

排気管の内部にラムダセンサを装備する
エンジンテストベンチ



理想的な空燃比をめ
空燃比制御のための

Optimal Air-fuel

エンジン制御を行う上で、効率良くかつ環境にも配慮された空燃比を見つけ出すことは、今なお重要課題となっています。1980年代以降、キャブレタから電子制御燃料噴射装置への移行に伴い、研究者はこの課題に注力してきました。空燃比を適正に制御することで、定常時および過渡時のいずれにおいても三元触媒の性能を最大限に発揮させることができます。すなわち空燃比の制御は、SI、GDI、リーンバーンエンジンの排気ガスを抑制する上で重要な役割を果たします。

ざして
ニューラルネットワークをMicroAutoBoxで実行（サレルノ大学）

Ratio

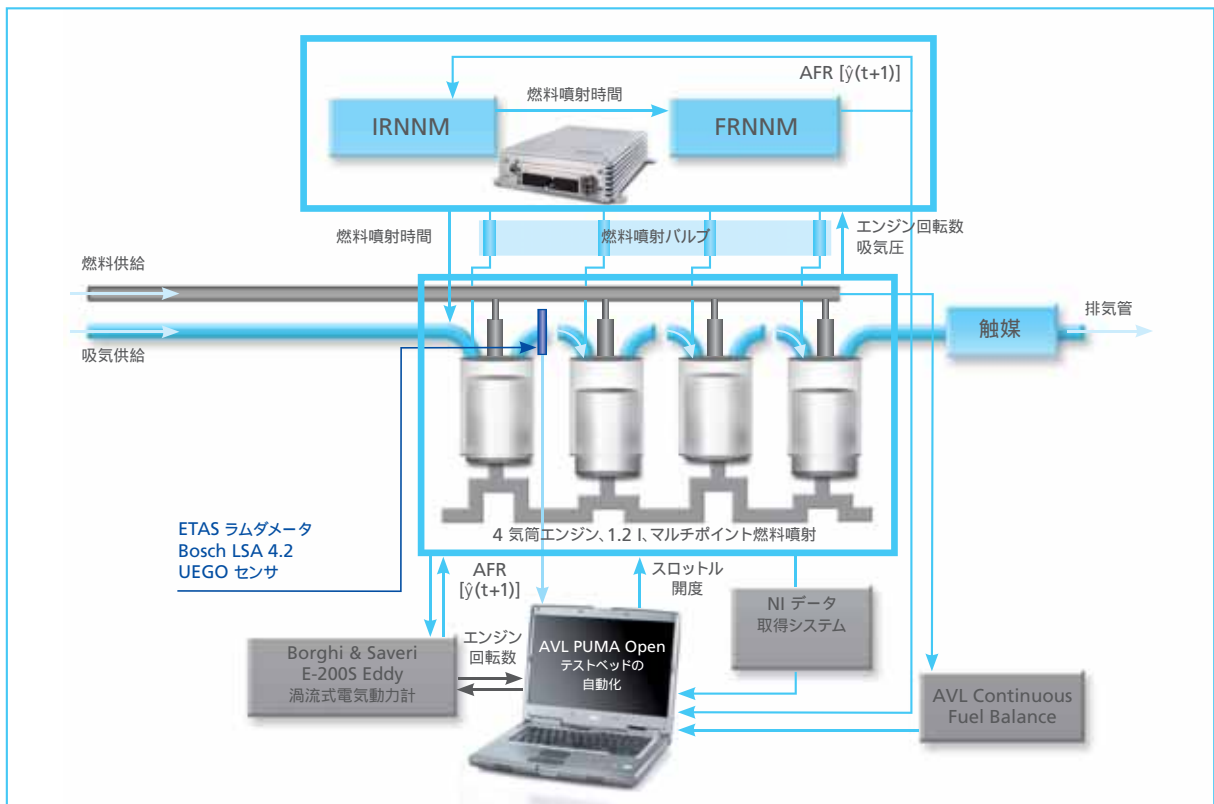
空燃比制御の要件

これまでも排気ガスの抑制には多大な努力が払われてきましたが、世界中で厳しさを増す環境規制を背景にして、理想的な空燃比の実現が今まで以上に求められています。さらに、1996年にアメリカで導入され、その後ヨーロッパにも導入された車載診断装置の要件にも対応しなくてはなりません。それらの要件に準拠することは自動車制御において必須の目標となっており、そのためには排気システムの故障を避けるためにパワートレインのすべてのコンポーネントを常時監視することが必要となってきます。現在の空燃比（AFR）制御は、平均有効圧

エンジンモデルに基づいています。しかし平均有効圧モデルの場合、パラメータ識別のために高度な試験が要求されること、モデルを適用できない機能が存在することなど、いくつかの大きな制約があります。一方で、AFR信号の遅れも極めて重要な問題で、クローズドループ制御方式の性能を改善するために解決しなくてはなりません。ニューラルネットワークは、こうした課題に対する有望なソリューションです。このネットワークは高いマッピング能力を持ち、限られた識別データでも一般化することができます。さらに適応トレーニング手順を導入することで、制御性能への外的効果の影響も考慮できるようになります。

制御方式の開発

このAFR制御方式でベースとなるのは、回帰ニューラルネットワーク（RNN）です。ニューラルネットワークは制御システムとして使用され、その出力によって制御動作が直接決定されます。AFRダイナミクスの順RNNモデル（FRNNM）の開発にあたっては、「AFRの応答に影響を与える動的プロセスは空気と燃料双方のダイナミクスに依存する」ことを考慮しました。したがって、出力、制御、外部入力の変数には、AFR、燃料噴射時間、エンジン回転数、吸気圧が使用されます。出力フィードバックはネットワーク自身によってシミュレートされるため、FRNNMはオンライン予測を行うため



制御ソフトウェアの試験設定：
制御方式は逆 (IRNNM) ダイナミクスと順 (FRNNM) ダイナミクスの 2 種類の RNN で構成

に AFR を計測する必要がありません。これにより、冷間始動時などラムダセンサが正確な計測を保証できないときでも、この制御システムは AFR の仮想検知に適したソリューションとなります。また、エンジンサイクル、輸送現象、センサレスポンスなどに起因する遅れを排除することもできます。

ニューラル制御システム

制御動作は、エンジンの状態と外部入力のセンサ計測値に応じて、逆 RNN モデル (IRNNM) によって計算されます。FRNNM によって予測された出力値はフィードバックとして IRNNM へ供給され、IRNNM は次の段階で必要となる出力に対する制御動作を見積もります。FRNNM の予測精度が高まるほど、FRNNM とプラントの出力の差異が減少します。

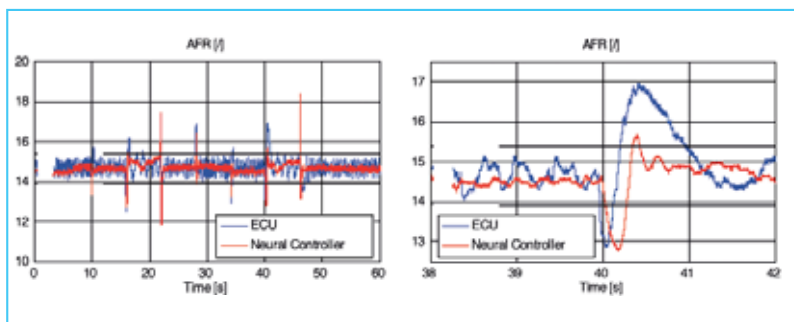
試験の設定

開発された制御方式は、エンジンテストベンチ上で計測された過渡データセットと対比させながら、トレーニングとテストが繰り返されました。1 気筒内のみの混合気生成過程を検証するため、ラムダセンサを第 1 気筒の排気バルブの直後に配置しました。これにより、排気管内でのガス輸送と混合現象によって引き起こされる動的な影響を排除することができます。また、吸気、熱状態、燃料噴射のような不均一なプロセスに起因して気筒間にアンバランスが生じますが、それによって引き起こされる予測不能な影響は、このモデルでは無視することができます。したがって、燃料噴射タイミングとラムダセンサ計測の間の時間的推移は、大部分が吸気バルブと排気バルブの位相によって説明できます。すでに述べたように、時間の遅れは制御にとって大きな問題となります。

このリアルタイムアプリケーションのために、MATLAB®/Simulink® を使って制御システムをモデル化し、続いて dSPACE MicroAutoBox へアップロードします。MicroAutoBox により、すべてのエンジンタスクを直接制御し、カスタマイズされた制御システムをただちに実行することができます。直接制御システムを採用した理由は、現時点でのエンジン回転数と吸気圧を即座に計測して実際の燃料噴射時間を算出し、FRNNM が実行する AFR の値を早期に予測するためです。さらに、現行のアプリケーションが必要とする目標空燃比を、理論空燃比値 (14.67) に設定しました。ラムダセンサは第 1 気筒にしか装着されていないため、制御プログラムのテストは第 1 気筒でのみ行いました。一方、残りの 3 気筒については、従来のマップベースの燃料噴射方式を使用しました。

「ECU を dSPACE の MicroAutoBox に置き換えたことにより、すべてのエンジンタスクを制御し、制御の法則を簡単にカスタマイズすることができました」

Cesare Pianese, University of Salerno



開発された制御方式は極めて高精度で、実物の ECU で行うよりもすばやく正確に目標空燃比に追従

直接制御システムの成果

トレーニングされた IRNNM は、FRNNM が順ダイナミクスについて行うのと同じ精度で逆 AFR ダイナミクスをシミュレートします。MicroAutoBox のフレームワーク内で FRNNM と IRNNM を統合して、ニューラル制御ソフトウェアストラクチャとし、統合された RNN 上でオンラインテストを行いました。

まとめ

仮想センサ (FRNNM) は AFR ダイナミクスを適切に予想します。その際の計測軌跡に対する誤差は、AFR に幅広いスパイクが見られる場合でも、過渡領域の大部分において 2% 未満です。これは、RNN の動的な動作が実際のシステムダイナミクスに十分近いことを証明しています。

仮想センサ予測機能を使用する制御システムを、ECU 上に実装した後、試験的な過渡条件についてテストしました。基準 ECU の動作から得られた AFR 軌跡と比較すると、制御システムが十分に機能していることがわかります。とりわけ、仮想センサ予測を統合したことで高次元なレスポンスが生成されるようになり、その結果 AFR の補正がより迅速

に行われ、ECU が認識するオーバーシュートが取り除かれます。これは、MicroAutoBox には優れた演算能力を備えたプロセッサが搭載されているため、複雑なアルゴリズムをいつでもリアルタイムに実行できるからです。結論として、ニューラル制御システムは現行の方法と比較して必要な試験と適合にかかる工数を大幅に削減することができるため、エンジン制御の改善に大きく貢献します。■

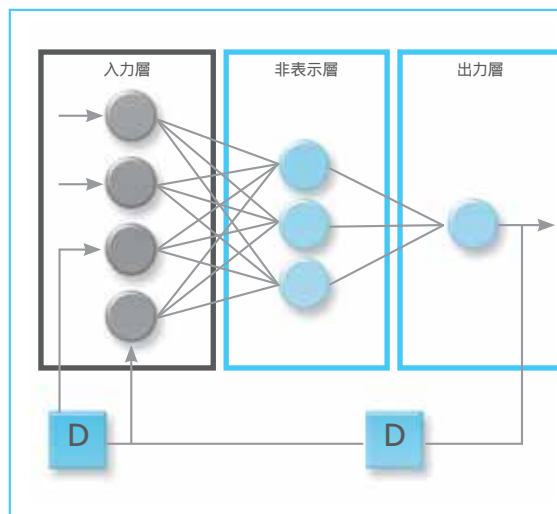
Ivan Arsie, Silvana Di Iorio, Giuseppe Noschese, Cesare Pianese, Marco Sorrentino
pianese@unisa.it
Department of Mechanical Engineering
University of Salerno, イタリア

用語解説

空燃比 (AFR) 混合気に含まれる空気と燃料の質量比。有害物質削減と性能向上のために欠かせない計測データ。ラムダ (λ) は AFR の代表的表現。純オクタンの場合の理想空燃比は $= 1.00$ (空気と燃料の理論空燃比は $14.67 : 1$)

ラムダセンサ O_2 センサとも呼ばれる。このセンサが排気ガス中の酸素量を監視することで、ECU は混合気の濃さを決定し、必要に応じて調節を行う。

ニューラルネットワーク ニューロンと呼ばれる単位で構成。それぞれのニューロンは入力に応じた重みを持ち、制御ロジックを出力として生成。通常、ニューロンは入力層、出力層、1個または複数の隠れ層に接続される。ニューロンの中にフィードバック接続を導入することで、静的ネットワークから回帰ニューラルネットワーク (RNN) を導出。ローカルメモリプロセスによってコンピュータシステムに動的効果を導入。過去の入力に対して感知、適応できることが RNN の利点。



回帰ニューラルネットワーク (RNN)