

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560247

研究課題名（和文）環境負荷性能と動作性能のトレード・オフを図るための機械制御系の最適設計

研究課題名（英文）Optimal design of machine control systems for trade-off between environmental impact and control performances

研究代表者

佐藤 俊之 (SATO TOSHIYUKI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：40315635

研究成果の概要（和文）：本研究では機械の動作性能と、機械を動かす際の消費エネルギーとのバランスを図りながら、高精度な機械制御を実現する制御系設計法の開発をおこなった。モデル予測制御手法に基づき、比較的少ない操作量で出力を目標値に追従させるとともに、モデル化誤差や摩擦などの寄生要素の影響を低減化する目的で外乱オブザーバを組み合わせる手法を開発した。開発手法の有効性をシミュレーションならびに実験を通じて確認した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a control systems design method for high precision motion control systems which balances control performances and the environmental impact. By combining the model predictive control scheme with the disturbance observer, we have succeeded in controlling motion control systems with relatively small control effort while maintaining the control performance. The effectiveness was confirmed through both simulation and experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：動的設計

1. 研究開始当初の背景

モノづくりの設計・製造段階において重要なのは『QCT』と略記される三条件、すなわち、(1) 正確に（高品質・高品位化；Quality）、(2) 安く（低コスト化；Cost）、(3) 早く（納期の短縮化；Time）、の追及である。製造段階において、メカトロニクス機械は組み立て作業や搬送作業に多用されているが、機械の動作速度が製造スピードに直接、影響を与えるために、その動作性能の向上は重要である。

多くの場合、メカトロニクス機器はモータをアクチュエータとして用いており、機械の剛性が高ければ、消費電力の大きいモータを用いたり、同じモータでも仕様を超えない範囲で高い電圧や電流を与えたりすることにより、機械の動作速度や発生トルクの向上が望める。したがって、アクチュエータへの供給電力に糸目を付けなければ、より多くのエネルギーをアクチュエータに投入する方が、機械的性能の向上という観点からは望ましい。一

方、二酸化炭素排出量の低減化など、環境負荷の軽減が叫ばれる昨今の社会状況を鑑みると、機械を動かすのに要するエネルギーは少ない方が望ましい。こうした相反する要求をバランスさせることが、これからのメカトロニクス機器の制御設計において考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、環境負荷性能（機械を動かす際のエネルギー消費量）と、機械の動作性能とのバランスを図りながら、高精度な機械制御を実現する制御系設計法を開発することである。従来、制御するために必要なエネルギーと制御性能とのトレードオフを図る制御系設計として、古典的な最適制御系が知られている。しかし、最適制御系は基本的に状態フィードバック制御であることから、すべての状態変数が測定可能であることが要求される。さらに、最適制御系における設計基準はスカラの二次形式評価関数であり、その設計パラメータは評価関数に含まれる準正低行列と正定行列の要素であり、制御対象出力などといった制御量を直接、評価して設計することができないため、設計の見通しが悪い。また、制御対象と制御対象モデル（ノミナルモデル）の間にはモデル化誤差が存在するうえに、メカトロニクス機器には摩擦やヒステリシスなどといった寄生要素が存在することが多い。したがってこれらに対処したうえで環境負荷性能と動作性能とのトレードオフを図る必要がある。以上を鑑み、本研究では最適制御系ではなく、より直観的に設計しやすく、実制御対象と制御対象モデルを明確に区別することでモデル化誤差や外乱の影響を考慮して設計できるモデル予測制御手法に基づく設計法を構築する。

3. 研究の方法

研究の基礎となる制御系設計法として、ここでは、モデル予測制御の一種である predictive functional control (PFC) を用いる。PFC の原理を図 1 に示す。まず、制御対象出力を y_p 、設定値を c とする。現在時刻 k において $y_p(k)$ を観測し、 $y_p(k)$ を始点として設定値 c に滑らかに近づく理想的な軌道（参照軌道） $y_R(k+j)$ を定義する。参照軌道

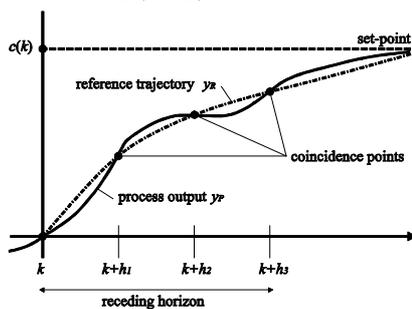


図 1 PFC の概念図

上に一致点と呼ばれる時刻 $k+h_1, k+h_2, \dots$ を定義する。一致点において、制御対象モデルを用いて計算される制御対象出力の予測値 \hat{y}_p と参照軌道 y_R との誤差が少なくなるように現在時刻以降の操作量軌道 $u(k+j)$ を決定する。ただし、現在時刻 k において適用する操作量は $u(k)$ のみである。次の時刻 $k+1$ においては、再び上記の計算をおこない操作量軌道を求め、 $u(k+1)$ のみを適用する。このような制御手法を receding horizon control（後退ホライズン制御）と呼ぶ。

PFC では基本的に、設計パラメータは「希望閉ループ応答時間」と呼ばれる値のみである。希望閉ループ応答時間は設定値の 95% に応答が到達するために必要な時間をあらわしている。したがって、閉ループ系の挙動を早くしたい場合には、希望閉ループ応答時間を短く取り、逆に閉ループ系の挙動を遅くしたい場合には希望閉ループ応答時間を長く取れば良い。一般的な最適制御系では、このような時間応答に基づく直接的な設計はできない。また、産業界で幅広く使われている比例・積分・微分制御（PID 制御）では設計パラメータが 3 個あり、これを適切に決めるのは希望閉ループ応答時間を指定するよりも難しい。その上、PID 制御では、操作量は各サンプリング時刻でのセンサ情報のみしか使わずに制御をおこなうため、制御対象の動特性に関する情報を有効に利用していない。それに対し PFC では、制御対象のノミナルモデルを内部モデルとして用いて将来の挙動予測をおこないながら各サンプリング時刻で操作量を決定する。したがって PFC の方が PID 制御よりも高性能化できる可能性が大きい。また、操作量の極端な変化が少ないため、要するエネルギーを抑えることができる。

反面、PFC の制御性能は内部モデルに基づく予測精度に大きく依存する。特にメカトロニクス機器ではモデル化誤差の他に、摩擦やヒステリシス等の寄生要素により発生する外乱が予測精度を低下させる大きな要因となっている。なお、予測出力と実際の制御対象出力とに差があることがただちに制御の失敗を意味するものではない。非積分性制御対象において、ステップ状外乱が加わったり、内部モデルと実制御対象のゲインが異なったりして、予測出力が実際の出力とずれたとしても、定常状態において制御対象出力が目標値に一致する（これを PFC のオフセットフリー特性という）。しかし、過渡応答の劣化は避けられず、モデル化誤差や寄生要素の影響が大きい場合には、設計通りの応答が実機上で得られない。そこで、本研究ではインナ・ループに図 2 に示す外乱オブザーバを配することで実制御対象の特性をノミナル特性に近づけるとともに外乱を積極的に打ち消し、予測出力の精度を向上させる。図 2 に

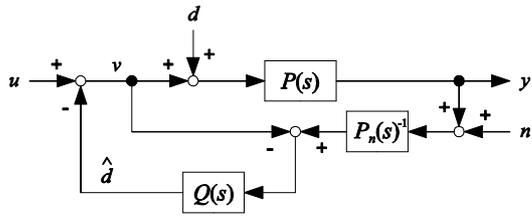


図 2 外乱オブザーバ

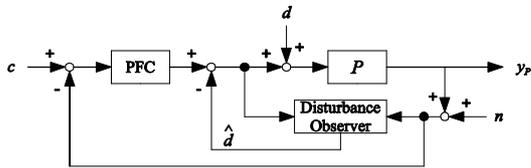


図 3 外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系

において、 P は実制御対象、 P_n は制御対象のノミナルモデル、 Q はローパスフィルタをあらわす。外乱オブザーバを組み込んだ PFC 制御系を以下では『外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系』と呼ぶ。その構成は図 3 のようになる。

まず、外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系の特性を解析する。通常の PFC 制御系に比べて、外乱オブザーバ併用型 PFC で改善される点を明らかにする。特に外乱抑圧特性の違いを検討し、外乱オブザーバの必要性を示す。

続いて、シミュレーションによる検討をおこなう。このために必要となるのは、PFC コントローラの設計をおこなうプログラム、外乱オブザーバに用いるローパスフィルタ設計プログラムおよび外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系の挙動を調べるシミュレータである。対象とする制御対象は、ボールねじを用いたテーブル駆動系とし、ここではその位置制御系設計を考える。まず、PFC コントローラ設計用のプログラムを MATLAB

(MathWorks 社製) により作成する。続いてローパスフィルタ設計プログラムを同じく MATLAB により作成する。これは、ローパスフィルタによっては Butterworth 型などのプロトタイプを使えない際に、数値最適化によりフィルタを設計するのに用いる。次に外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系のシミュレータを Simulink (MathWorks 社製) により作成する。ステップ状・ランプ状といった形状が固定された外乱や、摩擦トルクのような速度に応じて複雑に変化する外乱の影響を考慮したシミュレーションをおこない、提案手法の有効性を検討する。

最後に、実験装置の製作と実験をおこなう。本研究で開発する設計手法が有効かどうかは、シミュレーションばかりではなく、実験による検証をおこなわなければ判断できない。そこで図 4 に示すような、ボールねじを用いたテーブル駆動系 (1 軸サーボ系) の実験装置を構築する。こうした装置は産業界において組み立てや搬送用途で多用されてい

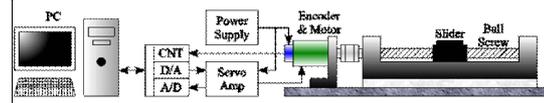


図 4 実験装置の概念図

る。この装置はモータが回転することによりボールねじ上のスライダが左右に移動するものである。モータに装備された 1000 パルス/回転のエンコーダからのパルスを、4 通倍することでカウンタボードから取り込むことで、モータの回転角度をスライダの移動量 (変位) に換算している。モータはモータドライバを介してトルク制御モードで駆動される。PFC コントローラおよび外乱オブザーバからの指示電圧は PC 上で MATLAB/Simulink により構築されたリアルタイム制御プログラムによりサンプリング周期 1ms で制御される。操作量は D/A ボードを介してモータドライバへ指示される。上記の説明からもわかるように、本実験装置はセミ・クローズド制御により制御される。本装置を用いて提案手法を検証する。

4. 研究成果

まず、外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系の特性解析をおこなった。通常の PFC では、非積分性制御対象 (定位性プラント) に対してオフセットフリー特性が成り立つことが知られている。これは、ステップ状外乱が加わっても、一定目標値に対して制御対象出力が定常状態においてオフセットなく追従するという性質である。したがって外乱の型を $1/(z-1)^k$ 型 ($k \geq 1$) と仮定すれば、PFC 制御系では $k=1$ までの外乱を除去できることになる。これは PFC 補償器が積分要素 $1/(z-1)$ を含むことに起因する。ところが、積分性制御対象 (非定位性プラント) に対してはオフセットフリー特性が成立しない。そこでまず、その理由を調べた。次の命題がこの理由を与える。

命題

PFC コントローラの零点は

$$\det(A_M - zI) = 0$$

の解で与えられる。ただし A_M は制御対象モデルの状態空間表現におけるシステム行列をあらわす。

この命題は、PFC コントローラが制御対象モデルの極を必ずその零点として持つことを意味している。したがって、制御対象モデルが積分特性を 1 つ持つ場合には、PFC コントローラの分子多項式に $z-1$ があらわれる。ところが分母多項式も $z-1$ を含むため、コントローラの分子・分母間で極零相殺が起こり、結果として PFC コントローラから積分特性が失われ、オフセットフリー特性が成立しない

ことがわかる。また、非積分性制御対象であっても、 $k \geq 2$ 以上の外乱（以下ではこれを高次外乱と呼ぶ）に対しては、PFCコントローラが積分要素を1つしか含まないため、オフセットが残る。

一方、定常偏差が零であっても、設計通りの過渡特性が得られないことがある。この原因を調べたところ、モデル化誤差や外乱により、内部モデルに基づく将来時刻における出力予測値が実際の出力値と大きく異なることに起因していた。この場合、内部モデルによる予測精度を向上させ、実制御対象の挙動を内部モデルの挙動に近づけなければ、過渡特性は改善されない。

提案する外乱オブザーバ併用型 PFC では、上記の PFC の欠点を改善する下記の性質を有する。

- (1) 外乱オブザーバを用いることで、一巡伝達関数に、指定された n_f 個 ($n_f \geq 1$) の積分要素が導入される。したがって、制御対象モデルが非積分性であれば、PFC コントローラが元々有する積分要素と併せて $n_f + 1$ 個の積分要素が制御系に付与される。
- (2) 外乱オブザーバにより低周波数領域において、実制御対象の挙動が内部モデルの挙動に近づく（ノミナル化される）ため、内部モデルに基づく出力予測値の予測精度が向上し、過渡応答が設計に近いものとなる。

たとえば、非積分性制御対象にランプ状外乱が加わる場合を考える。通常の PFC であればオフセットが残り、目標値に追従しない。しかし、 $n_f = 1$ となるように外乱オブザーバを設計することにより、ランプ状外乱を漸近的に除去できるようになる。

次に、シミュレーションによる有効性の検討結果を示す。制御対象は先述のとおり、1軸サーボ系である。外乱オブザーバを速度ループで組むことにする。このとき、図2中のノミナルモデル P_n は入力指示電圧から角速度までの伝達関数となり、次のように与えられる。

$$P_n(s) = \frac{473.2}{s + 3.32}$$

シミュレーションでは、ランプ状外乱が加わる場合を想定し、通常の PFC 制御系と外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系の挙動の違いを調べる。サンプリング周期を 1ms とし、 $P_n(s)$ を零次ホールド付きで離散化した離散時間制御対象に対し、希望閉ループ応答時間を 0.04s、基底関数の次数を 2 に取りコントローラを設計した。時刻 1 秒においてランプ状

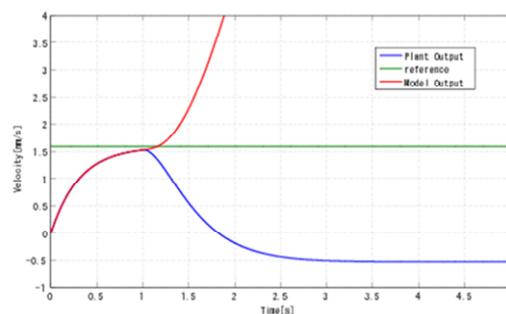


図5 通常の PFC 制御系の応答

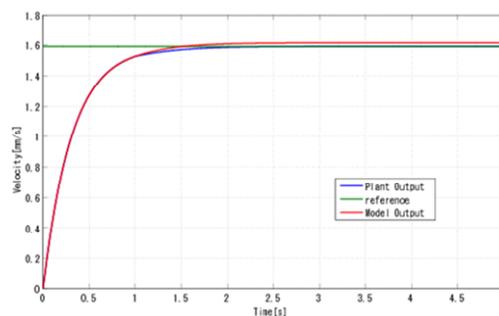


図6 外乱オブザーバ併用型 PFC 制御系の応答

外乱 $d(s) = 0.03/s^2$ を加えたときの PFC 制御系の応答を図5に示す。図より、制御対象出力（青線）が設定値（緑線）に対してオフセットが生じていることがわかる。次に、外乱オブザーバに用いるローパスフィルタをカットオフ周波数 45Hz の 1次 Butterworth フィルタに取ると次のようになる。

$$Q_1(s) = \frac{282.74}{s + 282.74}$$

図5と同様に、時刻 1 秒においてランプ状外乱を加えたときの応答を図6に示す。図よりランプ状外乱が加わっても、出力が設定値に収束していることがわかる。なお、モデル出力（赤線）は、通常の PFC 制御系では時間とともに発散し、外乱オブザーバ併用型 PFC では設定値とは異なる値に収束している。

最後に、実験結果を示す。実機にはモデル化誤差と摩擦に起因する速度依存性の外乱が存在する。これらは同時に制御系に作用するため、それぞれが追従性能の低下に及ぼす影響を切り分けることはできない。したがって実験では、モデル化誤差と外乱の影響が同時に加わる際の外乱オブザーバ併用型 PFC の有効性を評価することになる。なお、シミュレーションでは速度制御系を考えたが、本実験では位置制御系を考える。外乱オブザーバはシミュレーションと同様、速度ループに組む。したがって、ノミナルモデルはシミュレーションで用いた $P_n(s)$ をそのまま用いる。一方、PFC 制御系はその外側に位置制御系として実現される。そのため、PFC 制御系におけるノミナルモデルは $P_n(s)/s$ と、積分器を一つ

含む積分制御対象となる。これより、PFC制御系のみでは一巡伝達関数から積分要素が消え、ステップ状外乱に対してオフセットが残る。一方、外乱オブザーバ併用型PFCにおいて、ローパスフィルタ $Q_1(s)$ を用いる際にはステップ状外乱を漸近的に除去できる。さらに、ランプ状外乱まで漸近的に除去できる外乱オブザーバを組むために次式のローパスフィルタを導入する。

$$Q_2(s) = \frac{150.38(s+37.59)}{(s+75.19)^2}$$

$Q_2(s)$ はカットオフ周波数が45Hzの二項フィルタである。位置の目標指令値として変形台形曲線を複数個繋ぎ合せた曲線を用いる。変形台形曲線では加速度が一定となる区間が存在する。したがってその区間では粘性摩擦に起因するランプ状外乱が加わることになる。また、比較のため、自動補償器を用いたPFCによる結果も示す。希望閉ループ応答時

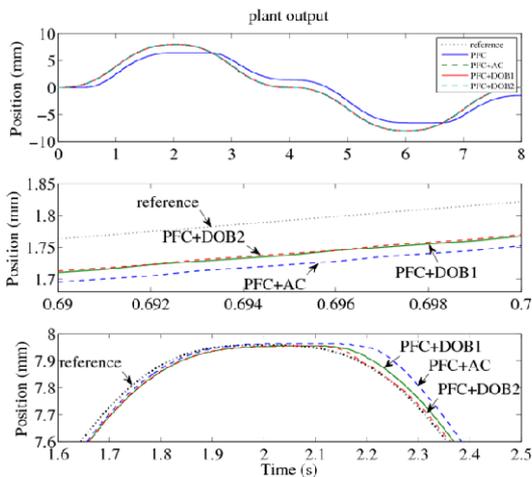


図8 予測出力と実際の出力

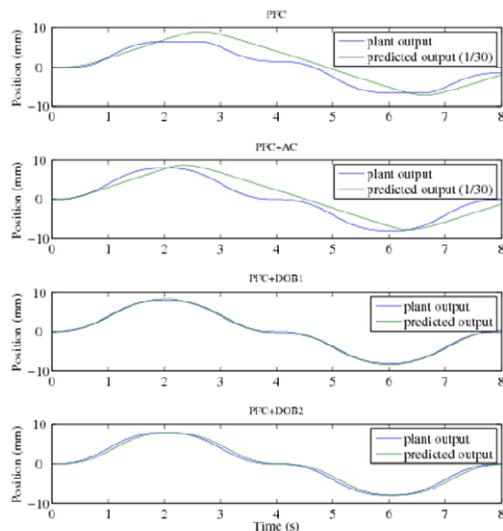


図7 目標値と各制御系の応答

間を0.02秒、基底関数の次数を2にとり実験をおこなった。図7に各制御系の応答を示す。図7(上図)より、通常のPFC(青実線)は目標指令値に対して大きな誤差が生じていることがわかる。それ以外の制御方法の違いを見るために、図7(中図・下図)にランプ状外乱が作用する時刻付近の拡大図を示す。これらより、 $Q_2(s)$ を用いた外乱オブザーバ併用型PFC(PFC+DOB2)が最も追従誤差が小さく、次いで $Q_1(s)$ を用いた外乱オブザーバ併用型PFC(PFC+DOB1)、自動補償器を用いたPFC(PFC+AC)となる。PFC+DOB2とPFC+DOB1の差が少ないのは、粘性摩擦力があまり大きくなかったためであると考えられる。最後に、各制御系における出力予測値と実際の出力を示す。通常のPFCとPFC+ACでは予測精度が悪く、予測出力値が実際の出力値よりもはるかに大きかったため、1/30にしたものを示している。これに対して、外乱オブザーバ併用型PFC(PFC+DOB2, PFC+DOB1)はいずれも予測出力値が実際の出力値に極めて近く、外乱オブザーバによる予測精度改善効果が現われていることがわかる。実験をおこなった8秒間における操作量の二乗積分平方根を計算し、制御に用いたエネルギーを求めたところ、通常のPFCが1.63に対し、PFC+DOB2が1.75、PFC+DOB1が1.74となった。わずかなエネルギーの増加で大幅に追従性能を改善する結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Toshiyuki Satoh, Kotaro Kaneko, Naoki Saito, Improving Tracking Performance of Predictive Functional Control Using Disturbance Observer and Its Application to Table Drive Systems, International Journal Computers, Communications & Control, 査読有, 掲載決定

② 佐藤俊之, 金子高太郎, 齋藤直樹, 外乱オブザーバを用いた Predictive Functional Control の追従性能改善, 計測自動制御学会産業論文集, 査読有, Vol.10, No.15, 2011, pp.132-139

[学会発表] (計6件)

① Toshiyuki Satoh, Kotaro Kaneko, Naoki Saito, Performance Improvement of Predictive Functional Control: A Disturbance Observer Approach, 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011年11月10日, Melbourne, Australia

② 金子高太郎, 佐藤俊之, 齋藤直樹, 外乱オ

ブザー併用型 PFC による 1 軸サーボ系の位置決め制御, 日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演会, 2011 年 9 月 23 日, 山形県米沢市

③金子高太郎, 佐藤俊之, 齋藤直樹, 外乱オブザーバ併用型 PFC によるテーブル駆動システムの位置決め制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011 年 5 月 27 日, 岡山県岡山市

④Toshiyuki Satoh, Naoki Saito, Norihiko Saga, Predictive Functional Control with Disturbance Observer for Pneumatic Artificial Muscle Actuator, International Conference on Applied Bionics and Biomechanics, 2010 年 10 月 15 日, Venice, Italy

⑤金子 高太郎, 佐藤 俊之, 齋藤 直樹, 1 軸サーボ系の摩擦モデリングと位置決め制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010 年 6 月 15 日, 北海道旭川市

⑥渡部 良尋, 佐藤 俊之, 嵯峨 宣彦, 齋藤 直樹, 空気圧人工筋アームのモデル予測制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009 年 5 月 26 日, 福岡県福岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 俊之 (SATO TOSHIYUKI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号: 40315635

(2) 研究分担者

齋藤 直樹 (SAITO NAOKI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号: 60315645

(3) 連携研究者

なし