

## 審査の結果の要旨

氏名 青野 俊宏

本論文は、「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」と題し、7章より構成されている。物理現象としての自動車の内燃機関は、まだ未解明の部分も多く、特に燃焼状態の推定は支配要因が多いこともあり、燃焼制御に使える確固たるモデルはまだない。しかしながら、世界的な排気規制の強化や低燃費化の要求に伴い、内燃機関の燃焼制御の必要性はますます高まっており、開発競争も激化している。その開発の状況は、ノック検知や OBD (On Board Diagnosis) 等では、実用に耐えうるものが提案されているが、多くは物理現象の解明やセンサから得られる信号の特徴を論じてはいるが、搭載するセンサやコンピューター的能力やコスト等、様々で厳しい制約条件の中で、実際の自動車へ搭載するには、ロバストでコンパクトな信号処理を実現する必要がある、それらに対する効果的な設計指針は提案されていなかった。本論文は、実装上の制約条件を満たし、コンパクトでロバストな信号処理の中で、微分フィルタに着目し、内燃機関の燃焼制御において、具体的な事例に対して、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示し、その性能を実証することによって、対象の特性からフィルタの設計と実装を行う手法を提案するものである。

第1章は「序論」であり、内燃機関の制御に関連する信号処理の研究の現状を整理している。特に、燃焼状態推定、ノック検知、OBD、アクチュエータの個体差検知、空燃比センサ等で使われている信号処理について整理した上で、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、すなわち、因果律をさかのぼる、周波数に比例したゲインを示す、変化点を強調するという利点がある一方で、差分間隔や平滑化の方法によって性能が左右されるという課題が存在することを示している。また、内燃機関の制御における燃焼制御のようなモデル化が困難な対象に対する研究の現状を述べている。

第2章は、「基本成分の倍周波数成分を強調する微分フィルタークランク角センサからの燃焼トルクの推定」と題し、クランクの回転のように周期性がある対象からの信号に対する処理の例として、クランク角センサの信号から燃焼トルクを推定する方法を提案している。具体的には、クランク角センサの周期的な出力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。この方法を用いることにより、低回転数の1000rpmではトルクの立ち上がりやピーク位置が正確に再現できることが実験的に示され、加えて、トルクの気筒ばらつきにも追従できることを示している。また、よく使われる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のセンサを用いる場合と比べて推定性能の劣化が小さいことを示し、本手法の実用性の高

さを示している。

第3章は、「平坦な周波数特性をもつ微分フィルタ – 微分フィルタの周波数特性に基づく空燃比センサの診断 –」と題し、空燃比センサの劣化に伴い、低域側の周波数スペクトル密度が高くなる特性を検出するため、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提案している。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提案し、実験データに基づきフィルタ長と次数を決定する方法を導入し、実用上問題ない時間で、十分な識別性能が得られることを実証している。

第4章は、「代数的な特徴に着目したフィルタの設計 – 2つのフィルタの組合せによる失火と残響振動の識別 –」と題し、実装を容易にするため、短いフィルタを代数的に設計することにより、失火と外乱の識別方法を提案し、実証している。自動車の車体の残響振動が発生すると、失火による波形変化と類似した波形が発生する。通常の狭帯域のフィルタを用いる方法ではフィルタ長を長くする必要があり、応答性の低下や計算負荷の増加を招くことが欠点となる。そこで、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方法を提案するとともに、実際に気筒数に関わらず、通常の内燃機関の運転範囲で失火と残響振動が分離できることを実験的に示している。

第5章は、「クランク軸振動と内燃機関の加減速にロバストな失火検出方法」と題し、クランク角センサからの失火検出を行う際に信号が埋もれてしまうほどの外乱が発生するが、振動解析により、この原因がクランク軸のねじり振動であることを明らかにするとともに、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に一致するように設計する方法を提案している。これらの方法により、高回転でも失火検出が可能となることを実験的に示している。

第6章は、「製造ばらつき低減のためのマイクロ秒レベルの信号処理」と題し、製造過程で生じる物理的なアクチュエータの個体差を大きな計算負荷をかけることなくリアルタイムで補正する方法を提案している。具体的には、インジェクタの閉弁タイミングが製造時の誤差として約 $80\mu\text{s}$ ばらつくのに対して、効率的なデジタルフィルタを設計し、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を実現し、なおかつ $\Delta\Sigma$ 型AD変換器によりエイリアシングの問題を解決することにより、 $5\mu\text{s}$ の精度で閉弁タイミングのばらつきを検出し、補正することができることを示している。これにより、最小噴射量を低減することが可能となる。

第7章は「結論」であり、以上の結果がまとめられている。

以上要するに、本論文は、内燃機関の燃焼制御に対して、計算資源等の厳しい制約条件がある中で、実装可能な微分フィルタの設計方法を提案し、実際の量産車に搭載されることにより、その有用性を示したものである。特に、クランク角センサから燃焼トルクの推定、空燃比センサの劣化診断、失火検出等の実例を示すことにより、燃費改善や排気規制

等に対応しうる方法を提案し、製品によりその有効性を実証したものである。これらの成果は、内燃機関の制御に、コンパクトでロバストな信号処理を導入する方法を実例と共に開拓したものであり、関連する分野の発展に貢献するとともに、システム情報学の発展への寄与が大であると認められる。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。