

## 電動パワーステアリングにおけるアシストバックアップ制御の開発

## Development of Assist Backup Control of the Electric Power Steering

裏 則岳 N. URA

Electric power steering (EPS) is a device which helps (assists) the driver's power which turns the steering wheel of the car. When EPS fails, the basic function which changes the direction of the car's movement is maintained. Furthermore, it is required that the function which assists the turning power of the steering wheel continues. In this report, I will introduce the control (Backup control) which assists steering wheel turning power even when EPS fails.

**Key Words:** electric power steering, EPS, failure, Backup control, assist

## 1. はじめに

パワーステアリングは自動車の進行方向を変える機能を有する装置で、運転者が少ない力で操舵できるようにステアリングホイール (SW) を回す力を補助 (アシスト) する動力が装備されている。その動力装置も省エネルギーの要求により、常時エンジン回転エネルギーを消費する油圧ポンプから、必要なときだけ電気エネルギーを消費する電動モータに切り替わってきている。運転者の SW を回転させる力 (操舵トルク) をトルクセンサで検出し、モータコントロールユニット (MCU) で電動モータの回転を制御し、SW を軽く快適にアシストするパワーステアリングを電動パワーステアリング (EPS : Electric Power Steering, 図 1) と呼ぶ。この EPS は多くの電子部品で構成されており、そのうちの 1 個の電子部品が故障しても EPS のアシストが停止し、SW は少ない力で操舵できなくなる。故障してもアシストを継続できれば、運転者は SW を少ない力で軽く操舵でき、運転を快適に継続できる。この故障時もアシストを継続する制御であるバックアップ制御の開発を紹介する。

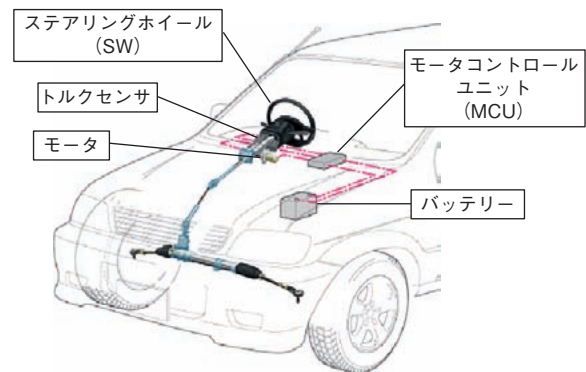


図 1 電動パワーステアリング (EPS)  
Electric power steering (EPS)

## 2. 信頼性の高いEPS

故障とは機能が喪失することであり、故障しても機能喪失の影響が小さい製品は信頼性が高いといえる (図 2)。そこで、EPS の故障の状態と故障の影響度の大きさを表 1 に示す。

EPS の故障では操舵不能等の故障の影響度が大きい状態を想定しているが、設計や製造上の対策により、現状ではアシスト停止が最も影響度が大きい故障である。その影響度が大きいアシスト停止より故障の影響度を小さくするためには、アシストを継続する必要がある。故障時もアシストを継続できれば、故障の影響度が小さくなり、EPS の信頼性を高めることができる。

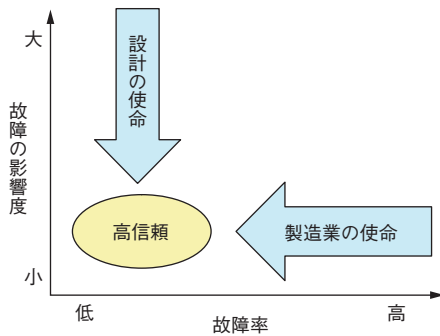


図2 信頼性の図

Figure showing high reliance

表1 EPSの故障の影響度  
Degree of influence of EPS failure

故障の影響度	故障の状態	詳細
大 ↑ ↓ 小	操舵不能	運転者が意図する方向へ自動車の進行方向を制御できない。
	操舵が難しい	運転者が意図する方向へ自動車の進行方向を制御するのに苦労する。
	アシスト停止	アシストが停止し、マニュアルステアリングになる。
	操舵力変動	アシスト量が減少、またはアシスト特性が変わる。
	サービス低下	自動パーキングやレーンキープアシスト制御ができない。
	品質低下	故障率が増加、またはラジオにノイズがのる。

### 3. バックアップ制御

電子部品の故障でアシスト停止になったEPSがアシストを継続してできるようにすると、運転者が故障前と同様に軽い力で操舵を継続できるので、故障の影響度を小さくすることができる。EPSの電氣的故障のほとんどは1個の電子部品が故障しているだけで、その他の電子部品は正常に動作している。その正常な電子部品だけでアシストを継続する制御がバックアップ制御である。当社のバックアップ制御は、多種多様の制御プログラムで実現されているが、本報では以下の3種類のバックアップ制御について詳しく紹介する。

#### 3.1 2相駆動バックアップ制御

3相ブラシレスモータを回転させる電気回路は、6個のスイッチ部品(MOS FET)によってU相とV相と

W相の3相インバータが構成され(図3)、モータ回転角(電気角)に対応して各相の電流を流す(図4)ことで3相ブラシレスモータを回転させる。このときの各相の電流は、以下の式で表される。

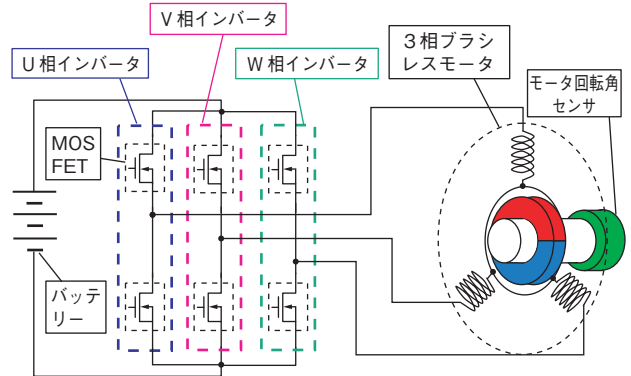


図3 ブラシレスモータの回路図  
Circuit diagram of brushless motor

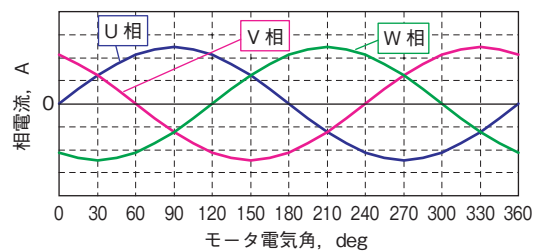


図4 モータ電気角と各相電流の関係  
Relation between the motor electric angle and each electric current phase

$$\begin{pmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{pmatrix} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \times I_q \times \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta + 120) \\ \sin(\theta - 120) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$I_u$ : U相電流 [A]

$I_v$ : V相電流 [A]

$I_w$ : W相電流 [A]

$I_q$ : アシスト電流 [A]

$\theta$ : モータ電気角 [deg]

3相インバータの1相が断線故障した場合は、1相の電流が流れなくなる。たとえば、U相が故障して電流が流れなくなった場合、以下の式で表す電流を各相に流すことでモータを回転させることができる。

$$I_u = 0 \quad (2)$$

$$I_v = \frac{I_q}{\sqrt{2} \times \cos \theta} \quad (3)$$

$$I_w = -\frac{I_q}{\sqrt{2} \times \cos \theta} \quad (4)$$

前記の式でモータ電流を流すことで、正常な2相インバータでモータを回転させることができるが、モータ電気角が90度と270度では $\cos\theta$ がゼロとなりV相電流もW相電流も無限大に電流を流す必要がある。すなわち、V相とW相の合成磁界の方向とモータの永久磁石の磁界方向が平行になるモータ電気角では、モータを回転させる力(トルク)が出ないという課題がある。その対策として、モータトルクが出ないモータ電気角(90度と270度)の直前で、モータ回転速度を上げて乗り越えている。このモータ回転方向に合わせて、モータ電流を多く流すモータ加速領域を持つモータ電流制御を図5に示す。この制御によって2相駆動バックアップ制御が完成した。

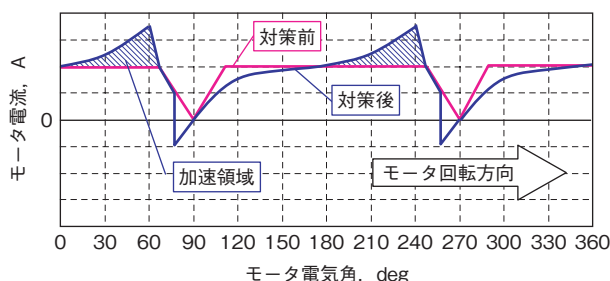


図5 対策前後のモータ電流  
Motor current before and after countermeasures

### 3.2 モータ回転角センサバックアップ制御

3相ブラシレスモータを回転させるには図4のようにモータ電気角に対応する電流を3相に流す必要がある。しかし、モータ回転角センサが故障すると、モータ電気角の情報が入りできなくなり、3相に流す電流量がわからなくなる。モータ回転角センサが故障してもモータを回転させるには、別の手段でモータ電気角を算出する必要がある。そこでモータが回転すると、U相とV相とW相に誘起電圧が発生する現象を利用する。すなわち、モータ電気角に対応する各相の誘起電圧から、以下の式で $\alpha - \beta$ の直交座標へ変換して、モータ電気角を演算する。

$$\begin{pmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_u \\ V_v \\ V_w \end{pmatrix} \quad (5)$$

- $e_\alpha$ :  $\alpha$  誘起電圧 [V]
- $e_\beta$ :  $\beta$  誘起電圧 [V]
- $V_u$ : U 相誘起電圧 [V]

- $V_v$ : V 相誘起電圧 [V]
- $V_w$ : W 相誘起電圧 [V]
- $\alpha - \beta$  軸での誘起電圧は以下の式で表される。

$$e_\alpha = -\omega \times K_e \times \sin\theta \quad (6)$$

$$e_\beta = \omega \times K_e \times \cos\theta \quad (7)$$

$\omega$ : モータ回転角速度 [deg/s]

$K_e$ : 誘起電圧定数

したがって、モータ電気角は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \left[ -\frac{e_\alpha}{e_\beta} \right] \quad (8)$$

しかし、式(6)と式(7)からも分かるようにモータ回転角速度が小さい時には誘起電圧も小さくなるため、モータ電気角を正確に演算できないという課題がある。そこで、モータ電流量を一定にしながらモータ電気角を意図的に変えて、モータトルクが最大になるモータ電気角が、正しいモータ電気角になる(図6)。このように、モータ電気角を求める時のモータトルクの変動が、EPSのアシスト量の変動となり、操舵トルクが変動する(図7)。具体的にはアシスト量が減少すると、運転者はアシスト量を補うため、より大きな力でSWを操舵する。そのため、操舵トルクが大きくなる。その反対にアシスト量が増加すると、操舵トルクは小さくなる。すなわち、アシスト量と操舵トルクは連動して変動する。

操舵トルクの変動量を大きくすると、モータ電気角は求めやすいが自動車の操舵は困難になる。反対に変動量を小さくすると、操舵はしやすいがモータ電気角の誤差が大きくなる。いろいろな走行条件や環境条件で調査した結果、操舵トルクで $\pm 3\text{N}\cdot\text{m}$ 程度のトルク変動量が最適であることが分かった。この調査結果から、操舵トルク変動量を $\pm 3\text{N}\cdot\text{m}$ 程度にすることで、モータ回転角センサバックアップ制御が成立した。

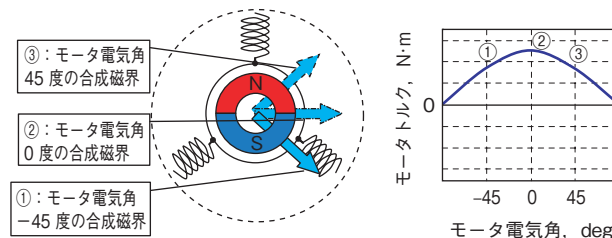


図6 モータ電気角とモータトルク  
Motor electric angle and motor torque

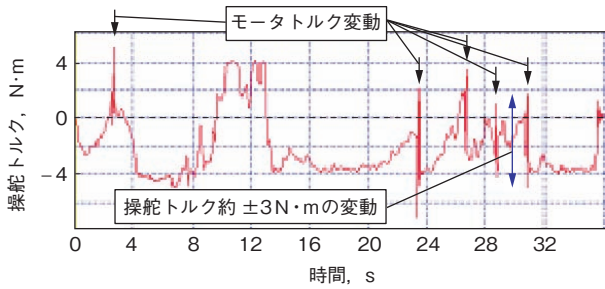


図7 モータ回転角センサバックアップ制御時の操舵トルク変動  
Fluctuations of steering torque at motor rotation angle sensor backup control

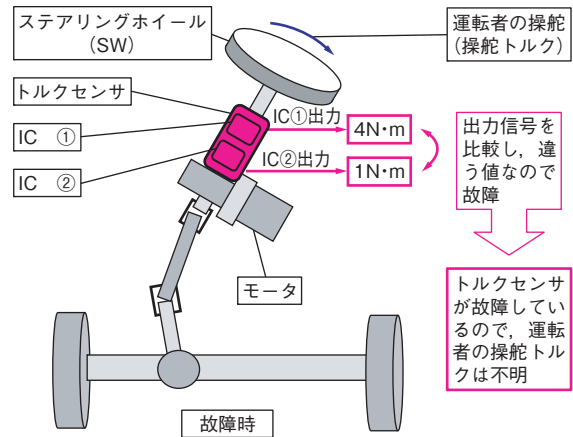


図9 トルクセンサの故障時  
Torque sensor failure

### 3.3 トルクセンサバックアップ制御

EPSのトルクセンサは、MCUがアシスト量を決定するのに必要な、運転者の操舵トルクを検出する重要なセンサである。そのため、当社のトルクセンサは電子部品であるICを2個一組とした冗長系で構成しており、この2個のIC出力信号を比較し、同じ値であることを確認して操舵トルクを決定している(図8)。

この2個のIC中の1個が故障した場合、正常な1個のICでEPSのアシスト継続を行う制御が、トルクセンサバックアップ制御である。しかし、その正常なICを特定することが課題である。トルクセンサが故障した場合、図9のように2個のICは異なる値を出力する。これだけの情報から、正常なICと故障したICを選別することはできない。

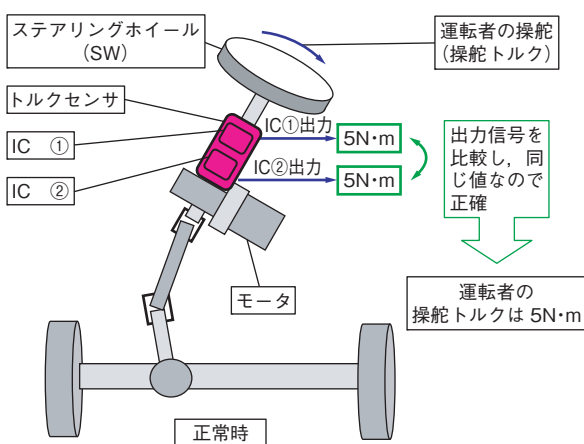


図8 トルクセンサの正常動作  
Normal performance of the torque sensor

しかし、その他の情報があれば、正常なICと故障したICを選別することができる。たとえば、運転者がSWから正確な操舵トルクを入力できれば、図10のように操舵トルクの入力とICの出力信号の比較から正常なICと故障のICが選別できる。

しかし、運転者がSWから正確な操舵トルクを入力することは困難である。そこで、トルクセンサを挟んでSWの反対にあるモータから操舵トルクを入力できないかと発想を転換した。図11のように、モータからの操舵トルクの入力とICの出力信号の比較から、正常なICと故障したICを選別できる。実際のモータからの操舵トルクの入力とICの出力信号を図12に示す。単純に操舵トルクの大きさだけでなく、モータ電流指令から操舵トルク出力の遅れ時間や操舵トルク方向も判断材料にして正常なICを選別している。これによって正常なICの操舵トルク信号を使用してアシストを継続する、トルクセンサバックアップ制御が完成した。

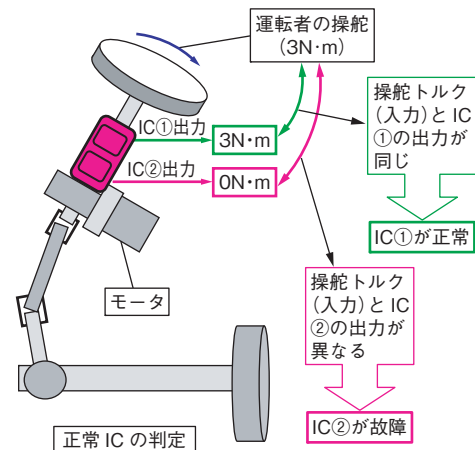


図10 ICの故障判定  
IC failure criteria

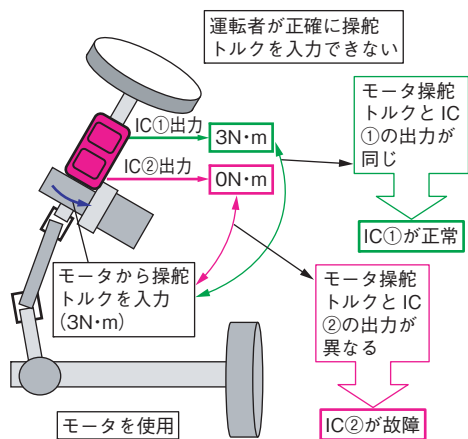


図11 実際のICの故障判定  
Actual IC failure criteria

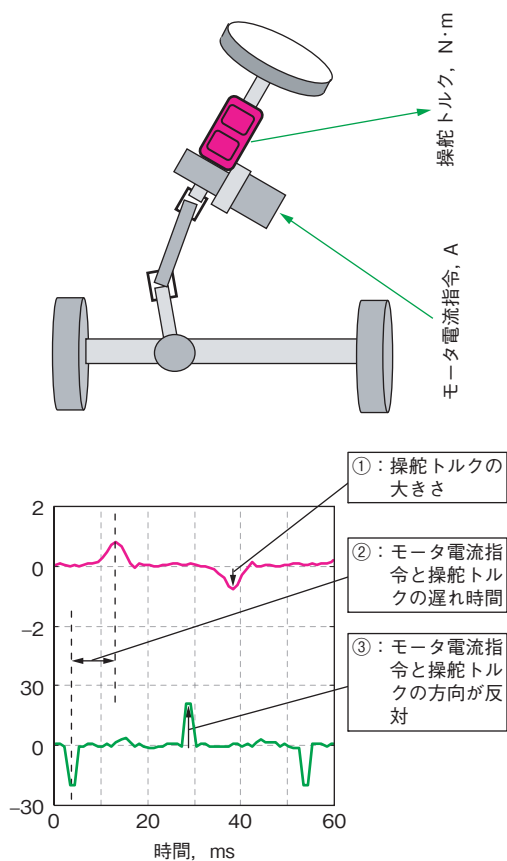


図12 モータ指令値電流と操舵トルク  
Motor command value current and steering torque

#### 4. 効果

今回紹介した3種類のバックアップ制御の効果を実際の自動車にて測定した結果を図13に示す。半径20mのカーブを速度20km/hで走行中に故障によりアシスト停止した場合は、操舵トルクは2.1N・mから13.6N・mに増加する。すなわち、アシスト停止により

SWに6倍以上の負荷が掛かり、軽く操舵できなくなる。しかし、どのバックアップ制御によるアシスト継続でも、故障前とほぼ同じ操舵トルクで操舵できることが分かる。これは故障後も運転者が故障前と同様に軽くSWを操舵できることを示している。

このように、開発したバックアップ制御だが、実際にはほとんど活躍していない。実際にEPSが故障してバックアップ制御が稼働することは非常に少ないからである。そのため、バックアップ制御の効果を部品の故障率や故障モードから机上で検討した。その検討書の一部を表2に示すが、故障時の39.8%でバックアップ制御が動きアシスト継続できることが分かった。

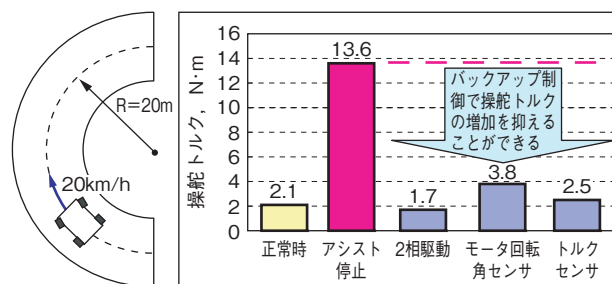


図13 バックアップ制御による操舵トルクの低減  
Reduction of the steering torque by Backup control

表2 電子部品の故障率と故障モードの机上検討  
Desk review of the failure rate and failure mode of the electronic components

部品名	故障率	故障モード	故障比	アシスト停止率	アシスト継続率
R10	2	断線	90%		1.8
		短絡	10%	0.2	
D15	5	断線	30%	1.5	
		短絡	10%	0.5	1.5
		ドリフト小 ドリフト大	30%	1.5	

#### 5. まとめ

省エネルギーの要求により自動車へのEPS搭載率が上昇し、生産数量も増加している。すなわち、故障率が同じであれば、EPSの故障数が増加してしまうため、EPSにはより高い信頼性が求められてきている。

EPSにバックアップ制御を組み込むことで、故障後も運転者が軽くSWを操舵できることが分かった。このようにアシストを継続することは、故障の影響度を小

さくするので、運転者の安心感を高め、EPSの信頼性を高めるのに有効である。

このバックアップ制御は故障の影響度を小さくし、信頼性を高める技術だが、すべての故障に対応するバックアップ制御は完成していない。これからも新しい種類のバックアップ制御を開発し、すべての故障に対応できるようにしたい。

## 参考文献

- 1) 野澤哲也, 新谷泰規, 玉泉晴天, 日比淑江, 板本英則 :  
JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1008(2010).

## 筆 者



裏 則岳\*

N. URA

\* 自動車部品事業本部 システム開発部