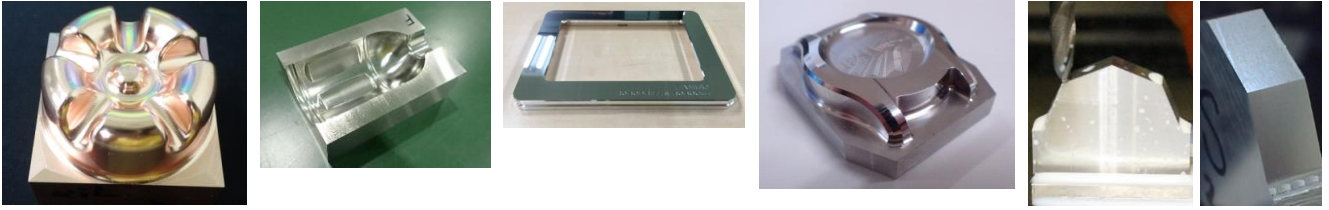
実加工実験を行ったテストサイト



マシニングセンタに搭載されたサーボモータの部位



送り軸の挙動測定に使用した測定システムの構成



合計 5 種類の高品位加工実験用のワークピース

加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較 (2D)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
Total moment of inertia	$1.36 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.85 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$3.25 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia ratio	1.01	0.58	0.27
Photograph of machining surface			
Line roughness quoted from the 2nd paper	Ra 0.37 $\mu\text{m}$ Rz 2.54 $\mu\text{m}$ 	Ra 0.36 $\mu\text{m}$ (-3%) Rz 2.22 $\mu\text{m}$ (-13%) 	Ra 0.31 $\mu\text{m}$ (-16%) Rz 1.97 $\mu\text{m}$ (-22%) 
Position Error	Peak to peak 0.8 $\mu\text{m}$ 	Peak to peak 0.6 $\mu\text{m}$ (-33%) 	Peak to peak 0.4 $\mu\text{m}$ (-50%) 

加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較 (3D)

Motor group	#1	#2	#3
Photograph of machining surface			
Surface roughness quoted from the 2nd paper			
Position error (3D)			

以上