

次世代ステアリングシステムの開発動向

Development Trend of Advanced Steering Systems

森山正和 M. MORIYAMA

Demands for additional functions of safety and comfort in steering systems have been increasing in accordance with the progress in electronics technology. Development of the integrated vehicle control system has also proceeded in view of realizing intelligent vehicle dynamic control by steering technology, which cooperates with active braking and driving systems of vehicles. Herein, trends of the latest steering system technologies are introduced as well as Koyo's development strategies based on these movements.

Key Words: advanced steering system, electric power steering, ITS, steer by wire

1. はじめに

自動車用ステアリングシステムは、運転者のハンドル操作負担を軽減したいという要求から油圧式パワーステアリングが誕生した後、高速走行時の安定性や操舵感の向上など、より高い機能を実現させて発展、普及してきた。その後地球環境保全や省エネの観点から、光洋精工は世界に先駆けて電動パワーステアリングシステム(以下EPSと称す)を軽自動車用として実用化した。今後は小型車から中・大型車への採用も開始され、EPSのさらなる普及と発展が期待される。

ステアリングシステムとして、従来は車輪を「曲げる」ことに関する性能と機能向上の開発に集中してきたが、EPSの普及と電子制御技術の発展に伴って、車両の安全性や快適性を向上させるための支援技術も求められるようになってきた。また高度道路交通システム(以下ITSと称す)技術の進化に伴って、EPSシステム制御技術を核に、自動操舵システムを含む駆動系および制動系の制御システムとの協調による車両統合制御技術の開発へと発展していくと考えられる。

本稿では、現在の次世代ステアリングシステム開発の動向と当社の開発技術について報告する。

2. ステアリングシステムの技術開発動向

2.1 EPSの普及と今後の展望

EPSは1988年の軽自動車への搭載以降、環境保全や省エネおよび操舵感向上に対するさらなる要求に伴って小型・中型車へと採用車種が拡大してきた。光洋精工ではこれに対応するため、アシ

ストルクを発生するモータの搭載位置の違いによって、コラム部のC-EPS(Column EPS)システム、ステアリングギヤのピニオン部をアシストするP-EPS(Pinion EPS)システム、ラック軸をアシストするRD-EPS(Rack Direct Drive EPS)やRC-EPS(Rack-cross EPS)システム、油圧ポンプを電動モータで駆動するH-EPS(Electro-hydraulic power steering)などの商品を開発、供給している(図1)。今後、小・中型車への採用拡大に加え、モータの高容量化や高電圧化、バッテリーの42V化等の技術開発による大型車への展開も予想される¹⁾。

EPSの制御では、操舵角、操舵角速度、車両の速度・加速度、各車輪の速度・加速度、車両ヨーレート等の情報から、ステアリング操舵のアシスト力を自在に変化させることが可能となる。このため、単なる操舵力負担の軽減だけではなく、アシスト制御を走行状況に応じて最適化するなどの付加機能を与えることができる。また、EPSコントローラで運転者の操舵意図や操舵状況を的確に捉え、外乱と運転者の操舵との違いをローカルに検出することで車両側の挙動制御の応答性や精度の向上に利用することも可能となる。これらのことからEPSは、ステアリングシステム単独の機能だけではなく、車両の走行安定性および操縦安定性をさらに向上させるためのインテリジェントシステムとして、大いに発展が期待されている。2010年までの世界のステアリング市場動向予測を図2に示す。

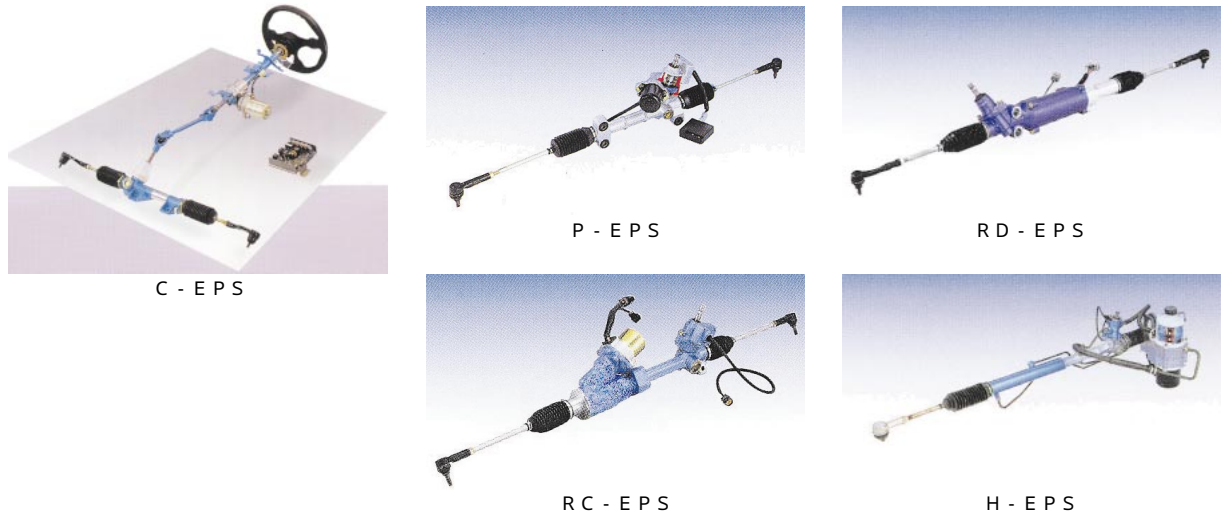


図1 E P S の分類
Classification of EPS

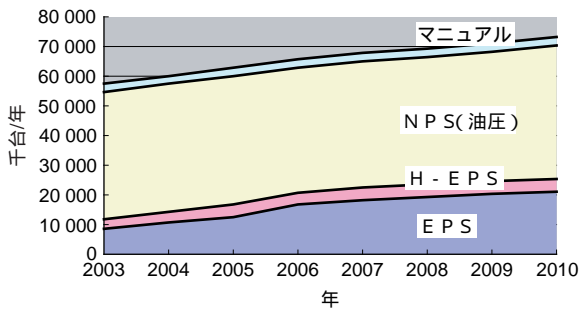


図2 世界のステアリング市場動向予測
(J. D. Power-LMC.のデータによる)
Global market trend predict of steering systems
(data source by J.D. Power-LMC)

2.2 E P S を支える要素・基盤技術の高性能化

一般的に E P S は省エネ性には優れるが、操舵感に関しては、油圧式と比べてモータと減速機に起因する摩擦感や慣性感が課題となっている。また、電装部品の信頼性や性能向上については、新たな開発技術として重要なポイントとなっている。ここでは、特に操舵感と信頼性に影響する主要な要素と基盤技術について以下に整理する。

(1)アクチュエータ

E P S ではブラシ付きモータが使用されてきたが、モータ回転時の騒音の大幅低減、信頼性向上、小型・高トルク化等の要求から、専用の小型・高トルクタイプのブラシレスモータを開発した。また、減速機の高効率化も実現することで、高トルク化と低慣性化を実現しシステムの制御性向上が期待できる。また、エンジンルーム搭載型のアクチュエータやコントローラでは、信頼性と熱設計についてもシステム性能や操舵感の良否を分ける重要な技術となっている。

(2)モータ制御

従来の E P S では、ブラシ付きモータのロータ部慣性、ブラシ・コミュテータ間の摩擦成分の影響を抑えるため、慣性補償、摩擦補償、ハンドル戻し制御等、さまざまな補償制御を重畳していた。本来的には、制御器の電気系伝達要素を素直に実現するためのハード改善技術や、電波障害対策技術、減速機構を含むメカ部の高効率化を図った上で、初めて位相補償と電流制御によるシンプルなアシスト制御を構成することができる。

(3)マニュアルギヤ

ラック軸に直接アシスト力を加える油圧パワーステアリングに比べ、一部の E P S ではピニオン軸にアシストトルクを負荷するものがあり、従来の設計基準を見直す必要がある。特にギヤ部の諸元を見直すことにより、滑らかな伝達特性を与えた上で、逆入力に対する効率を考慮しながら最適な伝達機構を構築しなければならない。

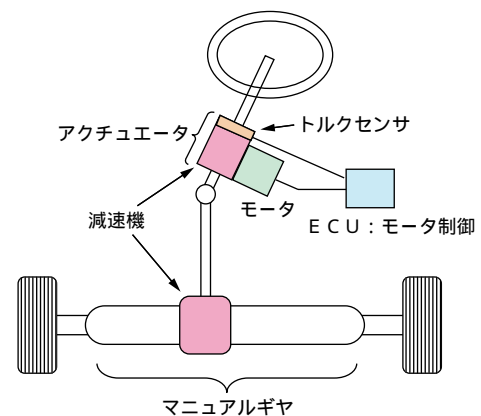


図3 C - E P S システム構成図
Structure of C-EPS system

2.3 ITS技術の発展

交通渋滞や事故、環境対策等、さまざまな問題を最先端の情報通信や制御の技術により解決し交通環境の適正化を実現するために、ITSに関する研究開発が国家レベルのプロジェクトとして進んできた。ITSの取り組みは、ナビゲーションシステムの高度化、自動料金収受システム、安全運転の支援、交通管理の最適化、道路管理の効率化、公共交通の運行支援、商用車による物流の効率化、歩行者等の安全確保に向けた支援、緊急車両の運行支援、の9つに分類される。

自動車の「走る」、「曲がる」、「止まる」といった基本機能を運転者の側から見てより安全なものとすることを支援する“安全運転支援の分野”においては、自動車メーカーおよびシステム制御メーカーが中心となって、図4に示す各種先進システムの開発が鋭意行われている。

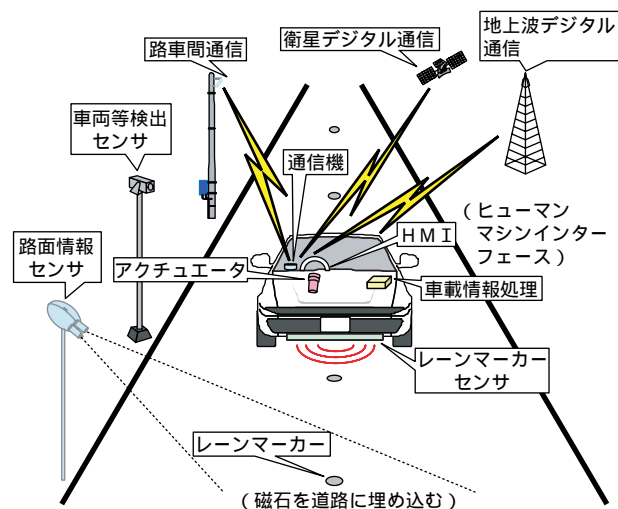


図4 ITSの技術の一例
Example of ITS technology

(1) 走行環境情報の提供

道路および車両に設置された各種センサにより、道路や周辺車両の状況等の環境を把握させ、車載機や道路情報提供装置等によるリアルタイムな情報提供や危険警告を行う。

(2) 危険警告・運転補助

車両に自動制御機能(レーダ、CCDカメラ等による目標認識および制御)を搭載することにより、自車および周辺車両の位置情報や各車両挙動、障害物の有無等を認知する。自車の走行に危険な場合には、自動的にブレーキ操作等の速度制御、ハンドル制御等を実施して運転補助や安全操作の支援を行う。

(3) 自動運転

運転補助機能(ステアリング、アクセル、ブレーキ等)の制御を発展させ、周辺の走行環境(障害物検知等)を把握して、自動的にブレーキ、アクセル操作等の制御やステアリング制御等を行うことによって自動運転を実現する。これは、インフラ協調と自律運転の双方で開発が進められている。

2.4 次期ステアリングシステムの実用化アイテム

ITS関連の研究開発の進展に伴い、ステアリングシステム分野においても運転者の負担軽減や安全運転支援を目的としたさまざまなシステムが実用化されてきている。下記にその具体例を紹介する。

- (1)ステアリング操舵角、車速等の情報と車両周辺の障害物等の情報を用いて運転者のステアリング操作を支援し、車庫入れ縦列駐車を容易にし、負担を軽減するシステム。
- (2)またぎ路面上(片側車輪：氷上、反対側車輪：アスファルト上等)での急制動時に発生する車両のスピンを、ABSシステムやスタビリティコントロールシステムと連携しEPSの操舵アシストトルクを制御することで、車両姿勢を状況に応じて安全な方向へ修正する操舵アシストを行うシステム。
- (3)道路上に描かれた車線区分を表示する白線をCCDカメラ等でモニタし、車線を逸脱しないようにEPSでステアリングの修正操舵を運転者に促すシステム。
- (4)車速と舵角に応じてステアリングの減速ギヤ比を制御し、高速ではゆったりと、低速では機敏なステアリング操作を支援するシステム。
- (5)上記(4)のステアリングの減速ギヤ比を変化させる機能に加えて、スタビリティコントロールシステムと協調制御することで、アンダーステアやオーバーステアの最適化をタイヤ切れ角のアクティブ制御で実現し、安定したコーナリング性能を発揮するシステム。

2.5 将来のステアリングシステムにおける技術展望

(1) ステアバイワイヤシステム

2.4項に記した次期ステアリングシステムの開発技術動向から明らかなように、車の安全性のさらなる向上をめざしてステアリングシステムは、単独機能から、車両統合制御の一要素として新たな機能を分担するシステムへと進化している。この次期ステアリングシステムをさらに発展させ、

ステアリングギヤとステアリングコラムを機械的に切り離し、電気信号による情報送受によりステアリングシステムを構成し自在な制御を行おうとするのが“ステアバイワイヤシステム”である。ステアリングは、アクセルやブレーキに比べて車両挙動を最も敏感に伝えることができるため、運転者の操作性に与える影響が大きい。特にステアバイワイヤシステムは、システム故障時の信頼性の確立が必要不可欠となるため、実用化に際しては信頼性の確立が最重要な開発課題となっている。実用化に向けての法整備や専用通信プロトコル(FlexRay等)の開発も進んでおり、近い将来の量産化が予想される。

(2)新転舵機構

ラック軸の存在を前提としたステアリングシステムとはまったく異なり、タイヤのキャンバ角やサスペンションのリンク機構を制御することで操舵を実現するシステムも提案されている。また、ホイールインモータを利用して、タイヤ回転を独立制御することで車両の進行方向を制御するシステムも検討されている。

3. ステアリングシステム開発用シミュレータ

シミュレーションソフトやツールの発達により、コンピュータを使用した挙動解析の高速化、高精度化による製品開発効率の向上は目覚ましいものがある。ステアリングシステムの設計検証や挙動予測、フェールセーフを含む制御ロジックの検証用として、コンピュータシミュレーション評価は必要不可欠なものとなっている。下記に現在使用しているシミュレータの種類と用途について紹介する。

(1)モデリングシミュレーション

(MATLAB/Simulink, dSPACE)

- ・ステアリングシステム、車両のモデル化と、各種条件下での挙動推定

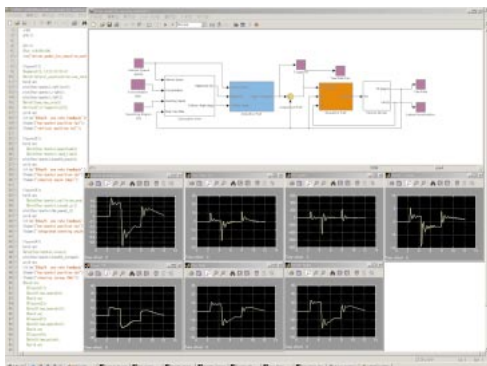


図5 MATLAB/Simulinkによるシミュレーション
Simulation by MATLAB/Simulink

(2)H I L (Hardware In the Loop)シミュレータ

- ・ステアリングシミュレータ(SS): ステアリング、コラム、インタミ、ギヤ、フロントサスペンション、タイヤ等、実機を使用したものと、車両、ECU等ソフトウェアによる機能のモデル化したものとを組み合わせるシミュレータを構成

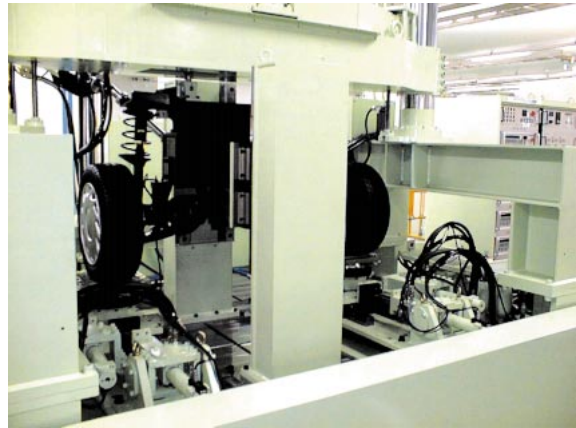


図6 ステアリングシミュレータ
Steering simulator

(3)車両挙動シミュレータ

- ・ドライビングシミュレータ(DS): 6軸制御の油圧シリンダを用い、ステアリング操舵時の車両の挙動を3次元でシミュレーション

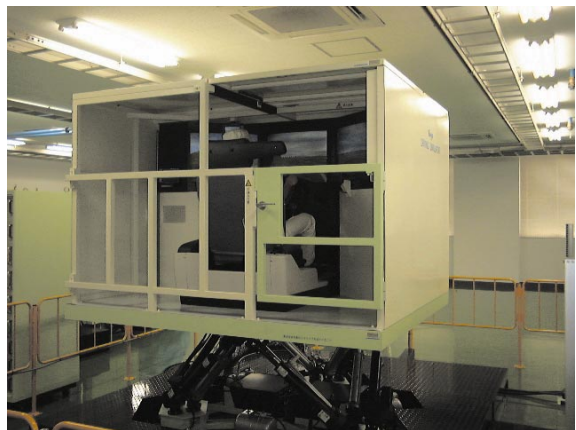


図7 ドライビングシミュレータ
Driving simulator

それぞれのシミュレータは、導入の難易性や再現精度、ランニングコスト、互換性といった装置側パラメータと、製品の操舵感、挙動、性能といった評価項目パラメータを考慮に入れて、取捨選択とデータの活用方法および領域を決定している。

4. ステアリングシステム向けの 制御技術開発

(1) A S Vのためのステアリングトルク制御 (A S V : Advanced Safety Vehicle)²⁾

運転者の操舵意図を最も早く検知できる操舵トルクの変化を検出し、隣接車が存在するにも関わらずその方向への操舵が検知された場合、E P Sを用いて自動的に反力トルクを与えることで操舵抑制制御を働かせる。操舵トルクおよび操舵トルク変化加速度に着目することで、緊急回避やカーブ進入時などの運転者の意図的な操舵を判別できる方法を考案し、緊急回避操舵時は運転者の操舵意図を尊重して制御を解除する。抑制制御時の運転者側の反応、予防安全効果への影響が実用化への課題となっている。

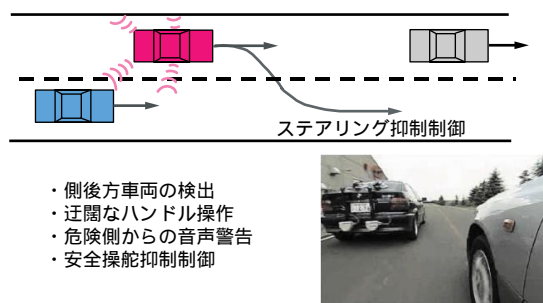


図8 A S Vのためのステアリングトルク制御
Steering torque control for ASV

(2)自動操舵システムにおける外乱補償制御³⁾

自動操舵システムにおいて、操舵系ローカルシステムでの外乱補償制御技術を開発した。モータによって油圧式パワーステアリングシステムのバルブを制御することにより自動操舵を行う目的で、モータの上下に取り付けた2つの回転センサの出力差を検出する。それらの出力データとシステムモデルの演算判定ロジックによって、外乱トルクか運転者の入力トルクかを判別する。外乱トルクと判別された場合は、これを打ち消すトルクをモータで発生させ車両挙動を安定化し、手動操舵によるものと判別されれば、運転者の意図を尊重して自動操舵を解除する。



・油圧P Sギヤー体型電動アクチュエータ
・ステアリング単体での外乱補償制御

図9 自動操舵システムにおける外乱補償制御
Disturbance compensation control in automatic steering control system

(3)操舵パターンルールベース制御⁴⁾

定常円旋回、スラローム走行、その他の典型的な自動車の走行パターンを操舵トルクの変化等より判別し、E P Sのアシスト制御内容をそれぞれの走行パターンで変えて操舵負担の軽減を行う。定常円旋回走行時には、操舵トルクの増減に応じてアシスト力の増減を行うことで修正操舵負担を軽減する。操舵負担の評価に筋電位計測を採用することで制御効果を定量的に測定している。またスラローム走行では、操舵感を悪化させることなく操舵トルクの最大値を低減できることを、一般的な操舵感定量化手法に基づいて評価検証している。

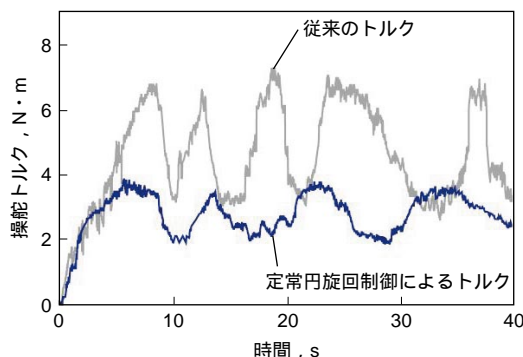


図10 操舵パターンルールベース制御
(定常円旋回制御による操舵負担の軽減)
Driving pattern rule-based control
(reducing steering load by circle-driving control)

(4)車両姿勢制御用ステアバイワイヤ - D^* 制御

ステアバイワイヤシステム^{5), 6)}を用い、運転者が車両のヨーレートと横加速度の線形結合値である D^* を目標運動量として操作入力端(ステアリングホイール)に入力し、コントローラがこの D^* 値に追従するように転舵用アクチュエータの制御を行う。これにより、運転者は車両挙動を直接制御することができるため、従来の運転時に行っていた前輪転舵角進み補償の負担を軽減させることができ、雪道などの走破を初心者でも簡単にできるようになる。またこの制御による横風外乱発生時

の自動操舵補償効果や低 μ 路における車両挙動安定化効果についても、同様の飛躍的效果を実車にて評価検証している。



図11 車両姿勢制御用SBW-D*制御による
寒冷地試験

Winter test by using SBW-D* control for
vehicle dynamics control system

- 4) 中野史郎, 嘉田友保, 西原 修, 熊本博光: 自動車技術会論文集, vol. 31, no. 2 (2000) 57.
- 5) 中野史郎, 高松孝修, 西原 修, 熊本博光: 自動車技術会論文集, vol. 31, no. 2 (2000) 53.
- 6) 中野史郎, 西崎勝利, 西原 修, 熊本博光: 自動車技術会論文集, vol. 33, no. 3 (2002) 121.

5. おわりに

自動車用機能部品のワイヤ技術に関する研究開発は近年急速に注目を浴びており、アクセルやブレーキ制御などで一部量産化されているものもある。ステアリングシステムの高機能化・高性能化、車両統合制御システムへの発展性についても、ワイヤ技術がキーポイントといえる。しかし、運転者にとっては最も敏感な「手」を相手にしたステアリングホイールという操舵系インターフェースを、車両挙動のアクティブ制御とバイラテラルな関係で制御する技術は非常に広く深い開発領域である。同時に、コストや信頼性といった別の技術領域も完成していかなければならない。バッテリーの42V化の動向と、それに伴って予想される中・大型車へのEPSの拡大展開を軸に、ワイヤ技術を取り入れたステアリングシステムや車両統合制御システムの発展が期待されるが、EPSシステムの基礎技術の進化がその基本になることは間違いないと思われる。

参考文献

- 1) 井尻和一郎, 筒井高志: Koyo Engineering Journal no. 162 (2002) 28.
- 2) 中野史郎, 瀬川雅也, 西崎勝利: 自動車技術会論文集, vol. 31, no. 1 (2000) 57.
- 3) 中野史郎, 西崎勝利, 西原 修, 熊本博光: 日本機械学会論文集(C編), 65巻, 639号(1999).

筆 者



森山正和*
M. MORIYAMA

* 取締役 総合技術研究所