

HDD 生産ラインにおける多目的最適化手法の応用

Application of Multi-objective Optimization Method to HDD Production Lines

石原 義之

■ ISHIHARA Yoshiyuki

HDD (ハードディスクドライブ) の高精度かつ安定なヘッド位置決め制御を実現するためには、ヘッド支持部の機械共振特性を考慮した制御パラメータの調整が欠かせない。しかし従来の手作業によるパラメータ調整方法では、量産時に個体ごとの機械共振特性のばらつきに十分対応することが難しく、ヘッド位置決め制御が不安定な不良品の発生が問題となっていた。

そこで東芝は、多目的最適化手法を用いて、生産ラインで個体ごとの機械共振特性に合わせて制御パラメータを自動調整する技術を開発した。組立てが終了したHDDで調整されたパラメータはメモリに書き込まれ、出荷後、電源投入時に読み込まれて制御に用いられる。この技術は当社HDDの生産ラインに適用され、歩留り向上に貢献している。

In the head positioning control system of a hard disk drive (HDD), it is necessary to facilitate parameter tuning of the multi-stage notch filters taking into consideration the mechanical resonance modes of the head supporting mechanism for the realization of high accuracy and high stability. However, as conventional manual parameter tuning makes it difficult to adjust variations in the mechanical resonance characteristics of individual HDDs, the occurrence of defective products during mass production caused by unstable head positioning control is an important issue.

To overcome this problem, Toshiba has developed an autonomous parameter tuning technology for notch filters that conforms with the mechanical resonance characteristics of individual HDDs using a multi-objective optimization method. Parameters tuned in assembled HDDs are written to the flash memory of each HDD in the production line, and are read and used for head positioning control when the HDD is turned on after shipping. This technology is contributing to the improvement of yield in our HDD production lines.

1 まえがき

HDDの記録密度向上には、磁気ヘッドを高精度かつ安定に目標トラックへ位置決めすることが重要である。位置決め精度は位置決めフィードバック制御の高ゲイン化により向上するが、高ゲイン制御はヘッド支持部の機械共振を励起し不安定になりやすい。そこで、機械共振周波数で制御ゲインを局所的に低減するノッチフィルタをフィードバックループに複数段挿入し、高ゲイン化と安定性の両立を図る。

ノッチフィルタは制御系の安定性を高める効果を持つが、その反面、フィードバックループの位相遅れを増大させ、高ゲイン化を阻害する。また、ノッチフィルタのパラメータは挿入する段数に比例して増加し、各々が相互作用して全体のフィルタ特性に影響を及ぼす。そのため、ノッチフィルタのパラメータ調整は難しく、高ゲイン化と安定性を両立するフィルタ特性を得るためには、技術者の経験と勘に基づく試行錯誤的な調整によらざるをえなかった。

一方で、ヘッド支持部の機械共振特性はHDDの個体ごとにばらつきが生じるため、ノッチフィルタのパラメータも個体ごとに調整することが望ましい。しかし従来、パラメータ調整は手作業で行っていたため、生産規模の大きいHDDでは個体ごとの調整は事実上不可能であった。そのため、事前に見積もったばらつき範囲内で安定性が確保されるように調整し

たパラメータを、量産される全台数で共通に使用していた。この方法では、見積りから外れた特性を持つ個体が生産されると、ノッチフィルタでは機械共振の励起を防止できず、位置決め制御ができない不良品となってしまう。この現象は、HDDの記録密度向上に伴って制御系高ゲイン化への要求が厳しくなるに従い顕在化し、歩留り悪化の一因となっていた。

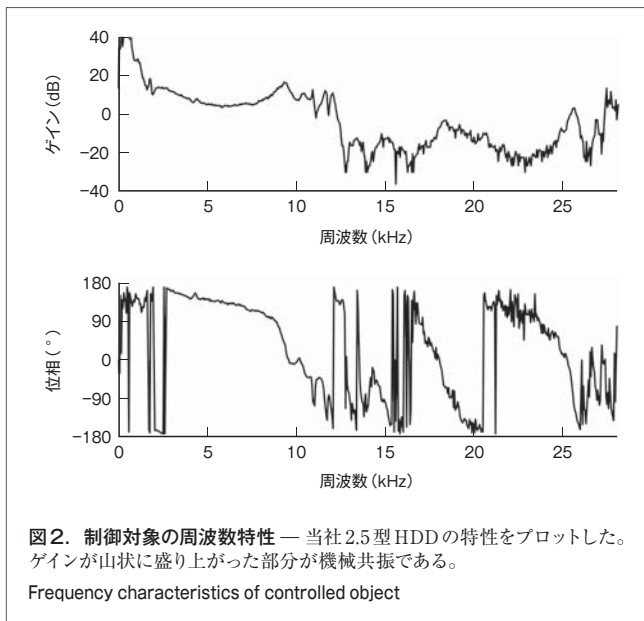
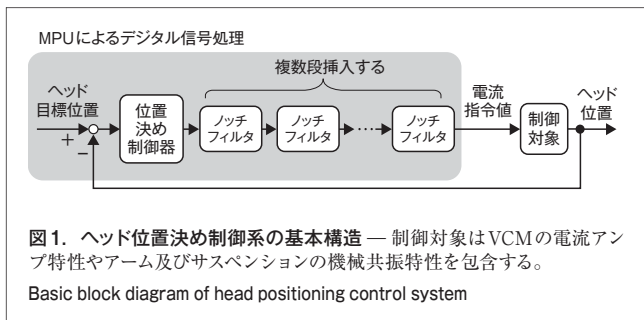
そこで東芝は、多目的最適化手法を用いて、生産ライン上で個体ごとの機械共振特性に合わせてノッチフィルタのパラメータを自動調整する技術を開発した。ここではヘッド位置決め制御系におけるノッチフィルタの役割と、今回開発した技術の概要について述べる。

2 ヘッド位置決め制御系

2.1 位置決め制御系におけるノッチフィルタ

HDDのヘッド位置決め制御系は、ディスク上に記録されたヘッド位置情報を基にアームを駆動するボイスコイルモータ(VCM)への電流指令値を決定するフィードバック制御系である(図1)。この電流指令値に従って電流アンプからVCMに電流が供給され、アーム先端に取り付けられた磁気ヘッドは目標トラックに位置決めされる。したがって、VCMへの電流指令値からヘッド位置までが、フィードバック制御系における制御対象となる。

制御対象の周波数応答の一例を図2に示す。9 kHz以上の周

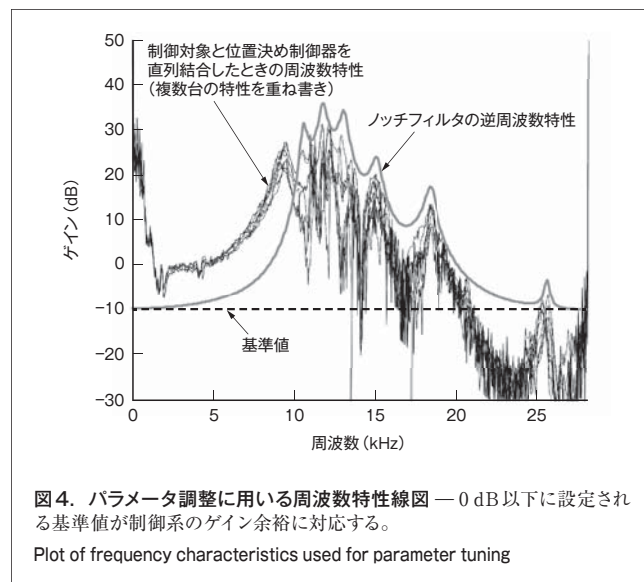
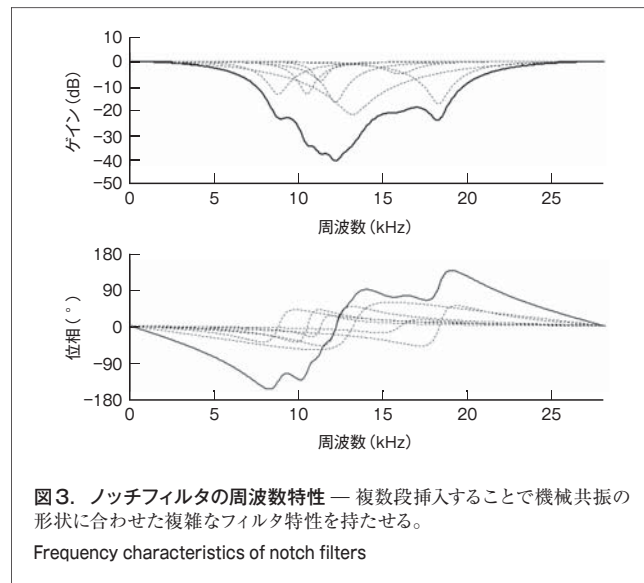


波数帯域に、ヘッドを支持するアーム及びサスペンションの弾性変形による機械共振が複数存在することがわかる。ノッチフィルタはこの機械共振の励起を防止するためフィードバックループに複数段挿入される。また、位置決め制御器は、位相遅れ補償器と位相進み補償器で構成され、主に位置決め精度を調整する機能を担う。ノッチフィルタと位置決め制御器の機能はHDD装置内のマイクロプロセッサユニット (MPU) による演算によって実現される。

ノッチフィルタの周波数特性の一例を図3に示す。図中点線がノッチフィルタ1段ずつの特性、実線が複数段挿入した場合の全体の特性を示している。ノッチフィルタの周波数特性を決定するパラメータはノッチ周波数、幅、深さの三つであり、挿入される段数分調整を行う必要がある。

2.2 ノッチフィルタのパラメータ調整

従来のパラメータ調整作業では、制御対象と位置決め制御器を直列結合した場合の周波数特性に、ノッチフィルタの周波数特性を上下反転した特性 (以下、逆周波数特性と呼ぶ) を重ね書きした図が用いられる (図4)。この図において、ノッチフィルタの逆周波数特性が機械共振のはみ出しがないように覆えていれば、制御系の安定性が確保される。また、図4のように複数台の機械共振特性を重ね書きし、全ての機械共振



を覆うように調整することで、機械共振のばらつきに対してある程度のロバスト安定性を確保できる。

安定性の面から言えば、ノッチが深く幅の広いフィルタ特性が好ましいが、反面、高ゲイン化を阻害するフィードバックループの位相遅れを増大させてしまう。したがって、安定性と高ゲイン化を両立させるためには、ノッチフィルタの逆周波数特性が機械共振のはみ出しがない範囲で、ノッチ深さと幅を最小限に抑える必要がある。

3 多目的最適化を用いた自動調整技術

ノッチフィルタのパラメータ調整は、制御系の安定性と位置決め精度のトレードオフをバランスさせる多目的最適化問題に他ならない。そこで、安定性と位置決め精度を定量評価する目的関

数を設定すれば、その目的関数を数値計算で最小化することで、ノッチフィルタパラメータを自動的に定めることができる。

3.1 安定性を評価する目的関数

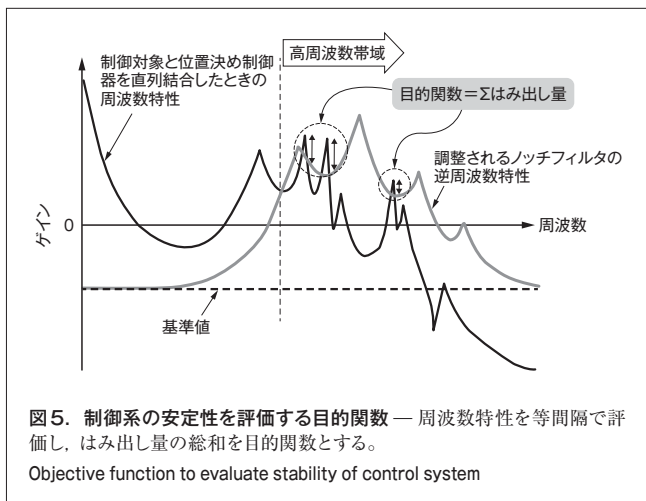
安定性を確保するためには、図4においてノッチフィルタの逆周波数特性が機械共振のはみ出しがないように覆う必要があった。見方を変えると、はみ出す量を小さくするようパラメータを調整すればよい。そこで、機械共振が存在する高周波数帯域におけるはみ出し量の総和を制御系の安定性を評価する目的関数として設定する(図5)。

3.2 位置決め精度を評価する目的関数

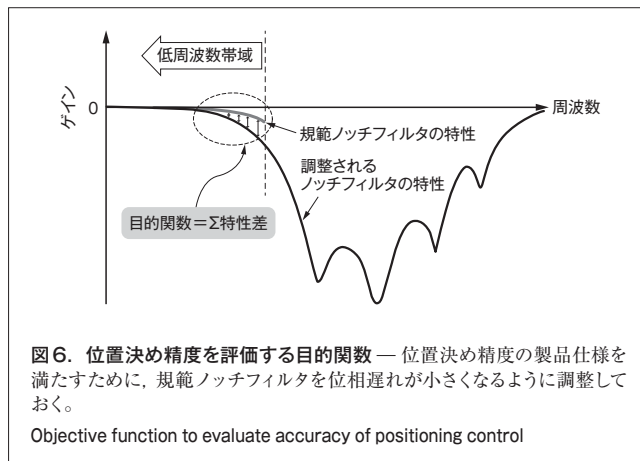
位置決め精度は、位置誤差の要因となる外乱が集中する低周波数帯域における制御系の感度特性^(注1)で決定される。個体ごとにノッチフィルタのパラメータを調整すると、制御系の感度特性も個体ごとに変動し、位置決め精度にばらつきが生じてしまう。そこで、位置決め精度の仕様を満たすよう調整した規範ノッチフィルタを用意し、規範ノッチフィルタと個体ごとに調整されるノッチフィルタの、低周波数帯域における特性が一致するようにパラメータ調整を行う(図6)。この場合、両者の周波数特性差の総和が位置決め精度を評価する目的関数となる。

3.3 遺伝的アルゴリズム

3.1節と3.2節の目的関数はトレードオフの関係にあり、その最小化が十分に進んだ領域では、一方の目的関数値を改善しようとしたとき、他方を改悪せざるをえない状態となる。このような状態にあるパラメータ(解)をパレート解と呼び、目的関数間のトレードオフがバランスする範囲に多数存在する。したがって、多目的最適化問題の解法には、多数存在するパレート解を効率よく探索できることが求められる。そこで今回、パレート解を求めるのに有効な遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)を用いることにした。GAは世代交代ごとに優れた親の特長を子に引き継ぐという生物の進化過程を模擬する



(注1) フィードバック制御系の外乱抑圧率を表す。位置決め制御器、ノッチフィルタ、及び制御対象の周波数特性で決定される。



ことで最適解を探索する手法であり、様々なバリエーションのアルゴリズムが提案されている。今回は、生産ラインでのパラメータ調整が短時間で終了するよう、計算時間の短縮に主眼を置いてカスタマイズしたGAを用いた。

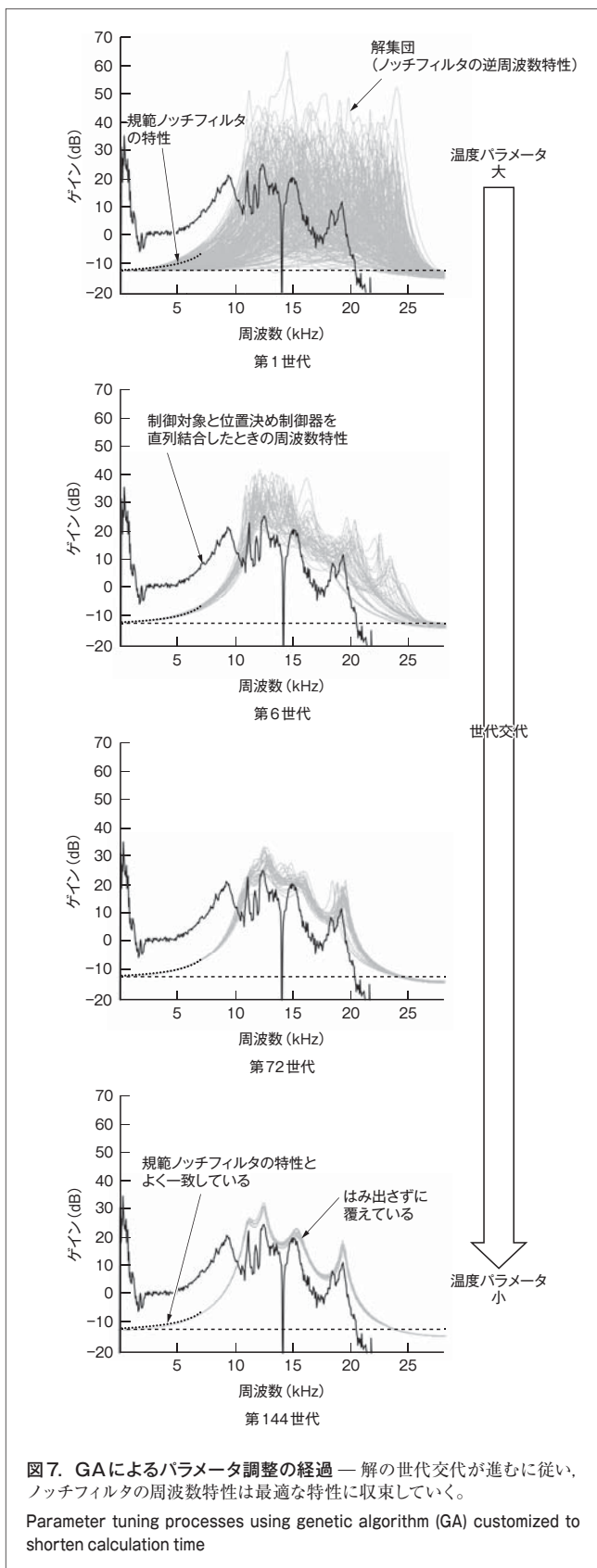
具体的には、子世代の解を生成するための交さや突然変異の操作を省略して計算量を減らす一方、世代交代に伴って低下する温度パラメータを新たに導入した。子世代の解は親世代の解を中心に温度パラメータで規定される範囲にランダムに生成する。温度パラメータの低下に伴って子は優秀な親の近傍に生成されるため、解集団は世代交代ごとに最適解に収束していく。この操作に必要な計算は、乱数の生成と加算だけであり、短時間で実行できる。

以上のGAによるパラメータ調整で、解集合が世代交代に伴いどのような経過をたどるか、周波数応答の変化で確認した(図7)。探索の初期段階(第1世代の解集団)では、各パラメータはランダムに設定されている。そのため、規範ノッチフィルタとの周波数特性の差が大きく、ノッチフィルタの逆周波数特性には機械共振のはみ出しがある解や、過度に大きく覆ってしまう解も多数含まれる。その後、解集団の世代交代が進むにつれて、低周波数帯域で規範ノッチフィルタとよく一致し、高周波数帯域では機械共振のはみ出しがないように覆うノッチフィルタの特性に収束していくようすがわかる。

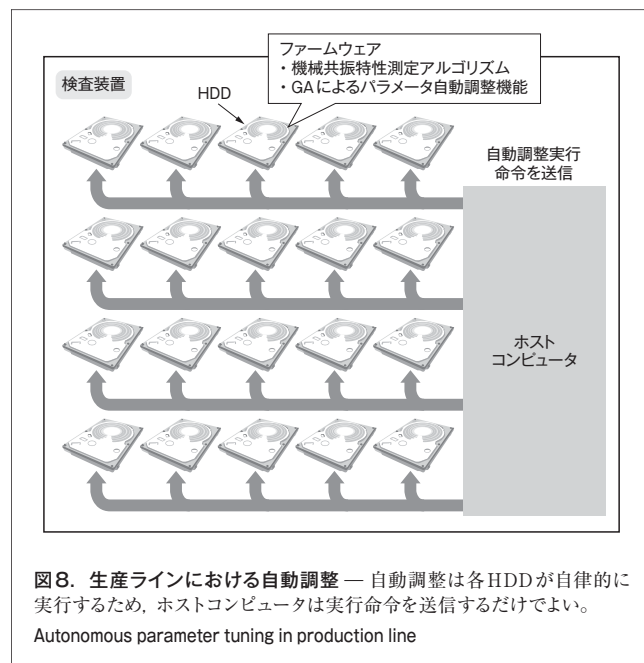
以上のGAによるパラメータ調整機能に加え、機械共振特性を高速に測定するアルゴリズム⁽¹⁾も開発した。これらの機能はHDDのファームウェアにプログラムとして搭載し、パラメータ自動調整に関わる全ての数値計算をHDDのMPUで実行するようにした。この方法は、新たな計算機を生産ラインに設備導入する必要がないという利点があり、技術の実用化におけるキーポイントとなった。

4 生産ラインにおける運用

組立てが終了したHDDは専用の検査装置に挿入され、各



種の製品検査が行われる。検査装置には複数台のHDDが同時に挿入でき、各HDDに各種検査の実行命令とその結果



を送受信するホストコンピュータが備わっている(図8)。各HDDは、ホストコンピュータからの自動調整実行命令を受信すると、まず機械共振特性の測定を実行し、その結果に基づきノッチフィルタのパラメータ自動調整を実行する。調整終了後、得られたノッチフィルタパラメータはファームウェアが格納されるフラッシュメモリに書き込まれる。出荷後のHDDは電源投入時にこのパラメータを読み込み、ヘッド位置決め制御を実行する。

5 あとがき

多目的最適化を用いて、HDDのノッチフィルタパラメータを個体ごとの機械共振特性に合わせ生産ラインで自動調整する技術の概要について述べた。この技術は当社HDDの生産ラインで活用され、機械共振ばらつきに起因する不良品発生を低減させ、歩留りの改善に貢献している。

文献

- (1) 石原義之 他. “簡易で高速なマルチレート系の同定手法とHDDへの応用”. 第58回自動制御連合講演会, 神戸, 2015-11, システム制御情報学会, 2015, 1G2-6.



石原 義之 ISHIHARA Yoshiyuki

研究開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務。HDDなどのメカトロ応用機器の研究・開発に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会会員。Mechanical Systems Lab.