

自動運転へ向けたステアリングシステム技術の展望

Outlook for Steering System Technology Aimed at Self-Driving

阪田勝利 K. SAKATA

As represented by MaaS, the environment surrounding automobiles is entering a dramatic period of change. Even in regards to steering system technology, there is an advancement in the anticipated role from the conventional simple power aid to a traveling aid supporting self-driving. This paper introduces the travelling aid-related technologies JTEKT is promoting, as well as the outlook of steering system technology aimed at self-driving.

Key Words: EPS, CASE, functional safety, SBW, HMI, integration control

1. はじめに

1960年代後半、日本で乗用車が普及する中、重いステアリング操舵を改善するため、油圧パワーステアリング（HPS：Hydraulic Power Steering）が実用化され始め、軽く快適なステアリング操舵が普及した。その後、モータリゼーションが進み、セカンドカーのニーズや女性運転者が増加する中、HPSの搭載が困難であった軽自動車にもパワーステアリングが求められるようになった。当社は1988年にコラムタイプ電動パワーステアリング（C-EPS：Column type Electric Power Steering）にて電動パワーステアリング（EPS：Electric Power Steering）の量産化を世界に先駆けて実現した。HPSの搭載が困難な軽自動車へのパワーステアリング搭載から始まったEPSは、自動車の低燃費化などの環境保全という付加価値に対する市場ニーズとも合致し、軽自動車以外の自動車への適用が進み、当社も、今日までEPSの普及に大きく貢献してきた。

EPS搭載車両の拡大に併せて、中・大型乗用車に対応したラックアシストタイプのEPSとして、デュアルピニオンタイプ電動パワーステアリング（DP-EPS：Dual Pinion type Electric Power Steering）、ラックパラレルタイプ電動パワーステアリング（RP-EPS：Rack Parallel type Electric Power Steering）、さらにはバスやユーティリティビークルといった乗用車以外にも適用領域を広げ、ステアリングメーカーとしてさまざまなニーズに対応した製品を開発、提案し続けている。

2. 自動車を取り巻く技術

近年、自動車を取り巻く環境は劇的な変革期を迎えている。MaaS（Mobility as a Service）に代表されるように自動車産業の新たな価値創造として、安全、安心、利便性の高いモビリティ社会実現への貢献が求められており、それを具現化する技術としてCASE（Connected/Autonomous/Shared/Electric）が注目されている。その一つ自動運転の社会では、自動車を自動運転させる技術とその自動運転技術を基にさまざまなサービスを提供するという自動運転を活用する技術の二つに大きくわかれる。前者の自動運転技術は“認知・判断（特性）・操作”の3分野でさまざまな技術的取り組みが行われており、後者にはモビリティサービスプロバイダと呼ばれる異業種を含むさまざまな会社が参入している（図1）。

また、自動運転は社会のニーズと技術の進化に併せ段階的に進むものと考えられており、表1に自動運転レベルの考え方について示す。現在普及が進んでいる、運転支援と言われる自動運転レベル2から、完全自動運転の自動運転レベル5まで表1のように定義され、各レベルで求められる自動運転技術や安全性も異なる。要求される自動運転レベルに応じてステアリングシステムの役割も従来のステアリング操舵をパワーアシスト（操舵力の低減、操舵感の向上）することから、自動運転を支えるドライビングアシストへと変わりつつある。

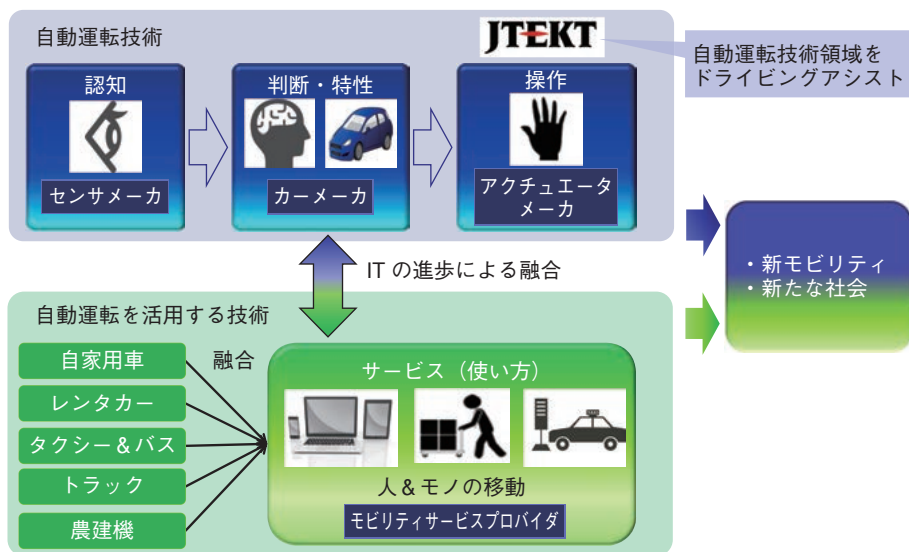


図1 自動運転社会の構図
Rough sketch of a self-driving society

表1 自動運転レベル
Self-driving level

自動運転レベル	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5
		運転者主導		システム主導
	部分自動化	条件付自動化	高度自動化	全自動化
自動運転レベル実現方法	ソフトウェアバックアップ	ハードウェア冗長	電源を含む完全ハードウェア冗長	
安全コンセプト*	JFOPS2	JFOPS3	JFOPS4	

*当社の安全コンセプト：JFOPS（JTEKT Fail Operational System）
注）表1はSAEJ3016を基に、当社で作成

“操作”をつかさどるステアリングシステムメーカーとして、当社は、ドライビングアシストに関するさまざまな技術取り組みを行っている。本報ではその取り組みの中からすべての自動運転レベルの基盤となる機能安全、主に自動運転レベル3から必要となるステアバイワイヤ（SBW：Steer By Wire）、ヒューマン・マシン・インターフェース（HMI：Human Machine Interface）関連技術、ステアリングシステムからその領域を拡張した車両運動統合制御、およびMaaSへの対応を見据えた大型車用ADAS（Advanced Driver Assistance System）対応ステアリングシステム、大型シティバス向け正着機能について述べる。

3. 機能安全要求と安全コンセプト

3.1 EPSの機能安全

EPSは自動車の“曲がる”を担う重要保安機能部品であることから、システムの電動化に併せて、その安全性の考え方は国際規格である自動車用機能安全規格ISO26262の要求に従った対応が必要となっている。現在までEPSにおける最も重大な故障モードであるASIL（Automotive Safety Integrity Level）-Dは次の二つで定義されており、これについては各自動車メーカーによる考え方の差は見られない。

< ASIL-Dと定義されているEPSの故障モード>

- 1) ステアリングの自転：運転者の操舵無しにステアリングホイールが回る。
- 2) ステアリングロック：ロックによりステアリングホイールが回せない。

当社では 2005 年から EPS の機能安全対応を進めてきており、上記二つの故障モードが発生しない設計・生産品質の確保に努めている。主な手法としては、開発や製造段階での機能安全要求に準拠した品質の作り込みや、故障率の低い電子部品の選定により故障発生率を安全要求に合致させること、デュアルコアマイコン採用による演算監視強化、故障検出時のフェールセーフによるシステム機能の制限、もしくは停止であり、これらにより ASIL-D で定義されている二つの故障モードに陥らないようにしてきた。

3.2 機能安全要求の変化

乗用車における EPS の適用範囲は軽自動車から大型乗用車まで急激に拡大している。大型乗用車においては高出力仕様の EPS が搭載されるが、高出力化に伴い、システムが故障停止した場合、運転者はステアリングホイールを操舵するために、より大きな操舵力を強いられる。また、昨今、完全自動運転に向けた動きが加速している中、高度な自動運転機能の場合、運転者がステアリングホイール操舵をしない状況が想定されており、こういった状況下では故障により EPS が停止してしまうこ

とは避けなければならない。

このように近年、システム故障時の安全性への要求レベルが上がっており、システム故障時に安全に機能を停止させるフェールセーフシステムから、故障時でも最低限システムを機能させるフェールオペレーショナルシステムへの進化が必要不可欠となっている。そこで現在当社では JFOPS (JTEKT Fail Operational System) として定義した安全コンセプトを提案している (表 2)。

JFOPS1 のソフトウェアバックアップによる一部の冗長性確保に始まり、JFOPS4 ではソフトウェアのバックアップに加え、電源も含めたハードウェアの 2 系統化まで段階的に冗長領域を広げ、より安全性を担保した開発を進めている。

JFOPS3, JFOPS4 はハードウェア冗長設計であり搭載する電子部品が増加するため (図 2)、通常モータコントロールユニット (MCU : Motor control Unit) のサイズが大きくなり EPS システムの車両搭載性が悪化するが、当社では MCU の電子部品搭載エリアの設計をできるだけコンパクトにし、従来と同等サイズのワンパッケージ形状とした。

表 2 JFOPS 定義
JFOPS definition

	設計コンセプト	対応自動運転レベル				
		1	2	3	4	5
JFOPS4	ハードウェアによる完全冗長設計			●	●	●
JFOPS3	ハードウェアによる冗長設計 (電源, マイコンを除く)		●	●		
JFOPS2	JFOPS1 からバックアップ領域を拡大	●	●			
JFOPS1	ソフトウェアによる故障へのバックアップ (センサ, ドライバ)	●	●			

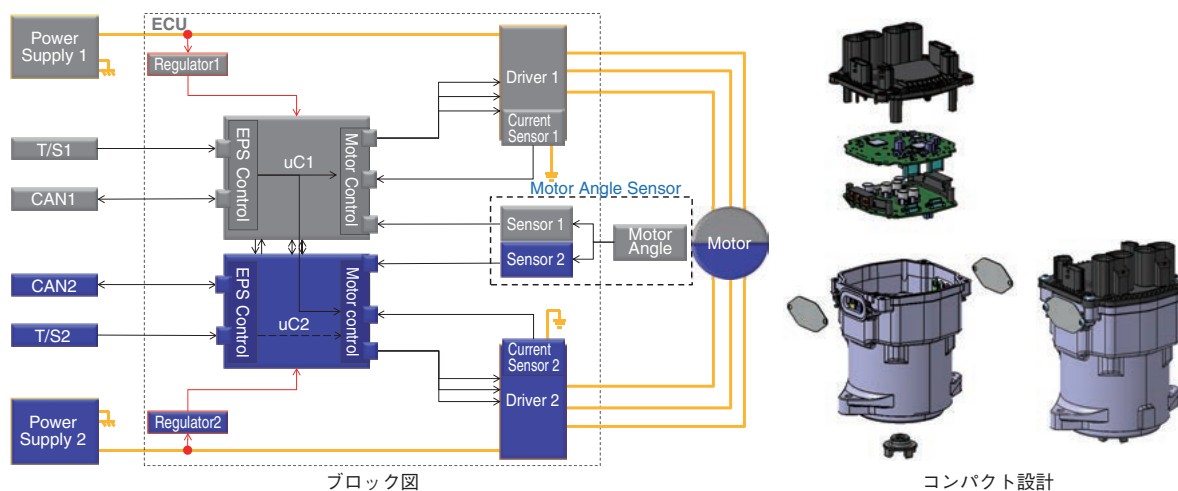


図 2 JFOPS4 MCU
JFOPS4 MCU

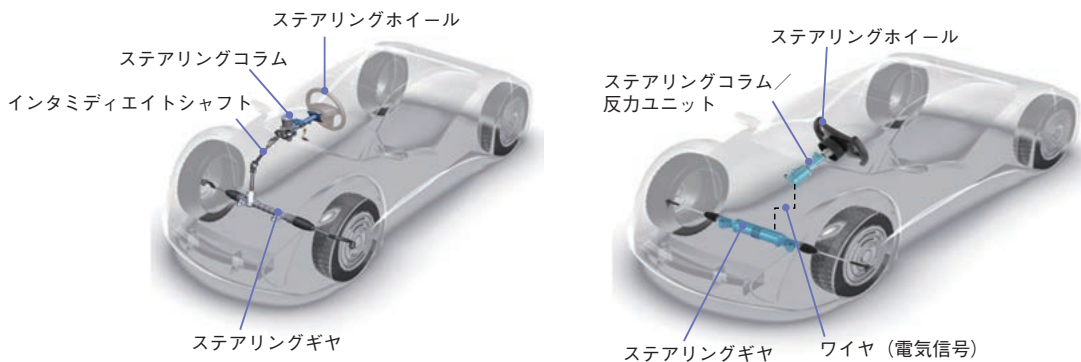


図3 従来のステアリングシステム (左) と SBW システム (右)
Conventional steering system (left) and SBW system (right)

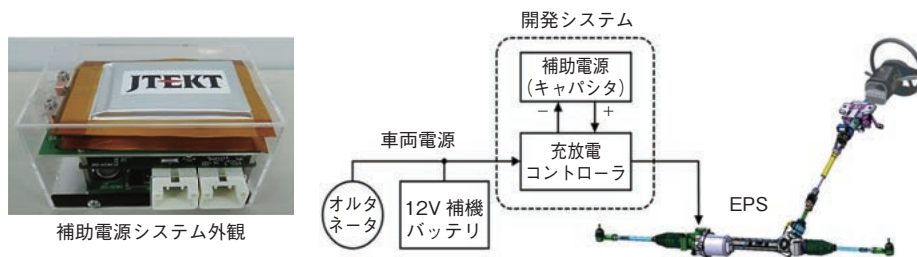


図4 EPS 用補助電源システム
Backup system for EPS electric power

4. SBW システム

従来の EPS は図3左に示すように、ステアリングホイールにつながるステアリングコラムとタイヤを転舵するステアリングギヤの間をインタミディエイトシャフトで機械的につないでいた。今後の自動運転の進化を考えると、自動運転下での運転者の操舵介入判定の容易さや運転者の誤操作（危険操作）の遮断が可能なシステムとして、インタミディエイトシャフトのような機械的リンクをなくす技術が求められる。

図3右に示すように、SBW システムはその機械的なリンクをなくし、ステアリングホイール操舵時の操舵反力を生成するステアリングコラムと一体の反力ユニットとステアリングギヤの両者を電気信号でつなぐワイヤで構成される。ステアリングホイール側とタイヤ側が機械的につながっていないため、操舵感の自在な調整や、異形ステアリングホイール、自動運転時のステアリングホイール格納など、従来のステアリングシステムでは実現できなかったさまざまな機能を提案できるようになる。

一方、機械的なリンクがなくなることで、高次元での信頼性確保が必要となる。また、路面状況の変化などによるタイヤ/ステアリングギヤからの逆入力情報を反力ユニットによりいかに自然に運転者に伝えるかに高度な

技術を要する。

当社は舵角制御やトルク制御に加え、ユニット間を高速通信で結ぶことにより、これらの課題に対応し、新たな価値を創造する SBW システムの開発を他社に先駆けて進めている。

また、SBW システムの安全性をさらに高めるため電源システムの監視・補助を目的にリチウムイオンキャパシタを用いた補助電源システムも開発している。当社のリチウムイオンキャパシタは広い温度範囲で安定した性能を発揮し、冷却システム無しでエンジンルーム内に配置可能で、ステアリングシステムの安全性の向上に大きく寄与するシステムとなっている（図4）。

5. HMI による権限移譲技術の取り組み

自動運転技術の高度化に伴い、各機能システムは統合制御化されていくと共に、安全性、快適性という観点で人と自動車（機械）のつながりが重要な要素となる。特にステアリングシステムは自動車の操作系において人と敏感に接している製品であり、HMI におけるステアリング機能の役割は大きい。表3に示されるように、ステアリング操舵をパワーアシストするだけでなく、自動運転レベルが上がるに従い、ステアリング操舵の手放し

表3 HMI ステアリング機能
HMI steering function

アシスト状態	必要機能	自動運転レベル					
		0	1	2	3	4	5
ステアリング操舵（パワーアシスト）	操舵感	●	●	●	●	●	
ステアリング操舵とシステムの容易な切替	操舵権限移譲		●	●	●	●	
ステアリング操舵の手放し	ハンズオフ検知			●	●		
ステアリング操舵の状態	ハンズオン/オフ検知				●	●	
手動-自動操舵の共有（シームレス）	シェアードコントロール				●	●	

検知、運転支援もしくは部分的に自動化されたシステムとのスムーズな操舵権限移譲など、ドライビングアシストとしての機能が求められる。

ステアリング操舵の主体を手動もしくは自動とする切り替わりの判断は、たとえばLKA（Lane keeping Assist）ではステアリングホイールの操舵トルクにあるしきい値トルク以上の入力が発生すると手動に切り替わるなど、現在は何かしらの判断基準に基づく切り替えが行われている。しかしこのような手法では、都度自動運転機能が解除され、使いやすさ、快適性という側面では一考の余地がある。また安全、安心という側面においても、自動と手動がスムーズに切り替わること（権限移譲）、さらには自動と手動の共有（シェアードコントロール）を行い、運転者が切り替わりを意識せずに自在に安全な操舵ができるシームレスな機能など、ステアリングにも自動化レベルに応じた新たな機能の開発が必要となる。当社での開発の一事例を図5に示す。

6. 車両運動統合制御の取り組み

自動運転レベル3以上を推進していく上で、車両の動きに関し、いわゆる車両運動性能だけでなく、移動の質（運転のしやすさ、乗客の心地よさ）がより着目されるようになってきた。その実現には、ステアリングシステム単独での制御ではなく、他の機能と連携した、いわゆる車両運動統合制御（図6）が重要となる。

車両の横方向の動きを制御するステアリングシステムには、前後方向の動きを制御する駆動や制動などの機能とも協調して車両運動性能、移動の質向上に向けた開発を行うと共に、安全面でも各機能における機能失陥時の相互補完を配慮した取り組みも必要となる。

当社では、自動運転制御との高度な融合を目指した車両運動制御の実現のために、株式会社デンソー、アイシン精機株式会社、株式会社アドヴィックスと共に新会社、

株式会社 J-QuAD DYNAMICS を 2019 年 4 月に設立した。4 社の技術知見を集約し、車両運動統合制御に必要なソフトウェア開発の効率化、スピードアップを図っている。また、自動車メーカーが機能システムごとに、技術仕様出しと機能間調整を行わなくても済むように、ワンストップサービスの提供を目指している。

7.トラック、バスの自動運転対応技術

7.1 中・大型車用 ADAS 対応ステアリングシステム

トラックやバスなどの中・大型車は操舵時に必要な出力が大きいため、従来より EPS 採用が困難であり、HPS を用いている。自動運転の場合、HPS 単体で対応することは困難であり、当社では HPS を電動アクチュエータを用いてコントロールする大型車用 ADAS 対応ステアリングシステム（同軸システム）を開発している。これはステアリングコラムと同軸に操舵アクチュエータを配置したシステムである（図7）。

自動運転の操舵指令を同軸システムに与え、その指令に基づき同軸システムが HPS に角度入力を与え、タイヤを転舵するシステムである。このシステムにより大型トラックや観光バス、シティバスなどの大型車両の自動運転を可能としている。なお、この機能は、当社既存の C-EPS と HPS の技術で対応可能であるが、バスやトラックはステアリングコラムやインタミディエイトシャフトが運転者の両膝の間に配置されるため、衝突時の運転者の膝回りの安全性、足さばきスペースを考慮し、操舵アクチュエータをステアリングコラム同軸に配置した。

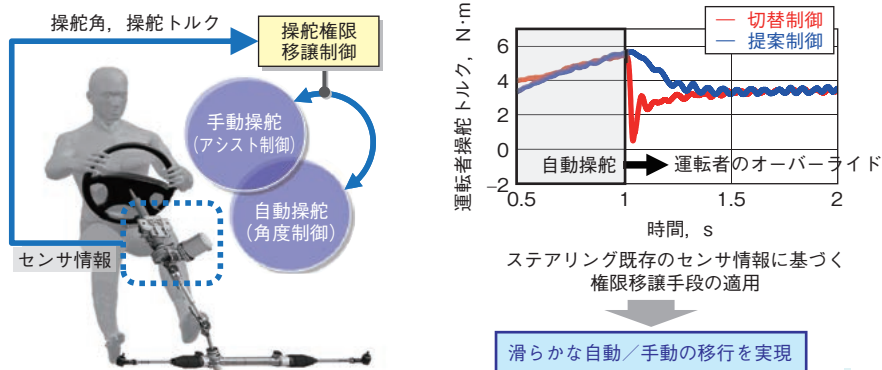


図5 権限移譲技術
Steering control transfer technology

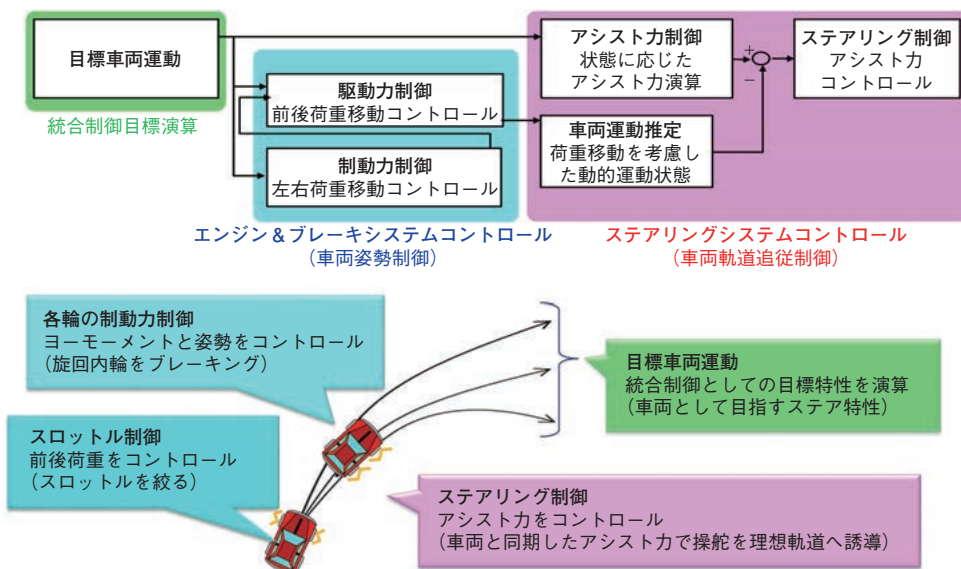


図6 車両運動統合制御システム
Integrated system for vehicle dynamics

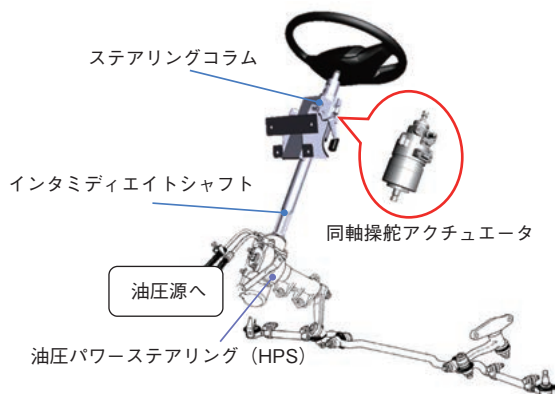


図7 中・大型車用 ADAS 対応ステアリングシステム (イメージ)
Steering system of mid/large-sized vehicles for ADAS (Image)

7.2 大型シティバス向け正着機能

大型車の中でもシティバスは生活に密着している交通システムで、移動の利便性向上を目的としたバス高速輸送システム (BRT : Bus Rapid Transit), 次世代都市交通システム (ART : Advanced Rapid Transit) の検討が進んでおり、当社は内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム (SIP : Strategic Innovation Promotion Program) の ART 開発に加わり、正着機能の開発を行っている。正着制御技術とはバスの乗降口と停留所とのすきまを小さくかつ正確に停車させ、バリアフリー化によるスムーズな乗降、定時運行などに貢献する技術として開発を進めているものである。SIP でもバスと停留所とのすきまをより小さくすることが求められており、± 20mm という高い精度を目標としている

(図 8). 当社はカメラやLiDAR (Light Detection And Ranging), GNSS (Global Navigation Satellite System) などの技術を用いた高精度正着技術を開発しており, SIP の下で沖縄での実証実験などに参加し, 機能の実現性の確認を行うとともに実用化に向けた課題の洗い出しを行っている。



図 8 沖縄での実証実験の様子 (2019 年 2 月)
Demonstration experiment in Okinawa (Feb. 2019)

8. おわりに

自動車を取り巻く環境は, 激流のごとく変化しており, その変化に対応できない企業は, 瞬く間に退場を迫られる。本報で述べてきたように, ステアリングシステムにおいては, 世界トップシェアのモノづくりの基盤を生かし, 従来のシンプルなパワーアシストから, 自動運転を支えるドライビングアシストへ, その技術革新を進め, 社会の発展に貢献することが, 当社の使命である。また, そのためにはすべてを自前で行うのではなく, 融通自在な産官学連携, 企業間協業も今後さらに必要となるであろう。

目指す世界は, すべての人々にとって, 安全, 安心, 便利で環境にも優しいスマートモビリティ社会である。この素晴らしい目標に向かい, 技術を磨き, 当社が社会に必要な不可欠な会社であり続けられるよう, 努力したい。

* H-EPS, C-EPS, P-EPS, RD-EPS, DP-EPS, RP-EPS, JFOPS は, 株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 株式会社ジェイテクト: ジェイテクト 10 年史(2016).
- 2) 内閣府: 平成 29 年度「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化^{*}」報告書(2017)http://www.sip-adus.go.jp/file/151_s.pdf.
- 3) 内閣府: 平成 30 年度「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化^{*}」報告書(2018)<http://www.sip-adus.go.jp/rd/>.
- 4) 松岡浩史: ステアリングシステムの発展と今後の展望, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013 (2015) 10.
- 5) 佐藤文彦, 東 真康, 杉山豊樹: 電動パワーステアリング用補助電源の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013(2015)41.
- 6) SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update, <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>.
- 7) 松岡浩史: ステアリング事業の歴史と自動運転化への取り組み, 日経ビジネス/日経 Automotive セミナー 自動車未来サミット spring - 部品メーカーが考える自動運転の将来と 2017 年の展望 - 講演資料(2017).

※「次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」は, SIP「自動走行システム」の管理法人である国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けた事業

筆者



阪田勝利^{*}
K. SAKATA

^{*} 執行役員