

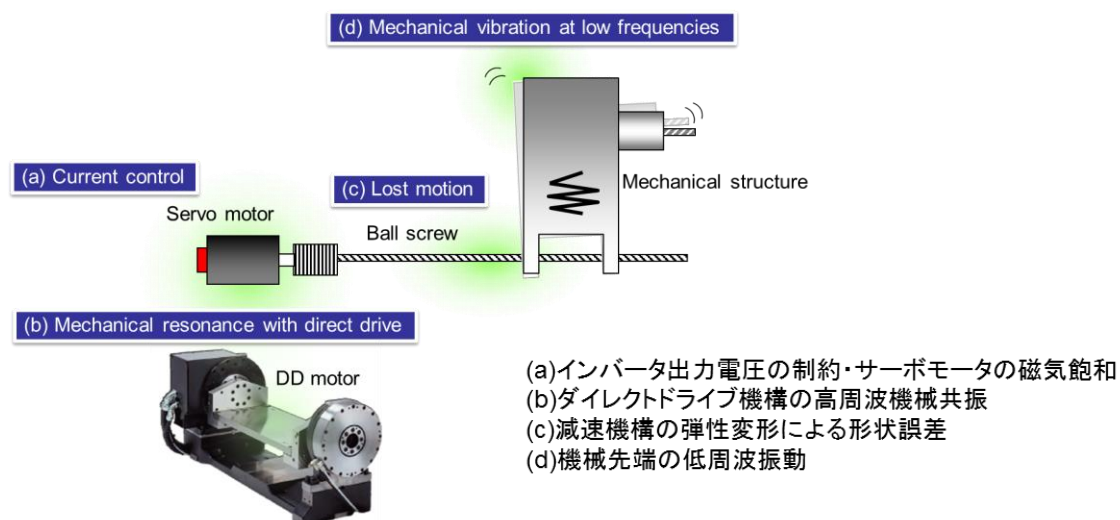
## 論文の内容の要旨

論文題目 工作機械送り軸の高精度駆動のためのサーボモータの制御方法に関する研究

氏名 岩 下 平 輔

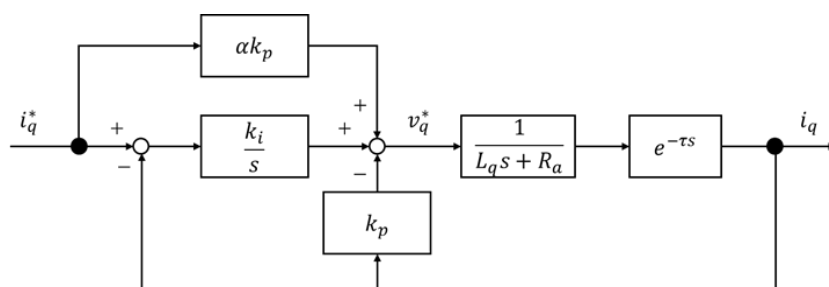
本論文は「工作機械送り軸の高精度駆動のためのサーボモータの制御方法に関する研究」と題し、精度向上の要求が年々高まる金属ワークの加工に関し、まず、インバータ出力電圧の制約及び大電流時に発生する PMSM の磁気的な飽和を考慮した電流制御パラメータ決定手法を提案し、次に、ダイレクトドライブ機構で速度制御をハイゲイン化する際に顕在化する観測ナイキスト周波数を超える高周波共振の正確な計測と制御手法と、更に、減速機構において発生する弾性変形のリアルタイムの推定と補償手法、および低剛性駆動軸における低周波振動の低減手法を提案しその有効性を実験にて検証し、量産の NC 工作機械の送り軸の高精度駆動のためのサーボモータの制御方法に関する一連の研究まとめたものである。

1 章（緒論）では、生産現場で実際に使われている工作機械を構成する各要素の定量的に俯瞰し、その上で運動精度を阻害する要因を、電気・機械の両面から明らかにし、電動機と機構部を統一的に取り扱う観点から高精度化を実現する際の課題を指摘した。



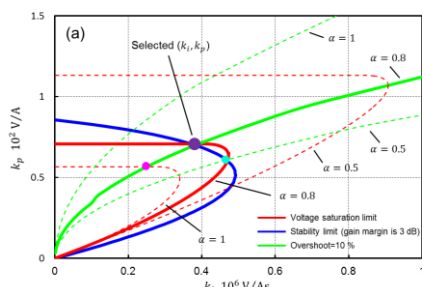
2 章（電圧飽和を回避し磁気飽和を考慮した電流制御パラメータ決定法）では、PMSM の代表的な非線形特性である電圧制限及び磁気飽和を考慮し、高精度な輪郭制御を実現するための電流制御パラメータの決定法を提案した。電圧が制限されない範囲で安定かつ高応答な電流ゲイン及び I-P 制御と PI 制御の中間的な特性を与える PI 率を導入し、また磁気飽和の

影響を考慮するために電流依存で電流ゲインを可変にすることで、回転型のモータとリニアモータと特性の異なる2種のモータで安定かつ高応答な電流制御パラメータを得ることができた。本手法をNC工作機械に適用し、PMSMの高精度駆動による高精度加工が実現できた。



PI率  $\alpha$  により I-P 制御と PI 制御の中間的な特性を実現

### リニアモータの場合



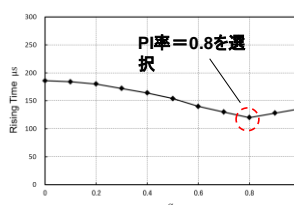
回転形モータと同様の手順で立ち上がり時間が最短となるゲインを決定

- PI率=1.0: **ピンク点**
- PI率=0.8: **紫点**
- PI率=0.5: **水色点**

### モータ諸元

Description	Value	Unit
Armature resistance (per phase)	0.33	$\Omega$
Inductance on q axis	4.70	mH
Rated current	7.99	A <sub>rated</sub>
Maximum current ( $i_{max}$ )	70.71	A <sub>max</sub>
Input voltage (AC)	200	V <sub>max</sub>

### 各PI率における立ち上がり時間の最短値

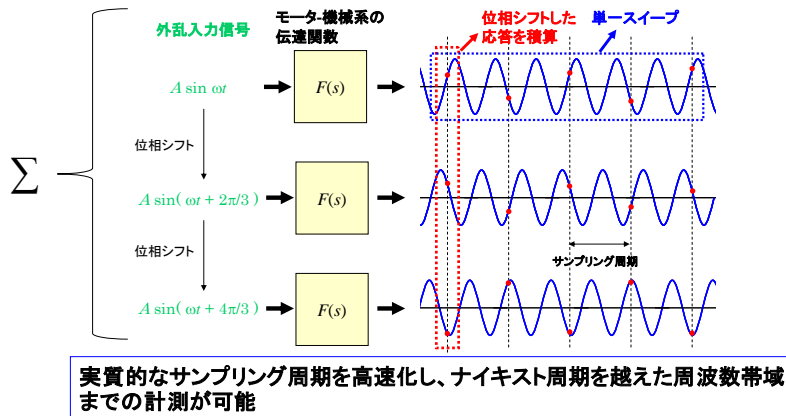


高インダクタンス値の軸付きリニアモータでは、PI率( $\alpha$ )=1より小さい場合に立ち上がり時間が最短

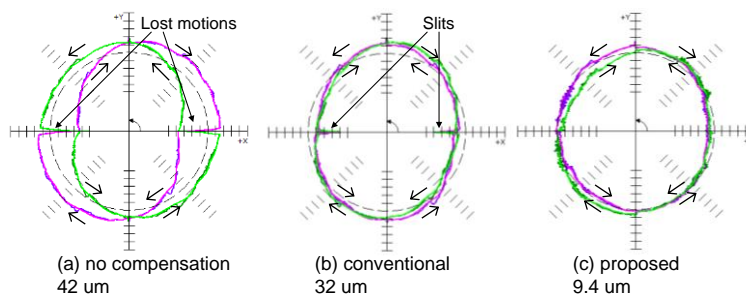
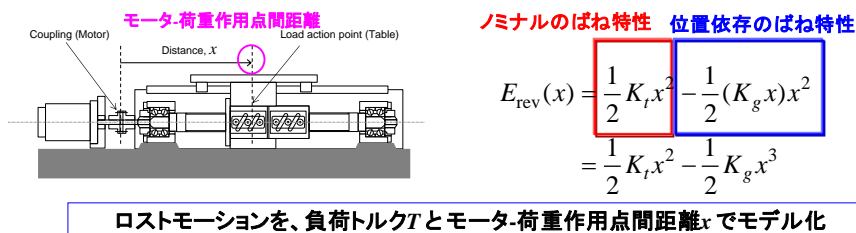
3章(高周波機械共振の計測及び制御法)では、電流応答を高めた場合にダイレクトドライブ駆動機構で発生する制御周期のナイキスト周波数を超える周波数の機械共振をノッチフィルタによって除去するための周波数応答測定方法を提案した。具体的には、新たに掃引信号を位相シフトして複数回で行う手法を導出し、その実現方法を示した。小形のNC工作機械のダイレクトドライブモータを使用した回転テーブル駆動系において、高周波共振が鮮明に特定できた。その結果、速度ループに設けたノッチフィルタを用いて実際にその共振モードを解消し、ハイゲイン化時に顕在する異音も解消できることを示した。連続軌跡精度である回転むらを低減し、提案する周波数応答の計測法の有用性と有効性を検証した。

### 複数回掃引による周波数応答算出

提案法： サンプル点に対して、外乱入力位相を等間隔にシフトして、掃引を行い結果を積算

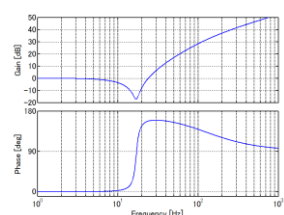


4章（ボールねじの静特性に起因するロストモーションの補償による高精度軌跡制御法）では、ボールねじ駆動軸において主要な誤差要因であるロストモーションに対して従来型の補償法の問題点を指摘した、また、新たにロストモーションをばね特性がテーブル位置によって変化するモデルとみなし、これを弾性変形として容易に計算可能な式によって記述し、そのモデルの特性値を簡便に決定する手法、およびそのモデルを利用したロストモーション補償法を提案した。検証用の実験装置において、提案手法によって円弧補間動作における切込みの問題を解消した。その結果、ロストモーションを適切に補償できること、その結果として軌跡精度が向上できることを示した。さらにテーブル位置、積載荷重、および送り速度がロストモーションに及ぼす影響を測定し、提案した補償法によっていずれの条件変更に対しても適切な補償が可能であることを示した。また大形の NC 工作機械においても、円弧補間動作に対する提案手法の効果を確認した。

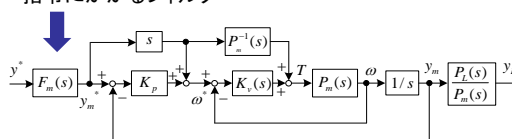


5章（送り軸の2慣性系モデルによる低周波振動抑制制御法）では、低剛性機構の高精度化手法をセミクロードとフルクロードに分けて提案した。上位装置が出力する指令点列に対し、機械先端を追従させることを目的とし、2つの振動抑制フィルタを提案した。1つはセミクロード制御用で、もう1つはフルクロード制御用である。セミクロード制御では位置指令を補正するフィルタを、フルクロード制御では速度指令を補正するフィルタを挿入することで、2慣性系のモータにおける角度誤差を許容し、負荷における角度誤差を大きく低減できることを示した。その結果、加工面に現れる加減速の影響も低減することができた。

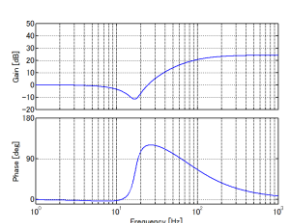
### セミクロード制御 フィルタ設計結果



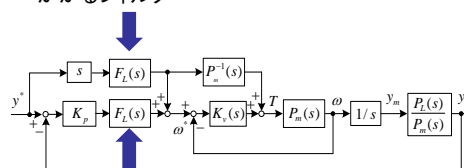
指令にかかるフィルタ



### フルクロード制御 フィルタ設計結果



フィードフォワード制御とフィードバック制御に  
かかるフィルタ



→セミクロード制御には指令の未来値を用いた高い位相回復と高周波ゲインを有するフィルタを設計  
フルクロード制御には位置制御の安定性維持のため高周波のゲインを抑えたフィルタを設計

6章（結論）では、本論文の成果を要約しまとめるとともに、その限界と今後の課題の紹介を行った。今後の課題は主に、ワークの質量変化への対応、付加センサの利用、高い時数での送り軸のモデル化が挙げられ、今後も解決のための研究を継続する。

以上、本論文は、電動機と機構系の両方の視点の視点に立ち、汎用的な工作機械の機構部、サーボモータおよびその駆動ドライバの条件の下で工作機械の送り軸の高精度化のためのサーボモータの制御方法の提案を行い、実例によって有効性を示す内容となっている。

以上