

ガソリンエンジンにおける制御・診断の高度化技術

Advanced Control and Diagnosis for Ignition Spark Engine

○栗原 伸夫*, 大須賀 稔**

○Nobuo Kurihara*, Minoru Ohsuga**

*八戸工業大学, **日立製作所

*Hachinohe Institute of Technology, *Hitachi Ltd.

キーワード : ガソリンエンジン(Gasoline Engine), 電子制御スロットル(Electrically Controlled Throttle),
ノック検出(Knock Detection), 限界空燃比検出 (A/F Limit Detection)

連絡先: 〒031-8501 八戸市大字妙字大開 88-1 八戸工業大学 工学部 機械工学科 栗原伸夫
Tel.: (0178)25-8174, Fax.: (0174)25-8174, E-mail: kurihara@hi-tech.ac.jp

1. はじめに

エンジン制御システムにおける電子化の進展には著しいものがある。燃料制御は気化器から噴射式に代わり、点火制御も電子式進角方式となり、すべてこれらはマイクロコンピュータで制御される。そして最近の排気 HC 濃度は、気化器の時代に比べて 1/100 にも低減した。制御ロジックは極めて緻密なものとなり、またソフトウェアの量は初期の頃に比べると 10~20 倍にも達している。こうしたエンジン制御の進展が実用レベルで許容されてきたのは、マイクロコンピュータの急速な性能向上に支えられてきたと言える。

今また燃費(CO₂)低減のために燃料噴射の場所をポート部からシリンダ部へと移し、筒内に直接噴射して超リーン燃焼させる、直噴エンジンが普及しつつある。本論文では、超リーンバーンを実現するための制御に関して、特にマイクロコンピュータの高度利用という観点から、電子制御スロ

ットルの制御、ノッキングのデジタル検出と制御、限界空燃比のデジタル検出を取り上げて報告する。

2. エンジンのアドバンスト制御

近年の半導体技術の進展には目覚ましいものがあり、エンジン制御を支えるマイクロコンピュータも一段と高性能になってきた。図 1 はエンジン制御に使われ出した 1970 年代の終り頃からここ 30 年の推移を処理能力(当社比)で示したものである。エンジン制御で使用するものはメモリや専用 I/O を同一ウェハ内に納めたシングルチップ構成であり、また耐環境性に厳しい自動車仕様のものである。しかしながらプロセッサについては当時 8 ビットの CISC であったものが現在では 32 ビットの RISC に変わって、処理能力は平均で 100 倍/20 年という驚異的なスピードで向上してきた。また 機器組込型とは言えそのメモリ容量は 1 Mbyte に届こうとしている。こうしたトレンドは

微細加工プロセスの進展につれてまだしばらく続くものと思われる。

こうしたマイクロコンピュータの性能向上によって、従来、オンボードでは難しいと思われていたような制御アルゴリズムも適用が可能になって(2)従来は実験解析用であった信号処理技術のオンボード化、(3) 現代制御理論の実用化の3つのカテゴリを総称したものである。モデリング技術では吸気管の燃料付着モデルやシリンダ流入空気量の遅れモデルなどが実用になっている。また信号処理技術では周波数分析や相関解析などが次第にオンボード化され、さらには現代制御理論も最適レギュレータを始めとして実効を上げつつある。いずれにしてもマイクロコンピュータの性能向上はこうしたアドバンスト制御の適用を容易に受け入れるところまで来ている。

3. 直噴エンジンの制御システム

ガソリンエンジンの技術開発は、車の持つ走りの良さを追及するとともに排気浄化や燃費低減に向けて多年にわたり続けられてきている。こうした課題解決の一つの答えとして、最近、図3で示すような直噴エンジンが市場投下され出した。現行のポート噴射エンジンに比べて燃費を飛躍的に改善できることから普及拡大が期待されている。

直噴エンジンにおける制御システムは、従来のポート噴射式に比べると一段と緻密かつ複雑な機能を持つことになる。図3において、まず燃料系はインジェクタへの燃料供給圧力の負荷に応じた設定や噴射タイミングも吸気行程だけでなく圧縮行程も選べる。点火系はエネルギーが強化され、また燃料気化で吸気冷却はされるが圧縮比を上げるのでやはりノッキングの管理が重要である。空気系では流動制御弁が付加されるとともにスロットルを電子制御式にしてストイキから50%近くまでの広範囲な空燃比でのスムーズな運転を実現する。さらに排気浄化のためにEGRの容量を従来の10倍も増して燃焼速度を制御する。このように直噴

きた。図2はこうしたエンジン制御におけるアドバンスト制御のアルゴリズムを適用した例を示す。ここでのアドバンスト制御とは、(1)モデリング技術にもとづくエンジン特性の制御系への組み込み、

エンジンでは制御の自由度が増すだけに、エンジン性能を十分に引き出すうえで、ドライバの意図に即応したきめ細かな制御が求められる。

ここでは、直噴エンジンの制御の中でも2章で述べたアドバンスト制御に関するものとして、電子制御スロットルのLQG制御、周波数分析に基づくノッキング検出と気筒別トルク変動検出について述べる。

4. 電子制御スロットルの制御

スロットルはもともとアクセルペダルと連動してドライバの意図つまり駆動力要求をエンジンに伝える手段である。しかしリーンバーンやAT、CVTが普及してエンジンと伝達系の駆動力配分を最適化するうえで、アクセルペダルと切り離して自動操作するコンセプトが受け入れられるようになってきた。特に直噴エンジンのように燃焼条件によりトルク段差を生じやすい場合には電子制御スロットルの使用が効果的である。写真1はコンパクトに設計された最新の電子制御スロットルの外観を示す。4気筒エンジン向けのもので、直流モータ、変速ギア、開度センサ、そしてバタフライ弁で構成されている。電子制御スロットルには、アクセルペダルよりも速い応答性能とアイドル制御弁に代替できる分解能が要求され、しかも環境変化とくに周囲温度やバッテリー電圧の変動にロバストでなければならない。

図4に電子制御スロットルにおける制御系の例を示す。開度要求に対して、(1)開度センサを用いたフィードバック制御、(2)DCモータの電流フィードバック制御、(3)制御偏差が少なくなった整定時に作動する間欠デューティ制御の3段階の制御で追従させている。たとえばステップ状の大きな開度

要求があった場合、まず電流制御により駆動トルクを最大にして偏差に即応させる。次にスロットルの速度に応じた回転抵抗による線形制御域に入るので、最適レギュレータ(LQG:Linear Quadratic Gaussian)制御によって

安定した目標値の追従を行う。目標値の近くまで来ると静止摩擦に抗するためデイズ制御で強制的に作動させ、定常偏差を低減する。またこの制御では、ロバスト性、追従性さらに制御パラメータの調整が容易である2自由度LOG制御を用いた。図5で2自由度LQG制御の構成と応答を示す。まず電流制御を含むスロットルボディを2次モデルで記述してこれをノミナルモデルする。最適制御ゲイン H 、 K_p 、 K_D をLQ問題として解き、同時に温度や電圧の変化によるモデル誤差を見積もって K_1 、 K_p' 、 K_D' を定める。図5下左の H 、 K_p 、 K_D で構成された最適レギュレータによる応答がモデル誤差で悪化するのに対し、同右の2自由度型にするとモデル誤差があっても良い応答が得られる。

これらの実験結果を図6に示す。図6下が通常のバッテリー電圧14Vで、同上が6.5Vまで低下したときのデータである。バッテリー電圧により応答時間には違いを生じるがいずれも良好な応答を示しており、また温度が常温25°Cから125°Cへと大きく変わっても応答への影響が少ないことが分かる。

5. ノッキングの制御

直噴エンジンでは燃料によるシリンダ内の冷却効果でノッキングは生じにくくはなるが、その分だけ圧縮比を上げるて相殺されるので、やはり加速時や高速運転でのノッキング制御が重要になる。図7でノッキングの発生条件をトルクと点火時期の関係で示す。圧縮比が高くなると点火時期のわずかな偏差がトルクの低下に繋がり易く、より高精度なノッキング制御が必要になると言える。

ここではノッキングをマルチスペクトル方式で

検出する技術を取り上げる。ノッキングが発生するとシリンダ内で、図8に示すようないくつかの共鳴振動モードによる圧力振動が観測される。これは回転でシリンダが下方へ移動する課程で容積が変化して、共鳴振動モードが変わるためと考えられる。従来の方法では、エンジンの機種に応じて発生しやすい共鳴振動モードだけに的を絞り、バンドパスフィルタを用いて抽出していた。しかしこの方法では、図9上のように通常は検出できるが、同下のように検出できないときがある。こうした現象は同じ運転条件でもランダムに生じる。従って検出漏れを防ぐには、ノッキングによる圧力振動のスペクトルが燃焼毎に変化することを前提にした検出方法にしなければならない。

マイクロコンピュータの進歩によりオンボードでの周波数分析も可能になってきた。図10にマルチスペクトル方式によるノッキング検出の手順を示す。燃焼毎に始動し、まずノックセンサ出力を約20 μ sの高速で時間同期サンプリングする。次にFFT(Fast Fourier Transform)で5~20kHzの共鳴周波数におけるパワースペクトルを求める。ここで共鳴周波数は $N=5\sim 8$ ケになる。この共鳴周波数毎に記憶したバックグラウンドレベル(BGL)との比を求め、さらに総和を計算してノッキング強度を示す指標KIとする。

このノック指標KIが所定値を超えたときにノック発生と判定する。ここでバックグラウンドレベルはノック判定されなかった最新4データの平均値とする。またパワースペクトル比の総和を計算する際に、値の大きい成分2~3ケを毎回選択する方法がS/Nを向上させるのに効果的である。図11はノッキング制御による結果を比較したものである。図11右の従来方式は高回転での制御が難しいのに対して、同左のマルチスペクトル方式では全域での制御が可能であり、また進角制御も1~2度CAの改善が見られる。

6. 空燃比限界の気筒別検出

最近では燃費を改善のためにスロットルの絞り損失を低減できる希薄燃焼技術が普及しつつある。ポート噴射エンジンで $A/F=20$ 、直噴エンジンでは $A/F=40\sim 50$ にまで空燃比を大きくして運転する。希薄過ぎると燃焼は不安定になるため空燃比限界を管理することが必要である。この空燃比限界は、燃料性状、大気湿度、燃料圧力、噴射時期、点火時期などにより変動するので運転中の管理が必要である。図12は燃料圧力を変えた時の燃焼の安定限界を示

す。ここでは空燃比限界が 27~39 の範囲で変動している。

空燃比限界はトルク変動により検出する。センサとしては筒内圧力が良いがコストの点から回転変動を利用するのが一般的である。ここでは回転変動を用いて気筒毎の空燃比限界を検出する方法を紹介する。ただしこの方法は 2000rpm 以下の低回転域を対象とする。図13は6気筒エンジンのクランク軸に取り付けた回転センサの出力信号を周波数分析した結果を示す。通常、空燃比限界の検出には 3~7Hz の振動が利用される。空燃比限界で燃焼不安定となり、トルク変動によってクランク軸がねじれ振動を生じる現象を捉える方法である。この方法は簡便であるため普及しているが、タイヤから伝わる振動に弱いことと原理的に気筒別の検出は出来ない。空燃比限界を気筒別に検出するにはもっと高周波数における振動成分を利用しなければならない。そこで燃焼行程（6気筒であれば 120° CA）を周期とする1次周波数成分ならびに2次周波数成分を用いることにする。図13では 100Hz と 200Hz の成分が相当する。図14で、最近のマイクロコンピュータを利用して回転変動を高分解能で計測する方法を示す。カム角度信号（6パルス/2回転）で回転基準を定めてクランク角度信号（180パルス/回転）で作る計測ウインドウ（4パルス/ 8° CA）をマイクロコンピュータのクロック信号でカウントするものである。こうして得られたカウント値 $T8_i$ を図15で

示す。2回転毎の区切って重ね書きしたもので、同上是安定した燃焼でのカウント値であり、同下は空燃比限界でのデータである。図16では $T8_i$ から P_i 変動を推定する方法として、周波数分析法と積分法の2つの信号処理法を示す。図17に P_i 変動の気筒別推定結果を示す。積分法に比較して周波数分析法が良好な結果が得られている。

7. おわりに

マイクロコンピュータの処理性能が100倍/20年の速度で進展してきており、きめ細かかつ大規模なエンジン制御が実現可能となった。ガソリンエンジンのエミッションを見ると、ここ20年でHC排出が1/100にも低減されているが、こうした背景にはマイクロコンピュータが少なからず貢献してきた。これは制御ソフトウェアの量が10~20倍にも増大していることから明らかである。

一方、燃費（CO₂）低減を見ても緩やかではあるが着実に進展してきている。ただし燃費に関してはエンジン本体や機構の改善あるいは軽量化などに寄るところが大きい。しかし燃焼の希薄化を取り上げると、やはりマイクロコンピュータの果たす役割が大きい。本文では最近の直噴エンジンの性能をより引き出すための要素技術として、電子制御スロットルのロバスト制御、マルチスペクトル方式によるノッキング制御、さらに回転変動による気筒別空燃比限界の検出につき報告した。

これからの燃費低減技術を考えると、燃焼の直接制御あるいはモータ駆動弁や電磁駆動弁などの拡大によって制御項目がさらに増えると考えられる。また軽量化が進むと安定性を制御技術でカバーすることも必要である。アドバンス制御の進展がますます重要になってくる。マイクロコンピュータはこうした要求を十分に受け入れる余地があり今後のさらなる活用が期待される。

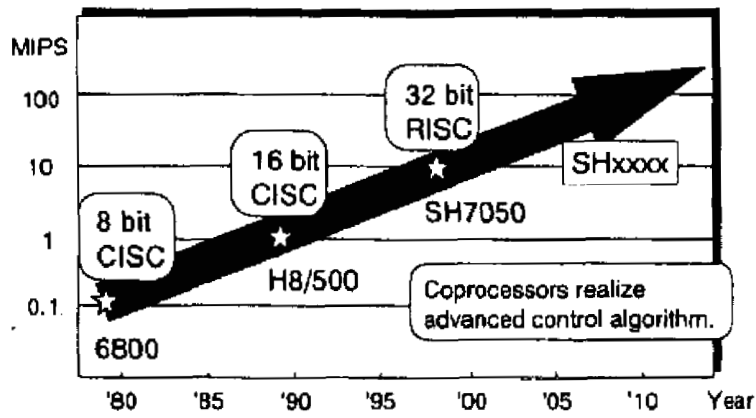


Fig.1 Microcomputer Performance Improvement

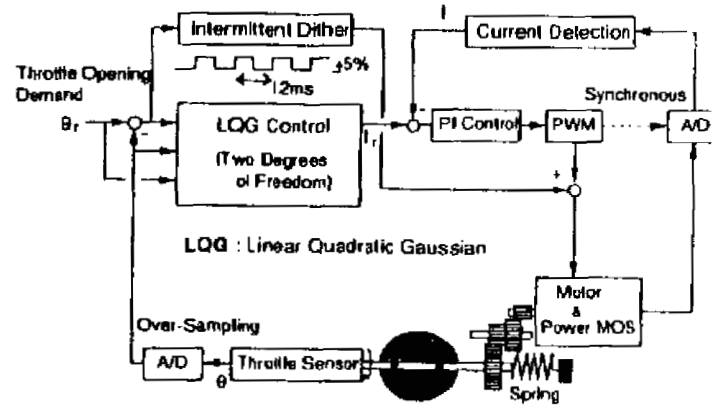


Fig.4 LQG Based Throttle Control

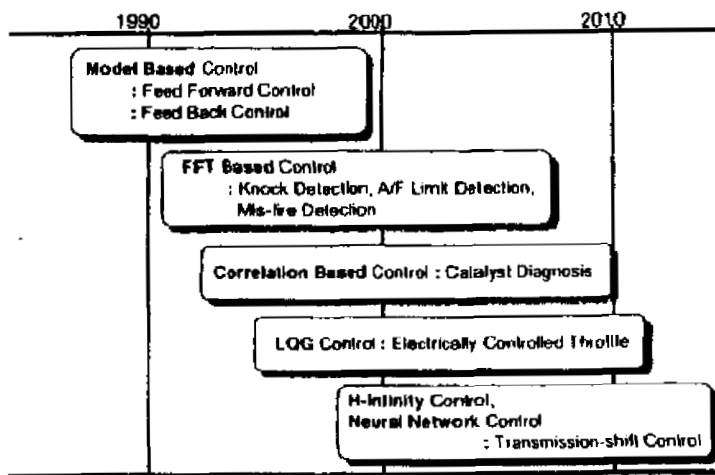
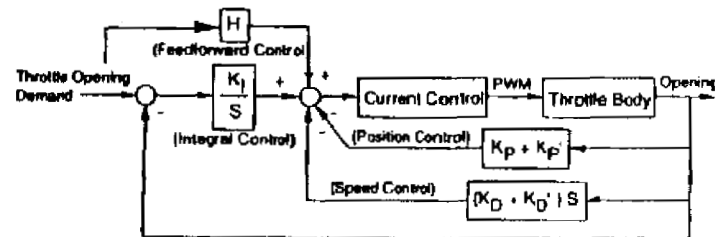


Fig.2 Advanced Control Overview



Gains H , K_P and K_D optimize tracking in throttle opening.
Gains K_I , K_P' and K_D' give robustness for temp. & voltage changes and modeling error.

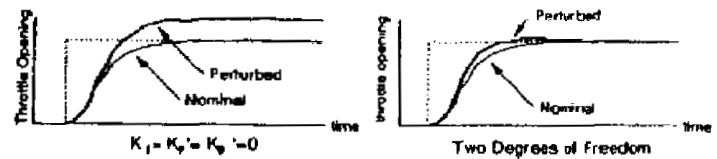


Fig.5 Two-degree-of-freedom LQG Control

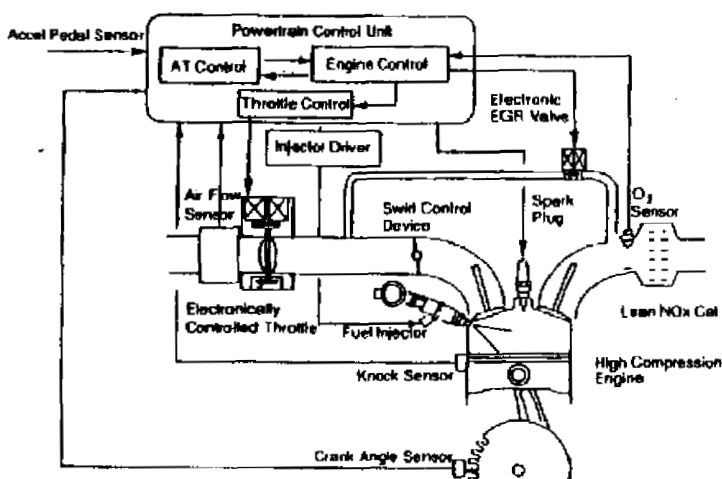


Fig.3 SI Engine with Direct Injection Control System

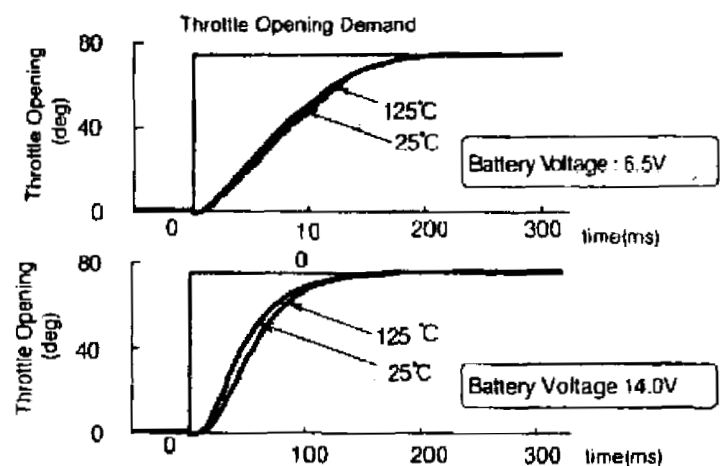


Fig.6 Test Results of Throttle Control

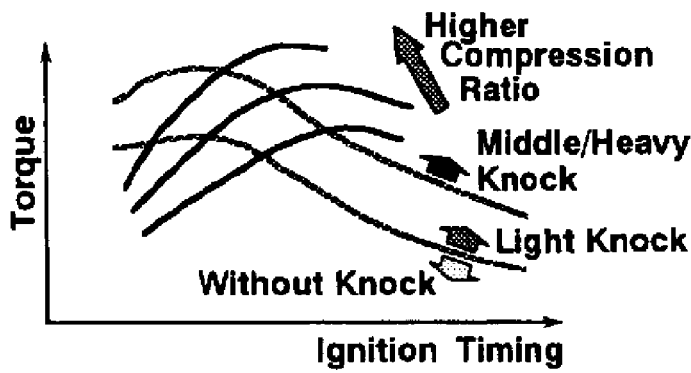


Fig.7 Influence of Compression Ratio on Power Output and Knock Occurrence

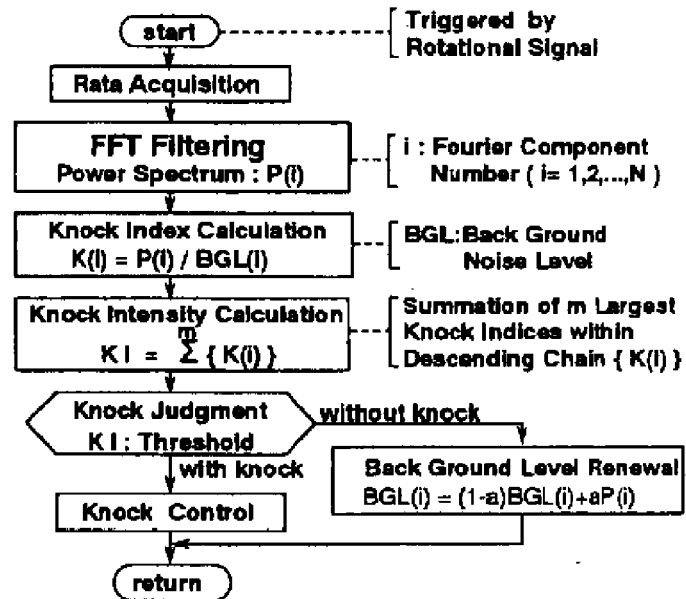


Fig.10 Knock Detection Based on Multi-spectrum Method

Resonant Vibrations of Cylinder Pressure

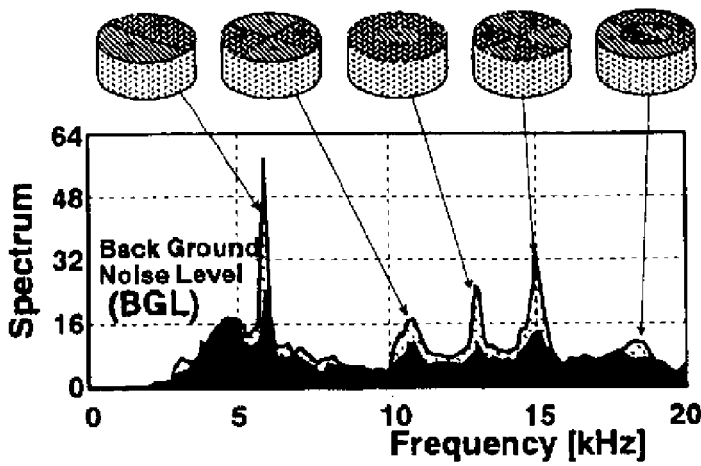


Fig.8 Resonant Vibration Mode and Spectrum of Cylinder Pressure

Engine Speed [rpm]	multi spectrum knock control	single spectrum knock control
1000	control deviation 3 degree CA	control deviation 4 degree CA
2000	4 degree CA	5 degree CA
3000	4 degree CA	5 degree CA
4000	5 degree CA	7 degree CA
5000	5 degree CA	uncontrollable
6000	5 degree CA	uncontrollable

Fig.11 Knock Control Liability on Multi-spectrum Method as Compared with Conventional Method

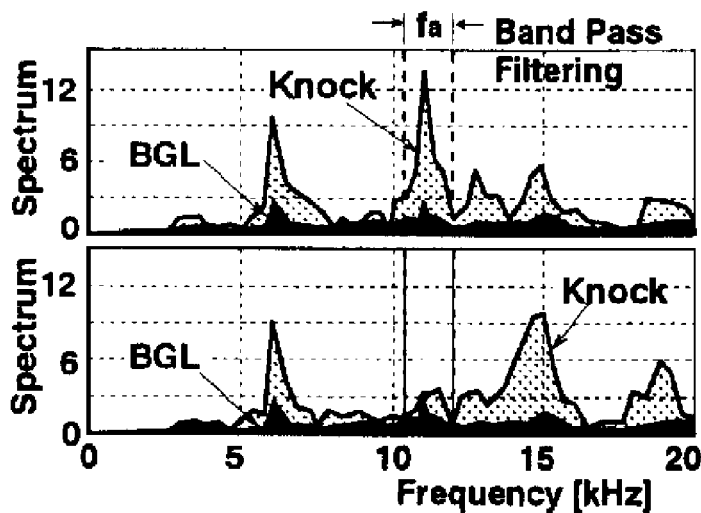


Fig.9 Problem to Conventional Method for Knock Detection

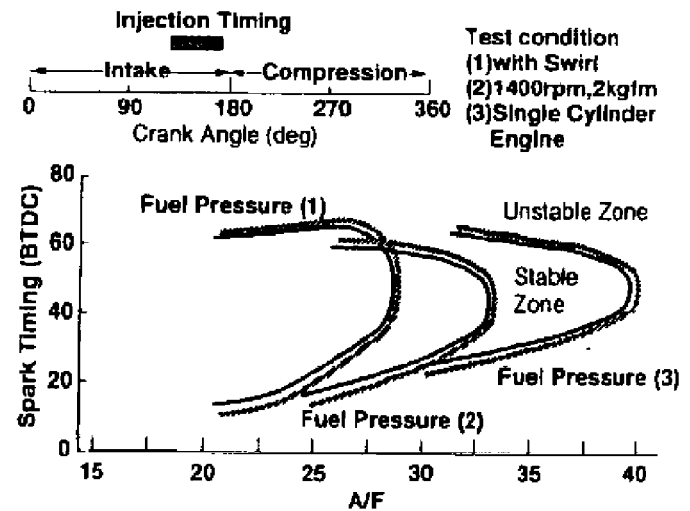


Fig.13 Frequency Components of Engine Speed Fluctuations

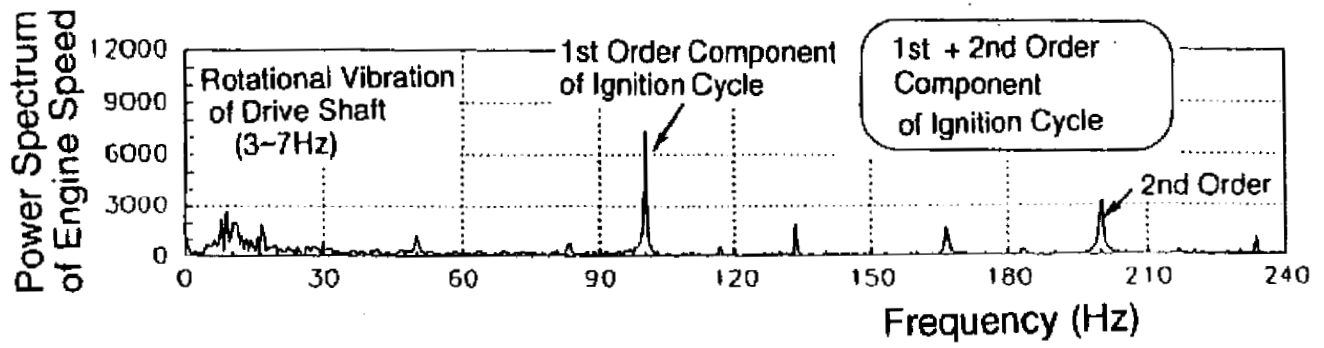


Fig.12 Air/Fuel Ratio Limits Depending on Fuel Pressure

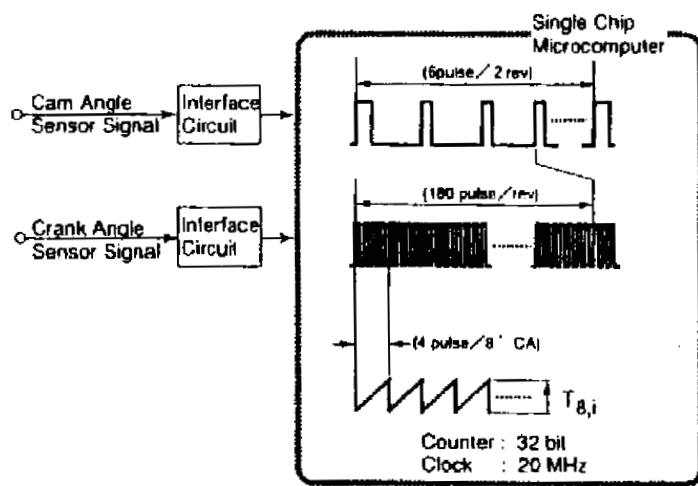


Fig.14 Precise Measurement of Engine Speed Fluctuation

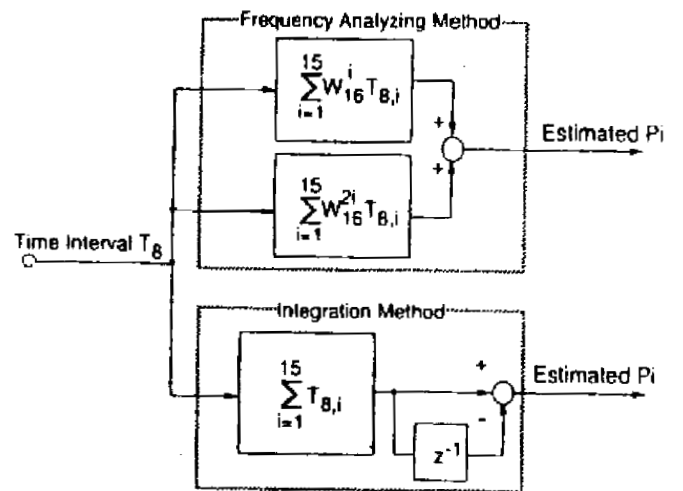


Fig.16 Signal Processing Methods for P_i Estimation

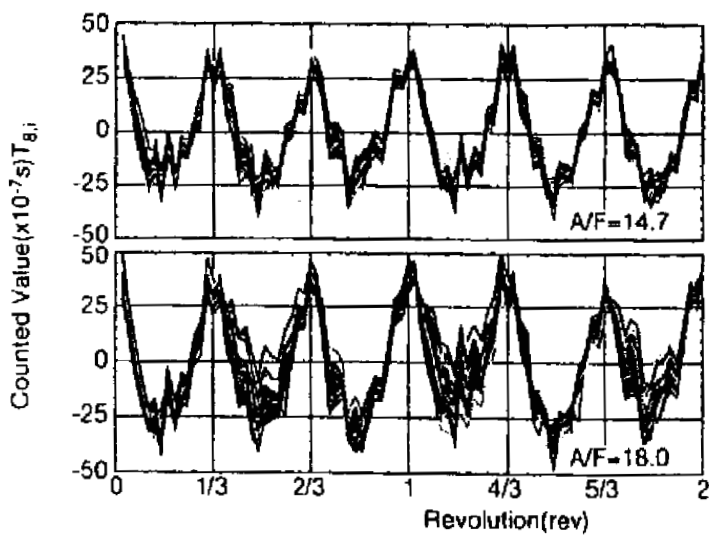


Fig.15 Counted Value of Engine Speed

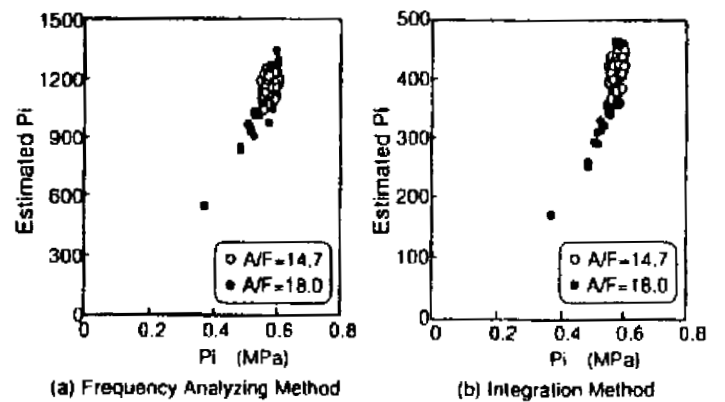


Fig.17 P_i Estimation Results for Every Cylinder