

電子写真感光体ドラムの駆動制御

H ∞ 制御理論と繰り返し制御理論による制御設計

Photoconductor Drum Speed Fluctuation Control in a Electrophotographic Printer

大西 淳*

Onishi, Jun

In an electrophotographic printer, output image quality falls off when the speed of the photoconductor drum fluctuates. To correct for this, we have developed a speed-control system that uses a rotary encoder at the drum axis. For control operation, we used a repetitive control method which effectively removes periodic fluctuation. In this framework, we used a feed-forward method along with phase-lead compensation to further improve control performance, and system robustness was given careful consideration in determining system parameters; for example, the basic feedback system was build based on H ∞ theory. Finally, minimal fluctuation in drum speed in the actual machine was verified with a built-in processor.

1 はじめに

近年、電子写真機器のデジタル化、高解像度化が進み、感光体ドラム速度への精度要求は非常に厳しくなっている。通常モノクロ機ではモーター軸でのPLL制御とフライホイール等による機械的特性の最適化でこの要求に対応するが、カラー機など一層の駆動精度を求める場合には、ドラムの回転速度を検出してのアクティブ制御が有効である。しかし、駆動系の動特性やそのばらつきなどを考慮した適切な制御演算を行わなければ、十分な変動抑制効果が得られないばかりか、不安定現象を引き起こす場合もある。ここでは感光体駆動制御の最適演算アルゴリズムを検討、設計した結果を報告する。

タル制御系である。ステップモーターを採用する理由には、コスト的に有利な点や定常速度変動を生じない点などが挙げられる。正確な定常速度の実現は、繰り返し制御の適用時に、その変動抑制効果を最大限引き出すことになる。

ドラム速度の精度要求は2通りに分類できる。一つはバンディングと呼ばれる出力画像の縞状のムラに関するもので、ムラのピッチに対する人間の可視特性に応じた要求である。もう一つは画像の位置への精度要求で、カラー機の場合には色ずれを防ぐために非常に厳しいものとなる。Fig. 2に精度要求の一例を示す。低周波数側の直線が画像位置の精度要求であり、高周波数側の曲線がムラの可視特性に基づく要求である。

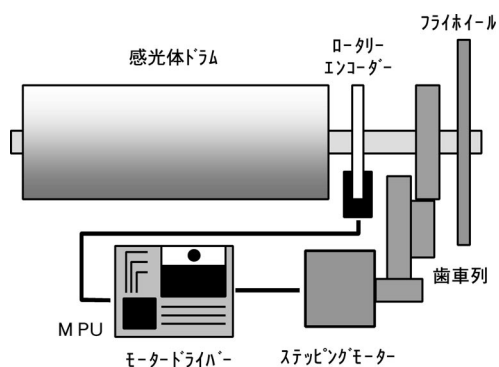


Fig. 1 駆動制御系の構成

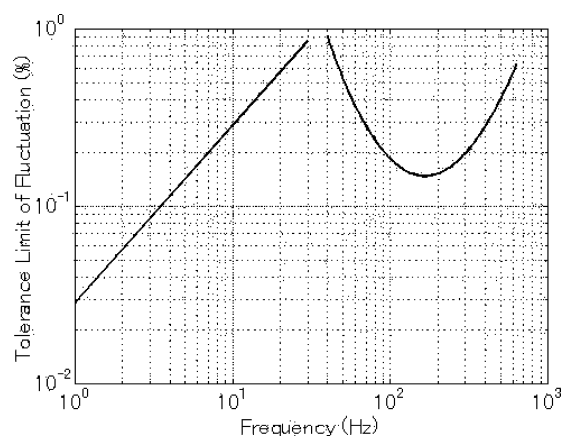


Fig. 2 感光体駆動速度の要求精度

2 ドラム駆動系の概要

駆動系の構成を Fig. 1 に示す。エンコーダーパルス周期を検出して MPU で制御演算を行い、この出力値を周波数変調してステップモーターの駆動パルスとするデジ

ドラム速度の主要な変動要因としては、モーターの精度不良、歯車の偏心、かみ合い異常などが挙げられる。比較的発生周波数の高いかみ合い異常による変動に対しては、今回の検討では制御的に抑制するのではなく、ド

*OD カンパニー CS 統括部 製品評価センター

ラム軸にフライホイールを付与することで対応した。この場合、通常は共振周波数の設定とモーター回転数の関係に制約を生じるが、制御を行う場合にはフライホイールのイナーシャ量を必要最小限に設定することができる。モーターへの速度指示信号からドラム速度への伝達特性を Fig. 3 に示す。約 20Hz に伝達要素に起因する 1 次の共振を確認できる。この特性をむだ時間要素と 2 次遅れ要素で近似したモデルを Fig. 3 に重ねて示す。55Hz 程度までの特性を良く表すモデルが得られていることがわかる。

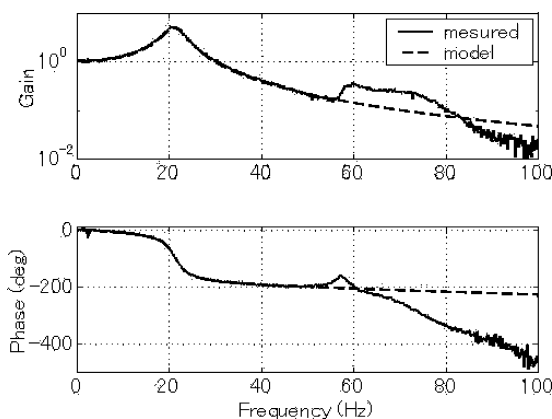


Fig. 3 駆動系と同定モデルの周波数特性

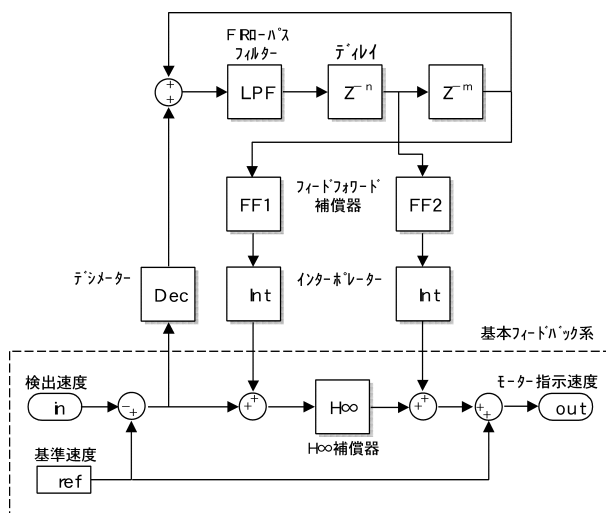


Fig. 4 制御演算の概要

3 制御系の設計

3.1 演算概要

演算処理の概要を Fig. 4 に示す。点線の内側が基本となるフィードバック系であり、これに短期的にはフィードフォワード要素と捉えられる演算を加え、全体として繰り返し制御系を構成している。

競合他社のカー複写機に見られる従来の制御技術¹⁾では、フィードバック制御とドラム回転角度の同期信号を用いたフィードフォワード制御を併用しているが、今回検討した制御方法によれば、ドラム角度の同期信号発生手段が不要であり、また、明らかに変動除去性能の観点から有利と考えられる。

3.2 フィードバック補償器の設計

フィードバック補償器の設計は代表的ロバスト制御理論である H^∞ 理論を用いて行った。量産製品の制御系設計において、機械間のばらつきや経時変化などへの対応は非常に重要であり、これらの摂動を明示的に扱えるロバスト制御理論による設計が望ましい。本検討では感光体ドラムの速度精度要求が周波数領域で表されること、摂動の構造化が難しいことから、特に H^∞ 理論による設計が合理的と考えた。

Fig. 5 に問題設定を示す。入力端外乱を用いた混合感度問題と呼ばれる設定であり、周波数関数 $W_s(s)$ に性能要求を、 $W_t(s)$ に摂動に対する安定性要求を設定し、これらの重みを含めた閉ループ系の ∞ ノルムを最小化する補償器を求める。ここで設定した $W_s(s)$, $W_t(s)$ の周波数特性を Fig. 6 に示す。 $W_s(s)$ は前述の制御要求を近似するように設定し、 $W_t(s)$ は考えられる摂動を覆うように設定した。サーボ性の要求から $W_s(s)$ は原点極を有し、 H^∞ 標準問題の可解条件を満たさないが、極を若干量移動することでこの問題を回避した。

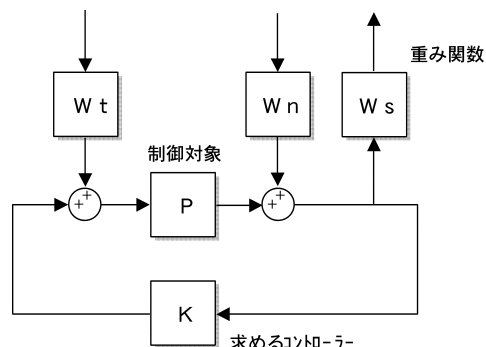


Fig. 5 H^∞ 最適化問題の設定

Fig. 7 に求めた補償器の周波数特性を、Fig. 8 に入力端外乱の出力への影響を示す。ここで、凡例中「full」とあるのは、 γ -イタレーションと呼ばれる数値的探索により得られた7次の補償器であり、「reduced」とあ

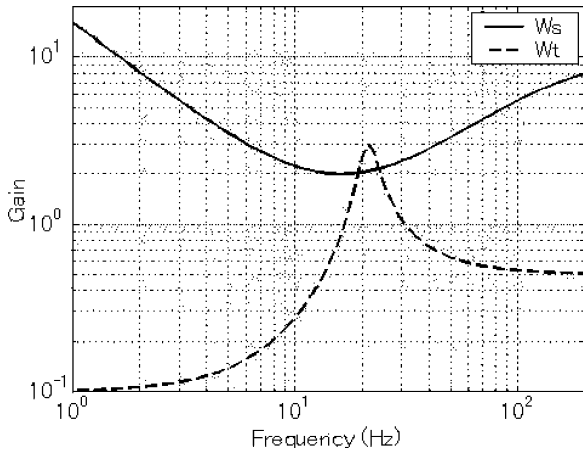


Fig. 6 重み関数の設定

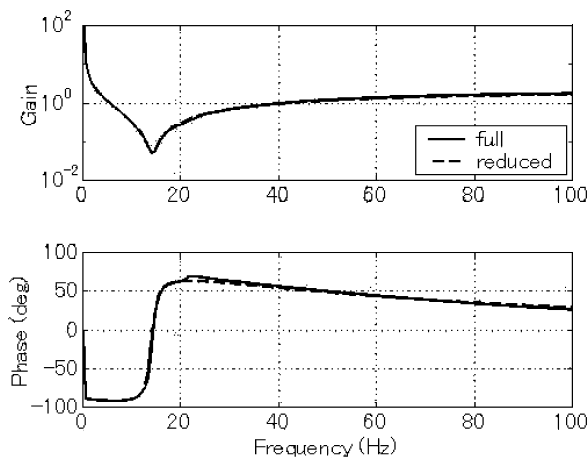


Fig. 7 フィードバックコントローラの周波数特性

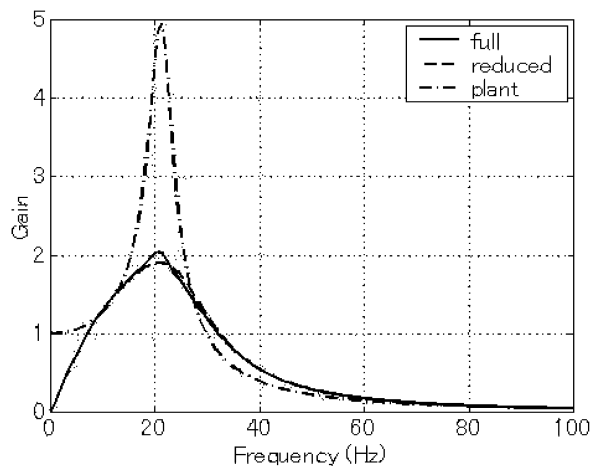


Fig. 8 フィードバック系の感度特性

るのは平衡化実現により2次に低次化した補償器である。これらの図から、摂動の見積もりに対して安定性を確保した上で、1次共振の減衰を大きく、低周波数の感度特性を要求に見合うものにてできていることが確認できる。

3.3 繰り返し制御系の設計

繰り返し制御とは陽子加速器の制御のために開発され、近年、広く産業に应用されている制御方法であり、その基本原理は、むだ時間要素による周期Lの信号発生機構を内部モデルに含ませ、Lに同期した変動に対して非常に高い抑制性能を得るというものである²⁾。ドラム速度の変動要因については前述したが、歯車の減速比を整数化することで大半の変動成分をドラム回転に同期させることができ、従って上記Lをドラム回転周期に設定することで、非常に高い変動抑制性能を得ることができる。

しかし、一般に繰り返し制御の整定時間は長く、ファーストコピー(プリント)タイムによる制約から、これを短縮することが課題となる。このためには定周期信号発生機構を除いた開ループ特性が $1+j0$ に近いことが必要であり²⁾、逆伝達関数補償と繰り返し制御特有のむだ時間を相殺する位相進み補償³⁾⁴⁾によりこの要求を実現した。また、繰り返し制御は時間Lの偏差記憶が必須であるが、組み込み処理系のコスト的観点から、利用するメモリ容量は少ないほど望ましい。ドラムを低速で駆動する場合にこの制約は顕著となるが、ドラム速度に応じて繰り返し補償処理の周期をフィードバック処理と独立に変化させるマルチレート構成として、必要メモリ量を最低限に設定した⁵⁾。

Fig. 9 に入力端外乱の出力への影響を示す。凡例中「feedback」はフィードバック制御のみの場合で、「repeat」は繰り返し制御時の場合である。繰り返し制御時は、フィードバックのみの場合に比べ非定期的な変動の抑制性能に若干のトレードオフを生じるものの、 $k/L(\text{Hz})$ (k : 整数、 $L \approx 0.9\text{sec}$) の変動については、大幅に低減できることが確認できる。

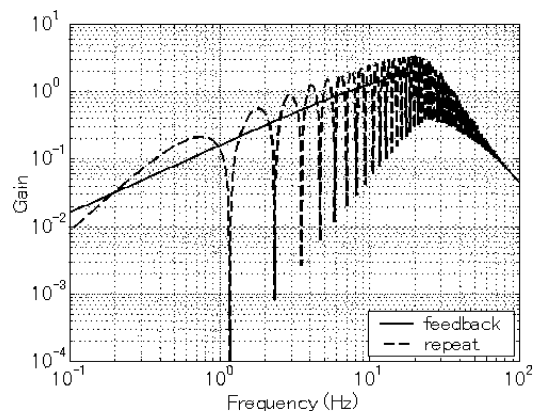


Fig. 9 繰り返し制御系の感度特性

4 実験結果

求めた補償器を組み込み処理系に実装し、実機での実験を行った。実装に際しては、シミュレーションを活用してスケール等を行い、固定小数点CPUの演算処理における性能劣化を最小限にとどめた。また、実装の前段としてドラム駆動の単体試験器と演算処理系のラピッドプロトタイピングツールを用いて性能の評価、確認を実施した。

Fig.10に無制御時のドラム速度変動の周波数解析結果を示す。モーターの回転周波数(16Hz)の変動と、ドラム回転周波数(1Hz)などに問題となる変動が見られる。Fig.11にフィードバック制御時の結果を示す。低周波数の変動が抑制されることが確認できる。Fig.12に繰り返し制御時の結果を示す。周波数全域にわたって非常に良好な駆動精度が実現されたことを確認できる。

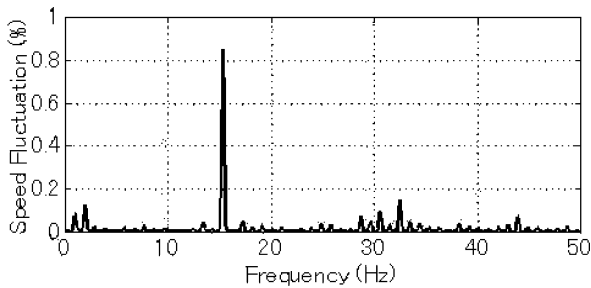


Fig.10 無制御時のドラム速度変動

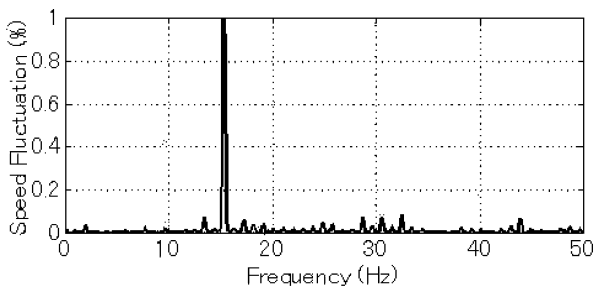


Fig.11 フィードバック制御時のドラム速度変動

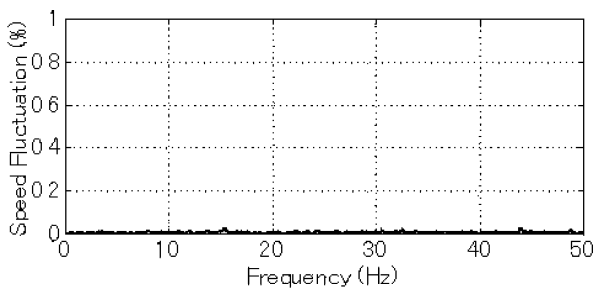


Fig.12 繰り返し制御時のドラム速度変動

5 まとめ

電子写真感光体ドラムの駆動系に対して、 H_∞ 理論を用いてフィードバック系を設計し、これを基本系としたドラム1回転周期の繰り返し制御系を設計した。摂動の見積もりに対してロバストかつ良好な性能を持つ制御系が得られ、実験で良好な速度精度を確認することができた。

この技術は電子写真機器だけでなく、種々の等速回転系の制御に有効活用できるものと思われる。

本検討にあたりご協力頂いた関係者に御礼申し上げます。

●参考文献

- 1) 城戸衛、大沢浩、深瀬康司、富士ゼロックステクニカルレポート、10、46(1995)
- 2) 中野道雄、井上恵、山本裕、原辰次、"繰り返し制御"、計測自動制御学会編、コロナ社、東京、1989
- 3) 樋口俊郎、山口智実、システムと制御、30、503(1986)
- 4) 三浦靖、富塚誠義、システム制御情報学会論文誌、2、261(1989)
- 5) 渡辺一郎、河辺享之、大塚伸一、小林弘樹、市原順一、計測自動制御学会論文集、37、152(2001)