

汎用デジタル制御形磁気軸受システムの開発

宮川裕豊 谷口学

Development of Active Magnetic Bearing System with Digital Control

Y. MIYAGAWA M. TANIGUCHI

The active magnetic bearings(AMB) are used for several high speed machine spindles. In KOYO, the digital controlled AMB system has been developed with the latest technology of digital signal processor(DSP).

The digital control has some advantages mentioned in this paper, and it is possible to apply them to several AMB systems.

This paper presents the structure, functions and advantages of the digital controlled AMB system.

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. はじめに | 3.2 FFCによる慣性中心制御 |
| 2. デジタル制御形磁気軸受の構成 | 3.3 ゲインスケジュールコントロール |
| 2.1 5軸制御形磁気軸受 | 3.4 シリアルインターフェースによる遠隔監視 |
| 2.2 デジタル制御形磁気軸受の構成 | 3.5 磁気軸受システムの小型化, コストダウン |
| 2.3 制御系の設計 | |
| 3. デジタル制御の特徴 | 4. 応用製品 |
| 3.1 高次数コントローラによる安定制御 | 5. おわりに |

1. はじめに

制御形磁気軸受(以下AMBと称す)はその非接触支持, メンテナンスフリー等の特徴から, 高速回転機器の軸受や低損失軸受として採用されている。現在当社では, ターボ分子ポンプ用の磁気軸受¹⁾を量産しており, その他にも工作機械用スピンドル²⁾³⁾や電力貯蔵用フライホイール⁴⁾, コンプレッサ用等の磁気軸受システムの開発を行っている。このように磁気軸受の用途が多岐に広がりつつあるため, 汎用性があり, 複雑構造の回転体に対しても安定に磁気浮上させることができるコントローラの開発が望まれている。

そこで当社では, 従来の磁気軸受制御の主流であったアナログ回路によるPID制御方式を経て, DSP(デジタルシグナルプロセッサ)を組み込んだDSPコントロールボードによるデジタル制御方式への開発を進めてきた。デジタル制御方式では, 高次数の制御系設計が容易であり, さらにDSPコントロールボードに内蔵されているフラッシュメモ

リのコントロールパラメータを書き換えることによって多種のAMB装置に対応可能であり, 汎用性が増している。

本報では当社が開発を進めてきたデジタル制御形磁気軸受の構成, 機能, 特徴について述べる。

2. デジタル制御形磁気軸受の構成

2.1 5軸制御形磁気軸受

5軸制御形磁気軸受の構成を図1に示す。5軸制御形磁気軸受とは, XおよびY軸方向の回転, 並進運動, Z軸方向の並進運動の5自由度を制御する軸受を指す。各電磁石に供給される制御電流は, 各変位センサにより検出された主軸の変位信号をもとにDSPで演算された制御信号により決定される。また, 互いに対向配置された電磁石はその吸引力の線形化を保つため, あるバイアス電流を基準に制御電流が供給されるシステムとなっている。

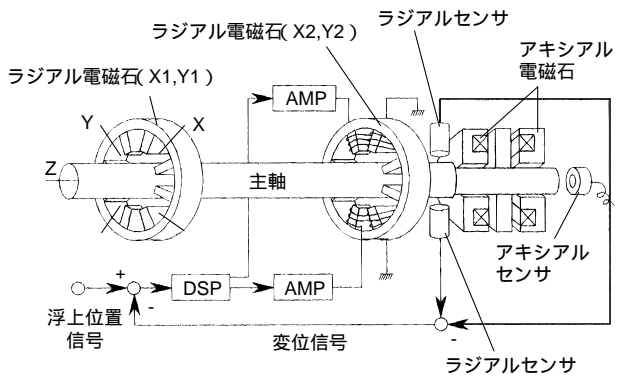


図1 制御形磁気軸受の構成
Structure of AMB

2.2 デジタル制御形磁気軸受の構成

デジタル制御の構成を図2に示す。

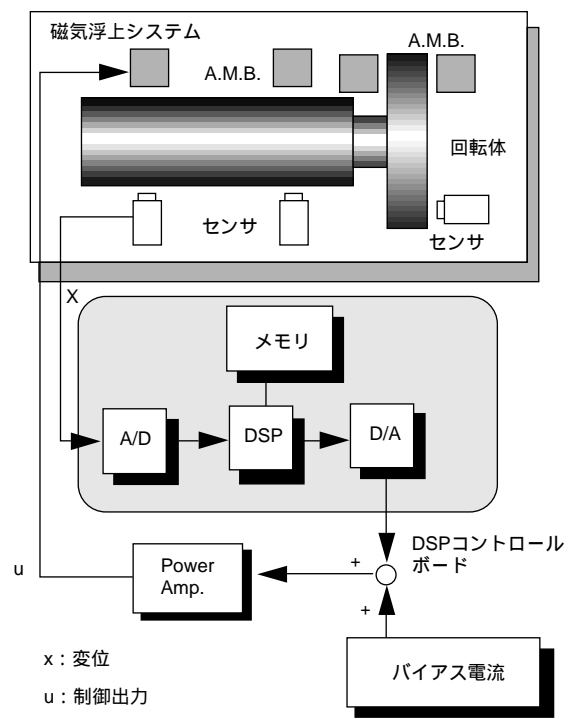


図2 デジタル制御形磁気軸受の構成
Structure of digital controlled AMB

各変位センサからの変位信号はDSPコントロールボード用のA/Dコンバータによりデジタル信号に変換され、DSPにより演算処理された後D/Aコンバータを介し磁気軸受電磁石駆動用パワーアンプにアナログ信号として供給される。

ここで、DSPは近傍に設置されたフラッシュメモリ等に格納されたコントロールパラメータにもとづき信号処理を行う。ソフトウェアのインストール、アップデートは、PCとのシリアルインターフェースにより専用のソフトウェアを介して実施される。

2.3 制御系の設計

磁気軸受制御系の設計最適化は図3の設計手順によって行われる。まず、制御対象である回転体シミュレーションモデルをFEM手法により作成し、次にセンサ回路、フィルタ回路を含めた連続系のコントロールパラメータの伝達マトリクスによるコントローラ設計を行う。これらのシミュレーションデータをもとに磁気軸受システムとしての安定解析、軸受動剛性のシミュレーションを実施し、コントロールパラメータを決定する。シミュレーションの結果例として300ℓ/secクラスのターボ分子ポンプにおける回転体のシミュレーションモデルを図4に示す。

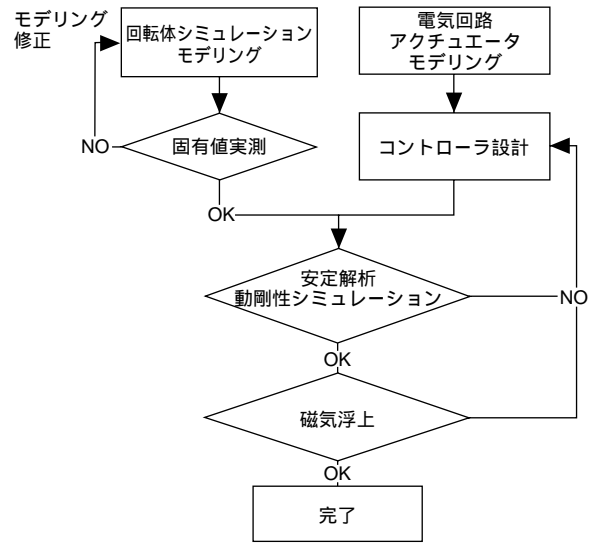


図3 デジタル制御形磁気軸受設計フロー図
Design flow chart of digital controlled AMB

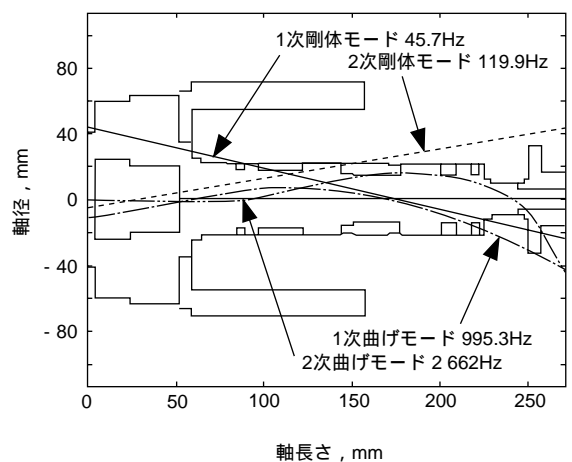


図4 回転体のシミュレーションモデル
Simulation model of the rotor

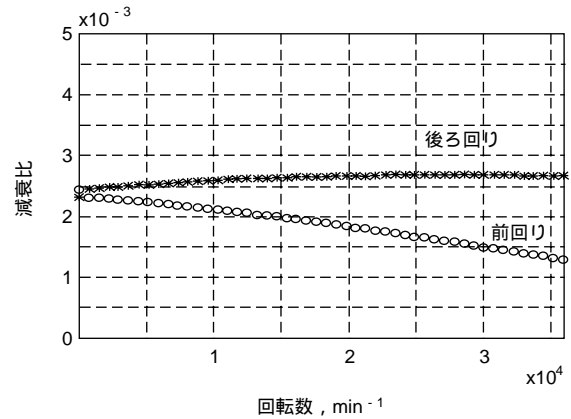
3. デジタル制御の特徴

デジタル制御は、ソフトウェアによりその制御系を構成するため新たなハードウェア追加の必要がなく、そのアプリケーションに対応した制御系設計が容易である。以下にデジタル制御化することによるメリット、特徴について述べる。

3.1 高次数コントローラによる安定制御

従来のアナログ制御回路では、回転体をより安定に支持するために高次元の制御系を実現しようとする、ハードウェアが煩雑になり、電子回路定数の設定、調整が困難になる。一方、デジタル制御ではそのコントローラ設定が、図4に示すようにあらかじめシミュレーションモデルにおいて決定したフィードバック系伝達マトリクス係数をDSPコントロールボード上のフラッシュメモリにインストールすることで実現される。それにより高次数コントローラの実現においてもソフトウェア上のパラメータ設定により変更でき、従来のハードウェア追加等が全く不要となる。

例として、図5に300ℓ/secクラスのターボ分子ポンプにおいて、従来のアナログ回路によるコントローラとデジタル制御を用いて設計したコントローラでの安定性解析の結果を示す。各図は回転時の回転体の1次曲げモードについての減衰比を表している。固有振動数は回転により発生するジャイロ作用により回転数の上昇とともに前回りと後ろ回りの固有振動数に分岐する。特に1次前回り曲げモードに対してはデジタル制御の高次コントローラの方が減衰比が大きく、安定であることが分かる。



(2) デジタルコントローラ

図5 1次曲げモード減衰比

Damping ratio of first bending mode

3.2 FFCによる慣性中心制御

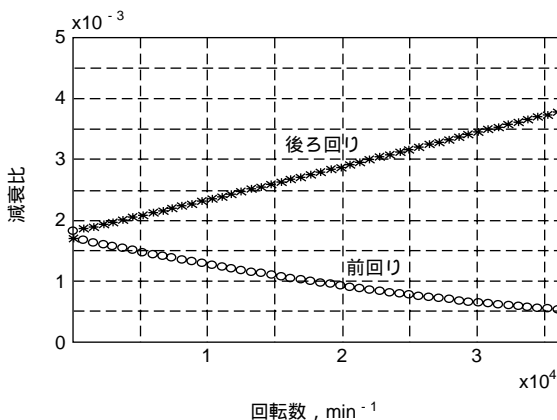
回転体は一般に、幾何学的中心で回転させられることが多い。その結果、回転体の残留アンバランスは回転数の上昇とともに増加し、ハウジング等の振動となって発生し、用途によっては悪影響をもたらすことが多い。

従来のアナログ制御回路ではノッチフィルタ等により残留アンバランスを制御していた場合が多く、ある回転数領域のみで慣性中心制御を実現していた。

一方、磁気軸受支持による回転体は、特殊制御により回転体の残留アンバランスに左右されない回転体の慣性中心回りに回転させることが可能である。

デジタル制御においては、従来の方式とは全く異なるFFC(フィードフォワード制御)方式により回転数に追従した慣性中心制御が可能であり、さらに低回転領域(50sec⁻¹程度)から実現できる。

図6にFFCがON, OFFされた場合の回転体振れ回り量と、その制御電流の比較を示す。特にFFCがONされることにより、回転体の振れ回り量は約半分に改善される。この慣性中心制御はアンバランスキャンセル制御ともいわれハウジング側に振動を発生させないのが特徴である。



(1) アナログコントローラ

図5 1次曲げモード減衰比

Damping ratio of first bending mode

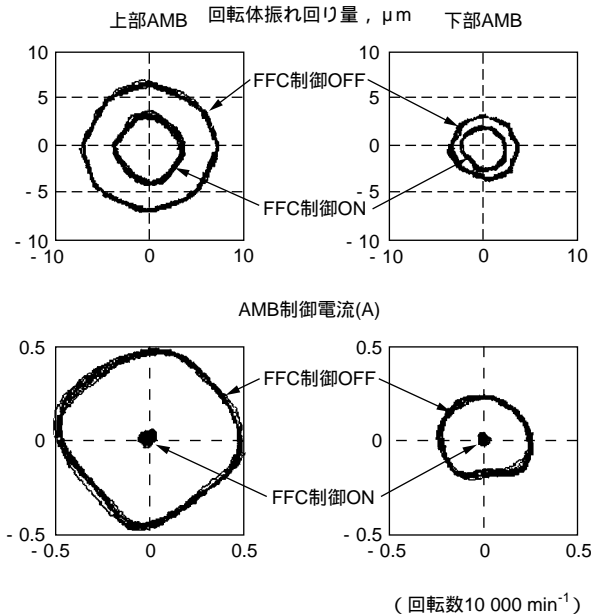


図6 FFCによる回転体振れ回り
Rotational runout by FFC

3.3 ゲインスケジュールコントロール

デジタル制御ではDSPの演算能力を利用して、ジャイロ補償器のフィードバックゲインを回転数に応じて最適値に変化させることが可能であり、より安定な回転が得られる。

図7にジャイロ補償器ゲインを低回転時と高回転時に切替えた時の安定性を解析した結果を示す。低回転時のコントローラでは、ジャイロ作用により回転体の1次剛体モード固有振動数が分岐し不安定になっていくが、ジャイロ補償ゲインをある割合で加えた高回転時コントローラでは、減衰比が大きく回復し、より安定になっていることが分かる。

通常デジタル制御ではジャイロ補償器ゲインを回転数に応じて多段階に切替えを行っており、スムーズな切替えを実現している。

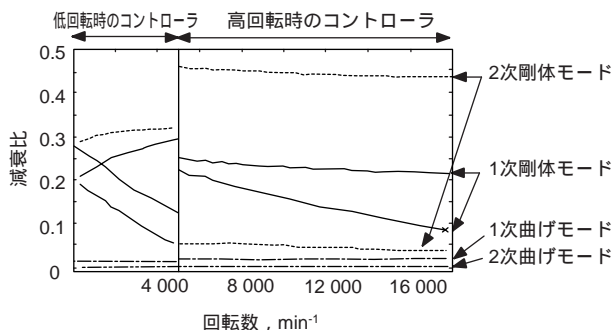


図7 ゲインスケジュールコントロールによる減衰比
Damping ratio with gain scheduled controller

3.4 シリアルインターフェースによる遠隔監視

デジタル制御の最大の特徴は、信号処理をDSPで行っているため、DSPとPCを直接シリアルインターフェースで接続することによってPC上で状態をモニタすることが可能となる点である。

図8に遠隔監視システムの構成を示す。通常RS232Cポートを利用しDSPに直接アクセスし、コントロールパラメータ設定等のチューニングを実施する。また同様に、モデムを利用して通常の電話回線を経由し遠隔地からのモニタ、故障診断、またはソフトウェアアップデートが可能となる。

この機能により、海外のプラントに設置された磁気軸受システムに直接アクセスすることでシステムの故障診断、運転状況のモニタ等がリアルタイムで可能となる。従来、現場調査が必要であった作業も本機能により大幅に削減される。

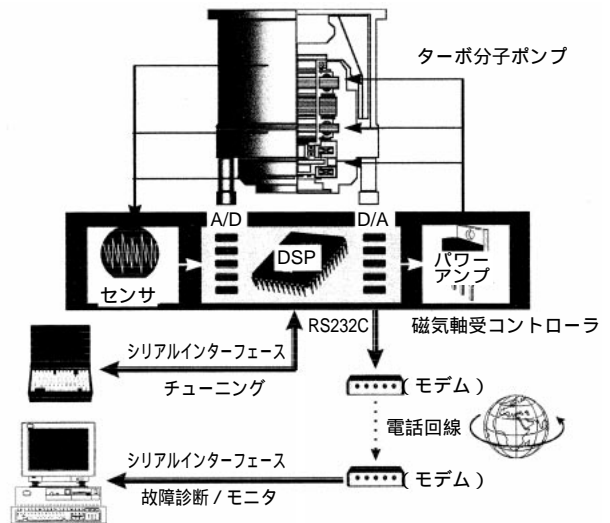


図8 遠隔監視システム
Remote monitor system

3.5 磁気軸受システムの小型化、コストダウン

DSPコントロールボードは全ての磁気軸受システムに使用可能であり、システムの共通化が可能となる。現在、DSPコントロールボードの機能はLED、LCDの直接駆動、磁気軸受センサ回路機能、シリアル通信機能、またインバータコントロール機能までも可能となる。図9にそのシステム概略と図10にDSPコントロールボードの外観を示す。

ほとんど全ての制御をDSPコントロールボードで行うことにより、ハードウェアで構成していた電子回路部を大幅に削減し、コントローラ本体の小型化とコストダウンを実現する。

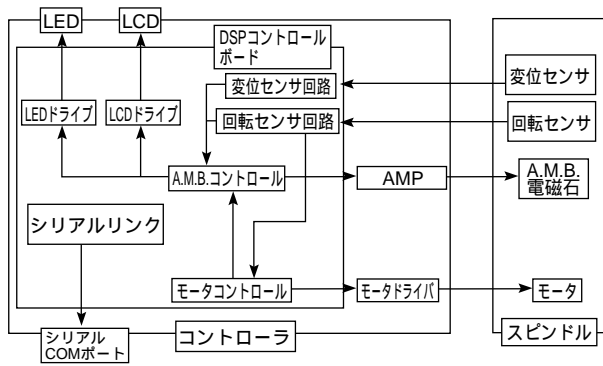


図 9 DSPコントロールボード構成
System of DSP control board

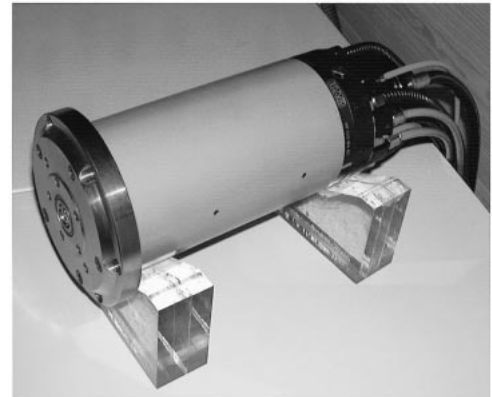


図 12 工作機器スピンドル
Machine tool spindle

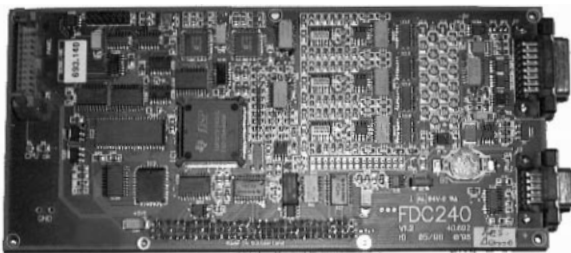


図 10 DSPコントロールボード
DSP control board

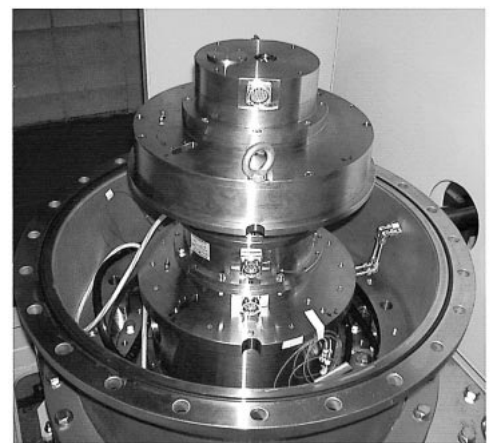


図 13 0.5kWh 級 FW システム
0.5kWh class FW system

4. 応用製品

代表的な当社の磁気軸受応用製品としては、

- ①ターボ分子ポンプ，ドラッグ分子ポンプ
- ②工作機械用スピンドル
- ③フライホイール電力貯蔵装置

等が挙げられる。

上記はいずれもDSPコントロールボードによるデジタル制御方式で一部製品化されており、今後さらにデジタル制御の機能を生かした製品開発を行う予定である。図 11 ~ 13 にその代表的なデジタル制御応用製品を示す。



図 11 ターボ分子ポンプ(2 000 ℓ/sec クラス)
Turbo Molecular Pump(2 000 ℓ/sec class)

5. おわりに

当社が磁気軸受の研究開発に携わって以降、時代の要求、技術の進歩に合わせてアナログ制御方式の開発を経て早々にデジタル制御方式へと開発を進めてきた。

顧客からの要求、製品性能の向上、機能充実を考慮するとデジタル制御方式は最も適した方法であり、今後他のアプリケーションへの応用も期待される。

参考文献

- 1) 光洋精工(株)：制御形磁気軸受スピンドル CAT. NO. 133-3.
- 2) IBAG Zurich AG:商品カタログ(High Frequency Motor Spindles with Active Magnetic Bearings for Milling, Drilling and Grinding).
- 3) 谷口 学, 上山拓知：KOYO Engineering Journal, no. 151 (1997) 41.
- 4) 高畑良一, 上山拓知, 宮川裕豊, 亀野浩徳：KOYO Engineering Journal, no. 151 (1997) 12.

筆 者



宮川裕豊*
Y. MIYAGAWA



谷口 学*
M. TANIGUCHI

*総合技術研究所 基礎技術開発センター
機械システム開発部