

論文の内容の要旨

内燃機関の制御のための対象の特徴に基づく微分フィルタの設計と実装

青野俊宏

自動車の内燃機関の制御の進化に伴い、信号処理も進化してきた。その開発の状況は、ノック診断やOBDのように設計レベルで実用に耐えうるものがある一方で、どのような物理現象に着目するか、そのためにはどんな信号の特徴に着目すべきかを論じてはいるものの、量産内燃機関への搭載に耐えうる、ロバストでコンパクトな信号処理を実現するには、いまだ開発の余地があるものもある。本論文では、コンパクトでロバストな信号処理の中でも、特に、微分フィルタに着目し、微分フィルタが内燃機関の制御において果たす役割を整理し、具体的なアプリケーションについて、対象の特性に基づいて微分フィルタを適用したシステムを開発した。

第1章では、内燃機関の制御の進歩に応じて進化してきた信号処理の研究状況を整理した。信号処理のアプリケーションとしては、燃焼状態検知、ノック検知、OBD、アクチュエータの個体差検知、空燃比センサの信号処理に分類でき、このそれぞれについて信号処理の状況について整理した。その結果、ノック診断のように設計レベルで実用に耐えうるものがある一方で、どのような物理現象に着目するか、そのためにはどんな信号の特徴に着目すべきかを論じてはいるものの、量産内燃機関への搭載に耐えうる、ロバストでコンパクトな信号処理を実現するには、いまだ開発の余地があるものもあることがわかった。このような状況において、信号処理の中でも特に広い役割が期待できる微分フィルタについて、その3つの役割、因果律をさかのぼる、周波数に比例したゲインを示す、変化点を強調するについて、これらを生かしたアプリケーションを整理した。微分フィルタにはこうした広い役割がある一方で、差分間隔や平滑化の仕方といった設計によって性能が左右されるという課題がある。微分フィルタに関する研究例を調べた結果、スロットル、移動体、傾斜剛体等のプラントモデルを作成しやすいアプリケーションに対しては、オブザーバを使った微分フィルタが多く使われていることが分かった一方で、内燃機関の空燃比センサの信号のような、モデル化が困難なアプリケーションでは、モデルの代わりに対象の周波数特性に基づいて微分フィルタが設計されていることがわかった。内燃機関の制御では、燃焼制御のようなモデル化しがたい対象が扱われることが多いので、本研究では、内燃機関のようにモデル化困難な領域を対象とし、対象特性から微分フィルタへの要求を導き、要求を満たすようにフィルタを設計する、ということを一貫して行う。

第2章では、信号に周期性がある場合を対象に、周期性を活かした信号処理を実現するため、この周期とその倍周波数を強調するフィルタの実現の例として、クランク角センサ信号からの燃焼トルクの推定方法を開発した。クランク角センサの周期性に着目し、これを三角関数で近似し、近似したものを微分するという機能をFIRフィルタで実現した。これによって、低回転数の1000rpmではトルクの立ち上がり、ピーク位置が正確に再現できることがわかり、トルクの気筒ばらつきにも追従できることがわかった。また、FIRフィルタによる安定で応答性の良い微分と上下死点のトルク補正の効果により、過渡トルクの変動に正確に追従できることがわかった。また、量産内燃機関のクランク角センサの分解能で燃焼トルクが再現できるか調べるため、10degの分解能のクランク角センサから燃焼トルクを推定したところ、クランク角1degの場合と比べて推定性能の劣化が小さいことがわかった。これは、燃焼トルク、クランク軸回転角速度の周波数成分は燃焼4次(クランク角 $180^\circ / 4 = 45^\circ$)までが支配的なので、クランク角 10° より細かい周期の成分の寄与は小さいからである。

第3章では、平坦なゲイン特性を示すフィルタの実現を目指し、空燃比センサの劣化の推定方法を開発した。ここでは、フィルタの長さに対し、奇数次のFIRフィルタと偶数次のFIRフィルタの平均によりリップルを平滑化する方法を考案し、実験データに基づきフィルタ長と次数を最適化した。その結果、診断に最も不利な低回転低負荷の条件下でも、識別性能が6に達し、実用上確保可能な診断時間で診断が実現できることがわかった。

第4章では、短いフィルタを代数的に設計する例として、失火と外乱の識別の開発に取り組んだ。失火検出の外乱としては、車体の残響振動があり、これが発生すると、失火による波形変化と類似した波形が発生する。これらを識別する方法として、失火を検知し残響振動を除去する帯域の狭いフィルタが考えられるが、これを実現するにはフィルタ長を長くする必要があり、検出の応答性の低下や計算負荷の増加が危惧される。そのため、2つのフィルタを用いて特徴を抽出し、その比によって失火と残響振動を分離することを試みた。これを実現するためのフィルタの特徴を代数的に明らかにし、2つのフィルタを設計し、失火と残響振動が分離できることを実験データに基づき示すとともに、一般的な残響振動の周波数帯域が3Hz~5Hzであることに基づき失火と残響振動の分離が行える内燃機関回転数の範囲を見積もった結果、4気筒・6気筒とわず、通常の内燃機関の運転範囲では識別できることがわかった。

第5章では、処理したい信号が外乱に埋もれてしまうという状況を改善するため、センシングシステムのハードのチューニングを行った。信号が外乱に埋もれてしまう例として、クランク角センサからの失火検出をとりあげた。振動解析により、この外乱がクランク軸のねじり振動であることを示した。ねじり振動が深刻になるのは、クランク軸の回転周期と燃焼周期が一致したときなので、回転を検出するためのリングギアの歯の間隔を燃焼周期(クランク角 120°)に一致するようにチューニングし、高回転でも失火検出が可能となった。

第6章では、ますます厳しくなる環境規制に対応するために、アクチュエータの個体差を検出するための信号処理をマイコンに実装した。アクチュエータの個体差の検出では、微細な信号の変化を高い時間分解能で検出する必要がある。そのために、最新のマイコンのAD変換機能とデジタル信号処理エンジンを活用し、システム設計した。ECU周りのノイズを効率的にカットするようにデジタルフィルタを設計し、設計したフィルタはデジタルフィルタエンジンで処理することでメインコアに負荷をかけることなくリアルタイム処理が可能となり、 $\Delta\Sigma$ AD変換器の特性によりエイリアシングの問題を解決した。このように製造ばらつきを検出する信号処理をマイコンに実装することで、 $5\mu s$ の精度で閉弁タイミングのばらつきが検出可能となり、これに基づき製造ばらつきを補正することで最小噴射量を低減することができた。

このように、内燃機関の制御に微分フィルタを適用するには、

- (1) 必要な情報を含み不要な情報を除去するための計測ハード
- (2) 必要な情報を得るためのフィルタ
- (3) 信号を取り込み処理するマイコン

の3つの観点から設計することが必要となるが、実際のアプリケーションにおいて、これらの観点から課題を解決し、内燃機関に適用できる、コンパクトでロバストな信号処理システムを開発した。

これまでも、因果律を遡る、特徴点を抽出するために信号を微分することはあった。多くの場合、1次遅れフィルタ等で信号をなましたのち、差分をとる、といった処理をおこなうので、適合に手間がかかる、また、周波数に対するゲインの減衰が緩やかなので、望ましい減衰特性が得られずにノイズの影響を受ける、という問題があった。

本研究では、対象の特性に応じた微分フィルタを用いることにより、

ノイズを効率的に除去でき、安定な微分ができるようになった(2章, 3章, 6章)

少ない計算量で処理ができるようになった(2章, 4章)

フィルタの適合の手間が削減できた(2章, 3章, 4章)

というメリットが得られた。

また、見たい物理現象がノイズに埋もれてしまう場合に際しては、ノイズの原因をメカニカルに解析し、ノイズに対してロバストな信号が得られるように、計測システムを最適化した。

さらに、高い時間分解能で微細な変化を捉えるためには、高いAD変換分解能と計算能力が要求されるが、最新のマイコンのAD変換機能と計算エンジンを活かしたシステム設計をすることで、必要な信号処理ができるようになった。

これらの結果、量産内燃機関の制御に適用できる信号処理システムが実装できた。