

電動ポンプ式油圧パワーステアリング用 ブラシレス直流モータの制御技術

藤田和彦

Development of Control Method for Hydraulic-Electro Power Steering System Using Brushless DC Motor

K. FUJITA

Considering environment protection, Koyo is mass producing energy saving power steering systems using brushed DC motors.

Now, Koyo has developed a new type of brushless DC motor and started production of power steering with this DC motors. This report presents the control method of the brushless DC motor for the Hydraulic-Electro Power Steering (H-EPS) System.

Key Words: power steering, brushless DC motor, hydraulic

1. はじめに

近年，環境保全問題のクローズアップとともに，自動車もまたその対応が急がれている．省エネルギーと操舵フィーリングを両立させる商品として，当社で量産中の電動式パワーステアリング（以下EPSと称す）があるが，従来から広く普及しているエンジン駆動ポンプ式油圧パワーステアリング（以下NPSと称す）の油圧ポンプを電動モータにより駆動する電動ポンプ式油圧パワーステアリング（以下H-EPSと称す）も，注目されている．

従来の直流ブラシ付きモータは，H-EPS向けには制御性，耐久性等について大きな問題があり，一方ブラシレスモータはその高い信頼性，性能ならびに低コスト化が進められ使用拡大の方向にある．本報では，ブラシレス直流モータを使用したH-EPSの制御方式について述べる．

2. H-EPSシステム概要

1) H-EPSシステム構成

図1にH-EPSシステムの構成を示す．ステアリングギヤは従来のNPSと同じである．その油圧源である高効率のギヤポンプはバツ

テリ（オルタネータ）を電源として優れた起動特性を持つ低慣性のインナーロータ型3相ブラシレスモータにて駆動される．このシステムでは操舵フィーリングを従来のNPSに比べ悪化させることなく，省エネルギー化を図ることが可能である．

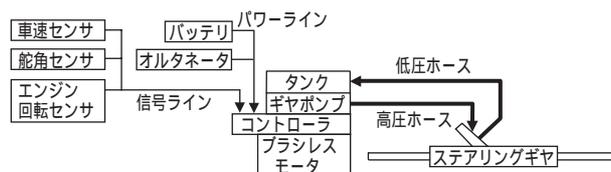


図1 H-EPSシステム構成
System diagram for H-EPS

2) ブラシレスモータのしくみ

図2にブラシ付きモータとブラシレスモータの構造を，表1にその違いを示す．

ブラシレスモータとは従来の直流ブラシ付きモータの整流の役割を持つブラシ・コンミテータの機械的な接触によるスイッチングを電気的な非接触のスイッチングを行う半導体素子に置き換えたものでありブラシの摩耗による耐久性が解決し，高い信頼性を備えている．

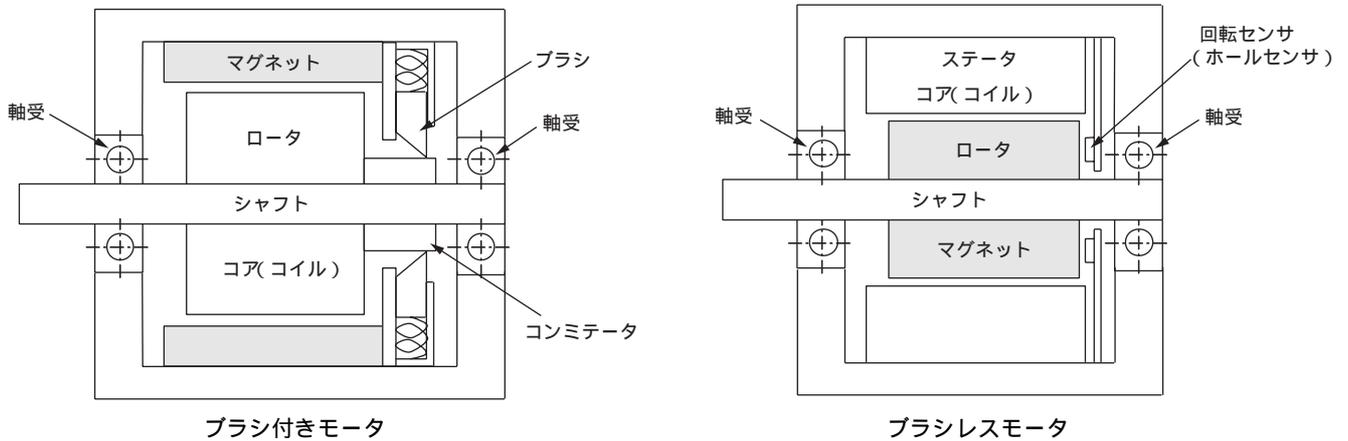


図2 ブラシ付きモータとブラシレスモータの構造
Structure of brush motor and brushless motor

表1 ブラシ付きモータとブラシレスモータの比較
Comparison of brush motor and brushless motor

	ブラシ付きモータ	ブラシレスモータ (インナーロータ型)
構造	ブラシ・コンミテータの整流部複雑	ステータ巻線部複雑
コスト	駆動回路不要のため安価	やや高価
出力/体格	整流部があり小さい	大きい
損失	摺動部により大きい	小さい
ノイズ	ブラシ摺動音が大きい	小さい
耐久性	ブラシ摩耗により劣る	優れる
振動	ロータアンバランスにより大きい	小さい
始動特性	ロータ慣性が大きく劣る	優れる
磁気設計	特に問題なし	減磁に留意必要

3) システム制御構成

図3にH-EPSシステムの制御ブロック図を示す。

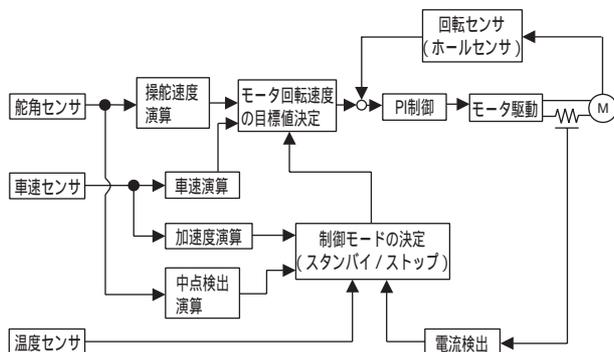


図3 H-EPSシステム制御ブロック図
Control block diagram for H-EPS system

コントローラは車両側の舵角センサ、車速センサ信号をもとに最適な操舵フィーリングを得るためのモータ回転速度の目標値を決定する。そして、モータ回転速度を目標値に一致させるため回転センサ(ホールセンサ)信号によるフィードバック系ループ制御がなされている。

3. ブラシレスモータの制御

1) モータ駆動制御

EPS用モータに比べ、H-EPS用モータはポンプを高速回転で駆動することが要求される。これはバルブの開閉による油圧を利用しているため規定のオイル流量を確保する必要があり、その一方で配管およびリザーバが適度なダンパ効果を持つため、それほど厳密なトルク制御(トルクリップル)が要求されない。本理由により当社ではMOS-FETを用い120度バイポーラ駆動方式とし、高密度巻線をしやすくし、結線を簡素化するために3相デルタ結線を採用した。

図4に3相デルタ結線による120度バイポーラ駆動方式によるシーケンスを示す。

表2にデルタ、スター結線およびモータ駆動方式によるメリット、デメリットを示す。

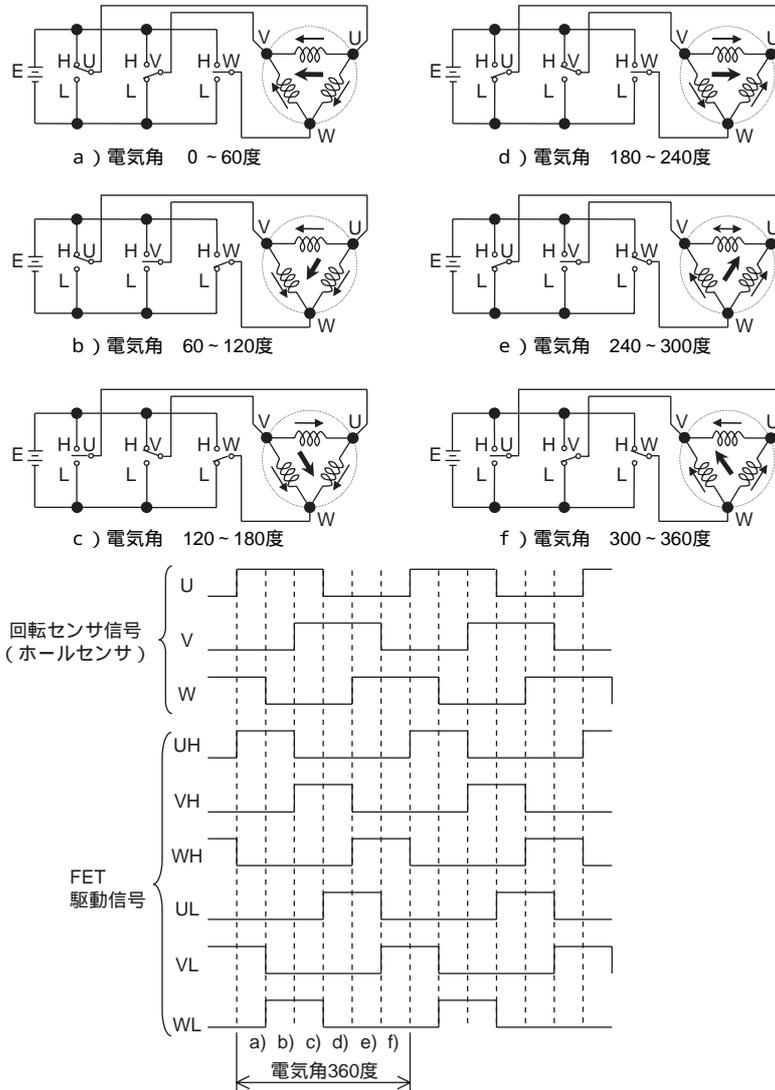


図4 3相デルタ結線における120度バイポーラ駆動方式によるシーケンス
Sequence by 120 degrees bipolar drive in 3 phase delta connection

表2 デルタ(Δ), スター(Y)結線およびモータ駆動方式によるメリット, デメリット
Merits and demerits for delta, star connection and motor drive methods

結線	駆動角 (deg)	コイル通電 (deg)	特徴	
			メリット	デメリット
(デルタ)	120	180	効率: 比較的高い, コスト: 安価 巻線サイズ: Yに比べ細線化	トルク変動: 大きい
	180	120 (方形波駆動)	トルク変動: 小さい	効率: 低い
		180 (正弦波駆動)	効率: 高い, トルク変動: 小さい	コスト: 高価 不平衡電圧が発生すると循環電流が流れる.
Y (スター)	120	120	効率: 比較的高い, コスト: 安価	巻線サイズ: Δに比べて太線化 トルク変動: 大きい
	180	120 (方形波駆動)	トルク変動: 小さい	効率: 低い
		180 (正弦波駆動)	効率: 高い, トルク変動: 小さい 不平衡電圧が発生しても循環電流が流れず	コスト: 高価

2) 回転速度制御

図5にモータ回転速度制御ブロック図を示す。

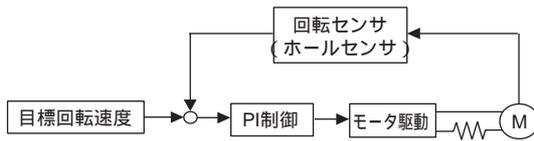


図5 モータ回転速度制御ブロック図

Motor rotation speed control block diagram

パワーステアリング(以下PSと称す)の全作動域において、油圧源のポンプ負荷変動による油圧の外乱を防止するため、ロータ位置センサ信号から生成される速度信号を用いた回転速度フィードバックPI制御を行うことによりオーバーシュートがなく優れたレスポンスを持つシステムとしている。

4. H - E P S 用モータ制御

当社のH - E P Sシステムにはスタンバイ制御、ストップ&ゴー制御、アイドル&ゴー制御と呼ぶ3つの制御方式がある。以下にそれらの制御方式について、それぞれ述べる。

1) スタンバイ制御

スタンバイ制御とは、主にブラシ付きモータを使用し、外部センサなしで電動ポンプユニットを効率的に制御する制御方式として開発したものである。

図6にスタンバイ制御ブロック図を、図7にモータ電流変化量に対するモータ駆動電圧の制御MAPを示す。

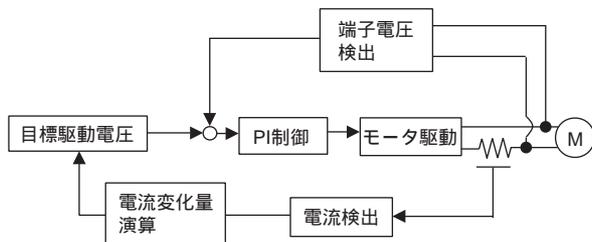


図6 スタンバイ制御ブロック図

Stand-by control block diagram

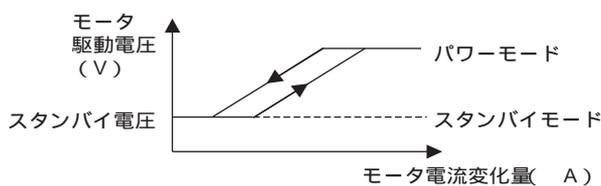


図7 モータ電流変化量に対するモータ駆動電圧制御MAP
Control map of motor current variation versus motor drive voltage

制御方法は、直進走行時や停車時等のハンドル非操舵時にはモータを低速回転で駆動(スタンバイモード)し、アシスト力を必要とするハンドル操舵時にはモータを高速回転で駆動(パワーモード)させる。

スタンバイモードからパワーモードへの移行は外部のセンサを使用せず、コントローラ内部のモータ電流検出回路にて検出し、モータ電流値の変化量を演算することにより操舵状態を判断しモータ駆動電圧を変化させることでモータ回転速度の制御を行う。

ただし、この方式では、モード移行時の応答性が悪く操舵フィーリングの悪化を招きやすい。このためにスタンバイ回転速度を高く設定する等の対策が必要で省エネルギー性への効果が少ない。

2) ストップ&ゴー制御

前述のスタンバイ制御の省エネルギー性をさらに改善するため、モータには始動特性の優れた低慣性のブラシレスモータを使い、外部センサに舵角センサを使用したストップ&ゴー制御の開発を行った。

システム制御の基本はスタンバイ制御と同様で、直進走行時や停車時等のハンドル非操舵時にはモータを停止させる。そして、ハンドル操舵時はモータを停止状態からすばやく目標回転速度まで立ち上げる必要がある。このため、舵角センサより出力される信号を使い演算した操舵速度から最適なアシスト力を発生するモータ回転速度を瞬時に決定し目標回転速度まで立ち上げている。

以上のように本制御方式は、前項のスタンバイ制御に比べて操舵フィーリングを悪化させることなく、大幅な省エネルギーが可能なシステムとなっている。

(1) 操舵速度制御

ストップ&ゴー制御では、操舵フィーリングを悪化させないために操舵速度に対するモータ回転速度を変化させることで油圧を発生させるバルブへの供給流量が一定となるように補正を行っている。

図8に操舵速度に対するモータ回転速度制御MAPを示す。

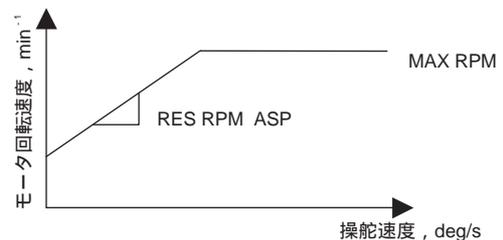


図8 ハンドル操舵速度に対するモータ回転速度制御MAP
Control map of steering speed versus motor rotation speed

(2)モータ起動制御

従来の制御ではモータは一定電圧で起動しているため極低速操舵時と高速操舵時の操舵フィーリングが両立しない。(極低速操舵時を優先させると高速操舵時の操舵トルクが目標より重くなり、逆の場合は目標より軽くなる：図9参照)

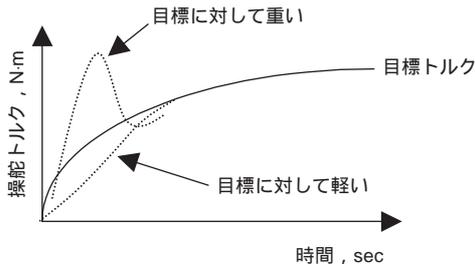


図9 モータを一定電圧で始動した時の操舵トルク
Steering torque when motor started at constant voltage

モータが停止している状態からハンドル操舵で瞬時に始動させる際、操舵フィーリングを悪化させないようにする必要がある。このため、操舵速度に応じてモータ起動電圧を変化させている。極低速操舵時には、緩やかにモータを始動、高速操舵時には即座にモータを起動。

図10に操舵速度に対するモータ始動電圧制御MAPを示す。

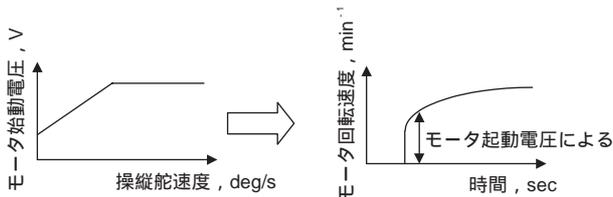


図10 操舵速度に対するモータ始動電圧制御MAP
Control map of angle speed versus motor start voltage

(3)中点検出制御

ストップ&ゴー制御では直進時にハンドル中立位置でモータを停止させる必要がある。絶対角を検出する舵角センサを使用する方法もあるが、絶対角センサを車両に搭載する際の作業性、コスト、位置検出精度等に多くの問題があり現時点では実現が困難である。

このため相対角を検出する舵角センサを用いて、低速走行時はモータ電流と操舵量、高速走行時は操舵位置と走行距離を用いてハンドル中点を演算して検出する制御アルゴリズムを開発した。以下その概要を説明する。

図11に中点検出制御ブロック図を示す。

低速走行時は保舵したときに、操舵位置と電流値を検出する。

長いカーブでの保舵時に連続して検出して、誤

った位置での中点決定を防止するために、一度検出を行うと大きく操舵を行うまでは次回検出を行わないよう中点更新のリミッタ機能を設けた。上記方法により検出された数组のデータの電流値を比較して小さいものを中点候補として選び出し、それらの操舵位置を比較することにより中点を決定する。

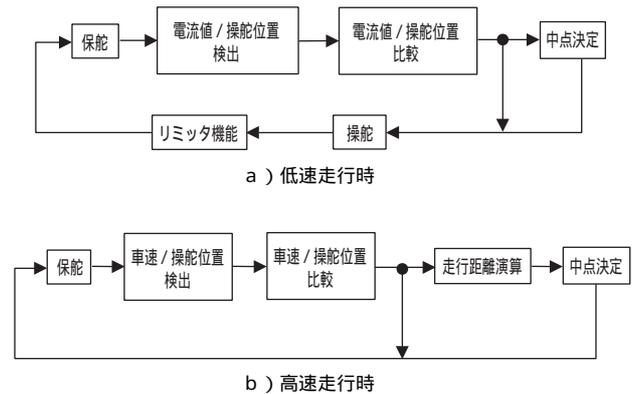


図11 中点検出制御ブロック図

Neutral point detection control block diagram

高速走行時では操舵頻度が低く、大きな操舵が行われないので、低速走行時の中点検出方法のみでは中点決定がほとんど行われない。この問題を解決するために操舵が行われなくても中点を検出する方法を併せて開発した。

保舵時に操舵位置と車速を常に監視し続け、ある操舵位置範囲内で一定の走行が行われた時、その操舵位置を中点候補として選び出し、それらの操舵位置を比較することにより中点を決定する。

3)アイドル&ゴー制御

分解能の低い舵角センサを使った場合でも操舵フィーリングの悪化を防ぐために完全にモータを停止せずに極低速回転(アイドルモード)で待機させる制御方式を合わせて開発した。

この制御方式では、直進時にモータを停止させる制御を極低速状態に変更した以外はストップ&ゴー制御と同様の制御アルゴリズムを持つ。

5. その他の制御

1)車速制御

図12に車速に対するモータ回転速度制御MAPを示す。

PSシステムでは低速走行時には操舵力を軽くし、高速走行時には操舵安定性を持たせるために操舵力を重くすることが好まれる。そこでH-EPSでは下記4つの値を車速制御することにより、よりよい操舵感を達成している。

スタンバイ回転速度
 アイドル回転速度
 操舵速度-モータ回転速度特性傾き
 最大回転速度

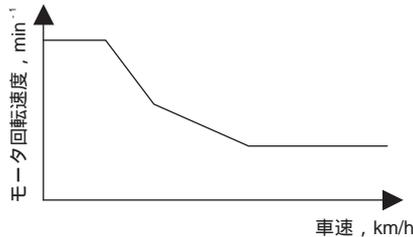


図12 車速に対するモータ回転速度制御MAP

Control map of vehicle speed versus motor rotation speed

(1)スタンバイ回転速度およびアイドル回転速度

スタンバイ回転速度およびアイドル回転速度を大きくすると操舵力は軽くなり、回転速度を小さくすると操舵感は重くなる。基本的に車両停止状態でもっとも大きく、高速になるにつれて値を小さくしていくことにより、高速時でのハンドル中立付近での操舵安定性が得られる。

(2)操舵速度 - モータ回転速度傾き

図8に示される操舵速度 - モータ回転速度特性の傾きを大きくすると、操舵応答性が改善される。基本的に車両停車状態でもっとも大きく、高速になるにつれて値を小さくしていくことにより、操舵応答性とアシスト力が向上する。

(3)最大回転速度

スタンバイ回転速度と操舵速度 - モータ回転速度特性の傾きを変化させると車両停止状態では特にロードノイズもなくエンジンも低回転であるため、モータ回転速度が上昇しすぎて、ポンプおよびモータ音が不快に感じることもある。そこで、図8に示される操舵速度 - モータ回転速度特性のモータ回転速度の最大回転速度を車両停止状態では低く抑えて騒音を低減している。

2 加速度制御

危険回避等の急減速時に、車両の慣性により前輪荷重が増加した場合でも、スムーズな操舵を可能にする必要がある。このため車速センサ信号より加速度を演算し操舵されることを事前に予測し、モータを停止状態またはアイドル回転速度よりスタンバイ回転速度に移行し、逆にスタンバイ回転速度にある場合は停止状態またはアイドル回転速度には移行しない加速度制御を行っている。

図13に加速度制御ブロック図を示す。



図13 加速度制御ブロック図

Acceleration control block diagram

3)低温始動制御

従来のエンジン駆動ポンプに比べてモータを使用した場合は低温の時にP S オイルの粘度が影響しポンプの始動性が問題となる。

そこで、本システムでは温度センサを使用し、低温時にはモータをフル駆動しオイルの温度が適性となれば通常制御に戻る。

図14に温度に対するモータ駆動電圧制御MAPを示す。

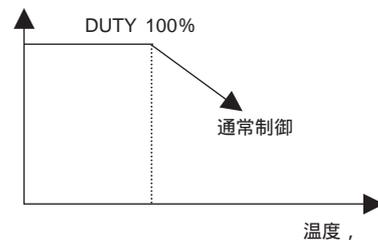


図14 温度に対するモータ駆動電圧制御MAP

Control map of temperature versus motor drive voltage

4)フェールセーフ制御

従来のNP Sのようなエンジンによるベルト駆動ではベルト切れを事前に検知することは困難であるがコントローラを持ったモータで駆動することによりE P Sのような各種のフェールセーフ機能を持つことが可能となり設計F M E A 解析の結果にて故障時にも、その故障を検出し安全にシステムを停止する。

そして、故障の原因を明確にするための自己診断機能(ダイアグノーシス)を持つことが可能となった。

また、エンジン停止時にも顧客のニーズにより車両の安全性を向上するためにP Sのみ作動させるような制御の自由度も併せ持つことが可能である。

表3にフェールセーフ機能として各種代表的な故障検出項目を示す。

表3 故障検出項目

Failure detection items

モータ内部故障	モータ外部 車両側 故障
モータロック機能	車速センサ故障 (断線, 天・地絡)
モータ電流過大(短絡)	舵角センサ故障 (断線, 天・地絡)
モータ温度過大	エンジン回転速度センサ故障 (断線, 天・地絡)
E C U回路故障	バッテリー電圧低下

5) 通信制御 (CAN通信)

また、従来のISO9141によるKライン通信に加え、今後、特に欧州で多くの自動車メーカーにて採用が検討されているCAN通信(Control Area Network)にも対応している。

今日、欧州車両メーカーのほとんどは駆動系並びに多重通信系にCANベースのネットワークを使用しており、今後ますます増加の傾向にある。米国でもJ1850に代わってCANベースのネットワーク(J2411やJ2284)がすでに検討されている。

CANのメリットとして既存のシリアル通信制御での車に比べ、車1台分でケーブルは約200m~1km分減らすことができ、さらに重量も9~17kgも軽くすることが可能といわれている。また、コントローラも各種センサとの直接インターフェースに要する回路を削減することができ、有利な面が多い。

6. 開発環境の整備

1) チューニングツールの開発(パラメータ変更機能)

当社ではH-EPSシステムを該当開発車両に短時間で最適マッチングさせるためのPCベースのチューニングツールの開発も同じに行った。

図15にチューニングツールの構成を、図16にパラメータ変更ツールの表示画面の一例を示す。

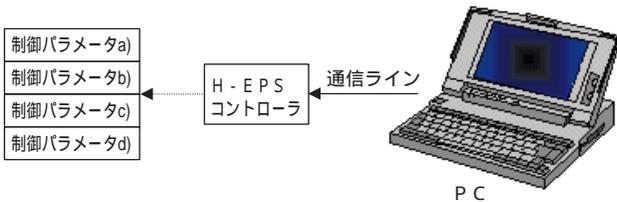


図15 チューニングツールの構成
Structure of tuning tool

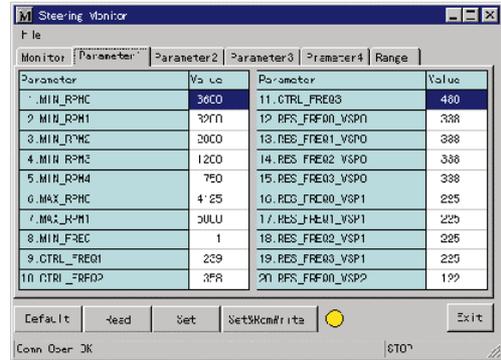


図16 パラメータ変更ツールの表示画面一例
Display example of parameter changing tool

このチューニングツールは、コントローラの制御パラメータをPC画面上で変更するだけで書き替えることが可能であり、車両に搭載した状態で使用できるため開発期間の大幅な短縮化が可能である。

2) リアルタイムモニタの開発

必要なデータをオンラインにて簡単にリアルタイムで観察・収集し、開発に役立てることが可能なリアルタイムモニタも開発し、チューニングツールの機能の付加価値を向上させた。

図17にリアルタイムモニタの画面を示す。

これにより、チューニングパラメータを変化させた時の操舵応答性に及ぼす影響をテストドライバーが車両の運転状態においても簡単に知ることができ、きめ細やかなチューニング作業がリアルタイムでできるようになった。

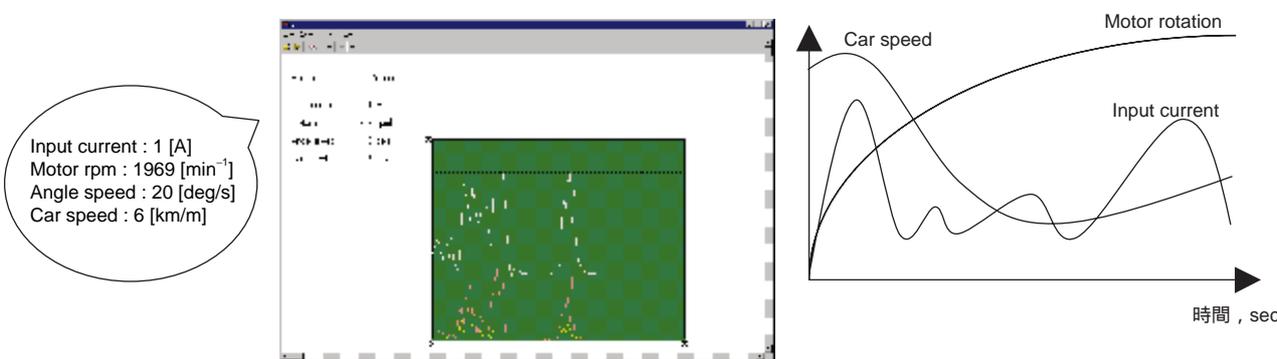


図17 リアルタイムモニタの画面
Display of real time monitor

7. 省エネルギーへの効果

自動車の燃費測定には、シャーシダイナモによる10.15モードや各種モードの測定を実施する方法が一般的である。

しかし、これらの測定では、直進時の速度変化モードしか入力されていないため、当社では、ステアリングシステムを考慮した燃費測定法により、実際の走行に、より近い操舵モードが含まれたTOWNモードやEUモードでの測定を行うようにした。この結果、本ストップ&ゴーシステムでの消費エネルギーはNPSに比べて大変大きな効果が得られることが判った。

図18に従来のNPSに対するH-EPS各制御モードでの省エネルギー性能を示す。

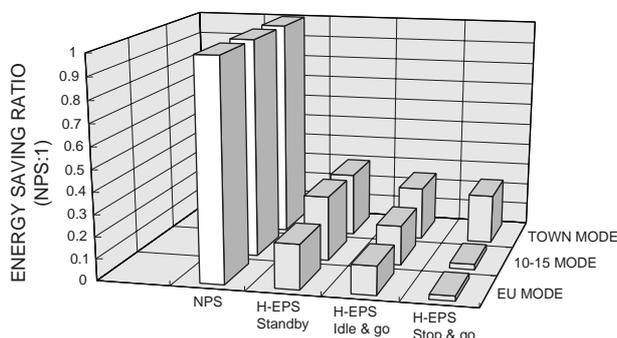


図18 H-EPS各制御モードでの省エネルギー性能 (NPS比)

Energy consumption ratio in each H-EPS control method compared with NPS

8. おわりに

以上述べたように、当社では地球環境保全対策商品として位置付けた、省エネルギー対応パワーステアリングシステムの開発にいち早く取り組み、従来のNPSに対して燃費が大幅に改善された乗用車を対象としたH-EPSの開発に成功した。

さらに本システムを小型トラッククラスへ搭載したいとの要望もあり、このためにはモータ出力のアップが必要となる。しかしバッテリー電圧12Vを電源としたシステムでは、消費電流が大きくなり、車両側でのバッテリー、オルタネータの出力負担、コネクタの熱的負担拡大、ハーネスによる電圧降下量増大、コントローラの熱的負担拡大等の設計的限界に迫りつつある。

そのため、バッテリー電圧を現在の12Vから42Vに上げて、モータの消費電流低下を狙った高電圧システムの開発が必要不可欠となってきている。

今後は高電圧対応の省エネルギー型H-EPS

システムを開発し、さらに多くの車種への搭載が可能となるよう努めていきたい。

筆 者



藤田和彦*
K. FUJITA

* ステアリング事業本部 ステアリング技術センター
ステアリング電装技術部