

# リンクレス ステアバイワイヤ システム J-EPICS の開発<sup>\*1</sup>

## Development of Steer-by-Wire System (J-EPICS) with No Mechanical Link

西村 興 K. NISHIMURA 並河 勲 I. NAMIKAWA 安部健一 K. ABE  
梶澤祐太 Y. KAJISAWA 山崎 亮 R. YAMAZAKI

Future steering systems need to not only be compatible with automated driving systems, but also allow for improved driving space flexibility. To address these needs, we are currently developing a Steer-by-Wire system with no mechanical link. This document provides an explanation of the advantages of this new steering system, its concept of safety, and new technologies such as system redundancy and control based on the concept of safety.

**Key Words:** steer-by-wire, ADAS, SBW, EPS, EE, BPS, J-EPICS

### 1. はじめに

近年、先進運転支援システム（以下、ADAS）の普及と自動運転の実用化への流れが進んでいる<sup>1) 2)</sup>。一例として図1に日本におけるADASおよび自動運転システムの導入ロードマップを示す<sup>3)</sup>。日本では現在SAE（米国自動車技術者協会）が定義する自動化レベル3（条件付運転自動化<sup>4)</sup>）の対応車両が販売開始され、2030年頃にはレベル4（運転継続困難時応答の条件付自動化）相当の自動運転技術が普及していると予想される。

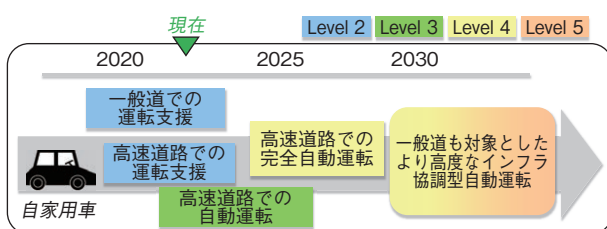


図1 ADAS・自動運転の導入ロードマップ（日本）<sup>3)</sup>  
Roadmap of introduction of ADAS and automated driving in Japan

こうした中で、ステアリングシステムにはADAS・自動運転への親和性と手動運転時における快適性・利便性の両立が必要になると考えられる。加えて、車室内空間自由度向上のためには、運転者のステアリングホイール操作を検出する操舵ユニットと、その操作量に基づき

\*1 本報は、2021年自動車技術会 春季大会予稿集(20215095)を基に作成した。

タイヤ角を制御する転舵ユニットが分離した構造を持つステアリングシステムがレイアウト上、好ましいと考えられる。

これらのニーズを具現化する手段として、リンクレスステアバイワイヤシステム（以下、SBW）の開発を進めてきた。今回、安全の考え方とそれに基づいたシステムの冗長化や新しい制御技術を実装し、車両搭載可能なシステムを開発したので、結果を報告する。なお本システムは、タイヤの転舵を電気信号によって実現するステアリングシステムとして当社が考えるJ-EPICS（JTEKT Electronics Performed Intelligent Control Steering）の最初の実現例である。

### 2. 開発の狙いと課題

#### 2.1 開発の狙い

SBWは操舵ユニットと転舵ユニットを機械部品ではなく電気信号で接続するもので、主に以下の特徴を有する。

- (1)操舵と転舵の動きを独立して制御可能
- (2)操舵ユニットと転舵ユニットの間に機械的接続構造を持たない

(1)により、ADASによる運転支援制御や車両システムの指令に基づいた自動運転中に転舵角とステアリングホイール操作との干渉を防ぐことができるなどのメリットがある。その結果、ADASや自動運転とステアリング機能の親和性が向上する。手動運転に対しては転舵角

(タイヤ切れ角) と操舵角の角度比 (ギヤ比) を制御で調整することにより、タイヤ切れ角に対するステアリングホイール操作量を軽減できる。これによりステアリングホイール操作の快適性・利便性を向上させることができる。また(2)により、車両へのシステム搭載自由度が向上する。さらに(1)(2)により、手動運転時の不要な路面の振動を遮断するとともに必要な路面情報を伝達することで、運転者の疲労を軽減させ安全・安心を確保することができる。

以上のようにSBW は手動運転と ADAS・自動運転を最適に両立させることが可能であり、今後の自動運転の普及に伴い適用拡大が見込まれる。

## 2.2 開発課題

SBW 開発にあたり、システム構成においてまず着目すべき従来の電動パワーステアリング (以下、EPS) との相違点は、操舵ユニットと転舵ユニットが機械的に接続されておらず電氣的に接続されていることである。この相違点により主に二つの課題が生じる。

- (1)システム故障時の安全性確保
- (2)システム正常時の基本機能の確立

(1)について、従来の EPS では電気電子 (以下、EE) システムに故障が発生した場合、アシストトルクが無くなり操舵トルクが増大するものの、運転者の操舵により転舵することができる。これに対し、SBW では機械的な接続構造がないため、EE システムに故障が発生した場合、運転者は操舵により転舵することができなくなる。したがって SBW では、故障が発生した場合でもシステム動作を継続するフェイルオペレーションのコンセプトが必要となる。

(2)の具体的な課題は、ユニット間のトルク・舵角情報の伝達方法、ユニット間の動作の同期、および操舵角と転舵角の位相ずれへの対応である。

これらの課題解決に主眼を置き開発を推進した。

## 3. 開発コンセプト

本開発における最優先課題はステアリングシステムとしての安全性の確保である。本開発では、フェイルオペレーションを目的として EE システムを独立 2 系統化するとともに、電源構成を通常時は両系統とも車両電源を利用し、失陥時にシステム専用のバックアップ電源 (Backup Power Supply, 以下、BPS) に切り替える構成とすることで、EE システムのいかなる 1 次故障においてもステアリング機能を継続し、その後の退避行動を可能とする。なお BPS の電源容量は、ほとんどの走行シーンにおいて安全な車両の路肩停止が可能であることを目標に設計する。

図2に安全コンセプトを示す。

- ① EE システムの片系統故障時は残存系統で最低限のステアリング機能を維持
- ② 車両電源失陥時は電源を BPS に切り替え、BPS 電源容量の範囲内において、片系統で最低限のステアリング機能を維持
- ③ 両系統失陥時は車線内停止

その他、本開発では手動運転における EPS と同等以上の性能と、ADAS・自動運転との親和性を活かした高付加価値性能を目標とする。特に手動運転における実現手段として舵角に応じた操舵角と転舵角の角度比調整、運転者に対する路面情報の適切な伝達、操舵角と転舵角の位相合せ機能を搭載する。

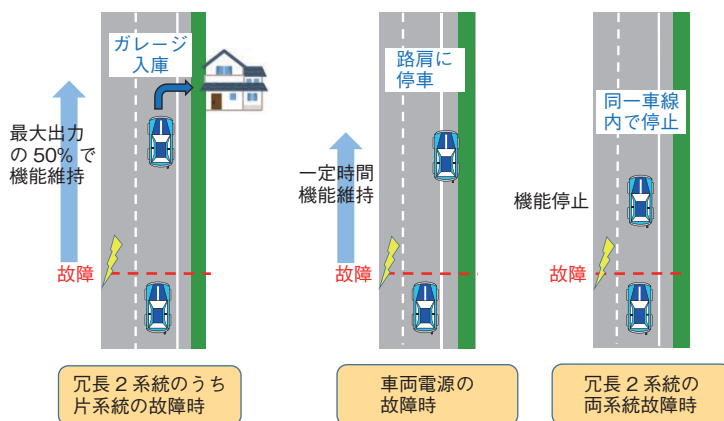


図2 安全コンセプト  
Safety concept

### 4. システム構成概要

図3に本システムの構成概要を示す。システムは大別して操舵ユニット、転舵ユニット、BPS、およびそれらを接続する電源・信号ハーネスで構成される。

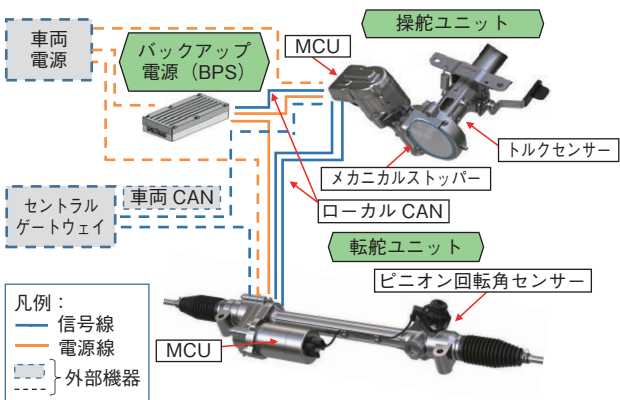


図3 SBW システムの構成概要  
SBW system configuration

操舵ユニットは、運転者のステアリングホイール操作量を検出して転舵ユニットに転舵角を指示するとともに、ステアリングホイール操作に対する適切な反力を生成する。転舵ユニットは、転舵角（タイヤ角）を制御するとともに、路面からの反力等の逆入力情報を検出して操舵ユニットに伝達する。両ユニットはそれぞれの制御ソフトウェアにより協調制御される。

制御に必要な角度・トルク情報は、操舵ユニットのトルクセンサー、転舵ユニットのピニオン回転角センサー、および両ユニットの各モーター回転角センサーの検出値からそれぞれ演算し、ユニット間で伝達する。またユニット間および操舵ユニットーBPS間の情報はローカルCANで通信し、車両システムとの間の情報は車両CANで通信する。

本システムの安全機構として、モーターとECUを一体化したMotor Control Unit (以下、MCU)を中心にEEシステムを2系統化するとともに、BPSおよびステアリングホイール過回転防止機構(5.3節で後述)を搭載した。

また操舵ユニットと転舵ユニットは、信頼性を確保するために、量産実績のあるコラムタイプEPSとラックパラレルタイプEPSの技術を流用した。

### 5. 安全性

#### 5.1 EEシステム故障時の安全性確保

図4にEEシステムの構成概要を示す。操舵MCU、転舵MCUともに制御演算部(以下、マイコン)、モーター駆動部、モーターコイル、センサー(トルクセンサー/モーター回転角センサー)のすべてのEE部品を冗長な構成とし、それぞれのEE部品をシステム1とシステム2に分けて独立に配置している。モーターは、2系統のモーターコイルそれぞれが発生する起磁力に基づいて一つのローターを駆動する。また操舵MCUと転舵MCU間の通信も系統別に設けることにより、各系統でシステムを独立して動作可能な構成とした。この構成により、あらゆるEE部品の故障時にも故障が発生していない方の正常なシステムを使用してシステム動作を継続させることが可能である。

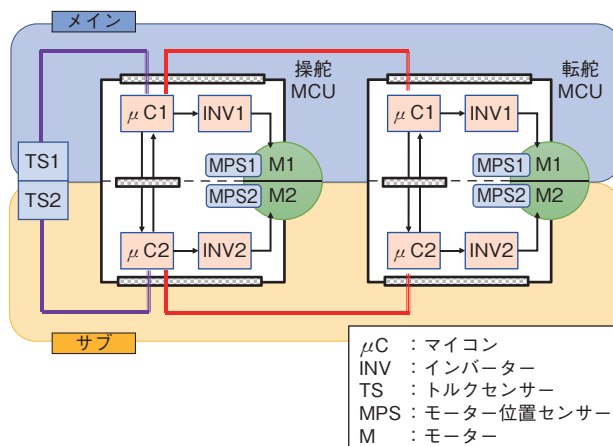


図4 EEシステムの構成概要  
EE system configuration

図5に故障を想定したシステム動作の状態遷移を示す。正常時は両系統で協調してシステムを動作させる(SBW\_Mode1:協調駆動)。このときシステム1をメイン、システム2をサブの関係とし、マイコン間の通信により両系統間で情報を伝達し合うことで、異常発生時の状態遷移に必要な他系統の情報を共有するとともに、システム1で演算された指令も共有することでその指令に基づきシステム2のモーターを駆動する。マイコン間の通信が故障した場合は各系統とも自系統で演算した指令に基づきモーターを駆動する状態に移行し(SBW\_Mode2:独立駆動)。システム1が正常であることを確認した後、システム1の演算値を2倍した指令値に基づきモーターを駆動する状態に移行する(SBW\_Mode3:片系統駆動)。各系統

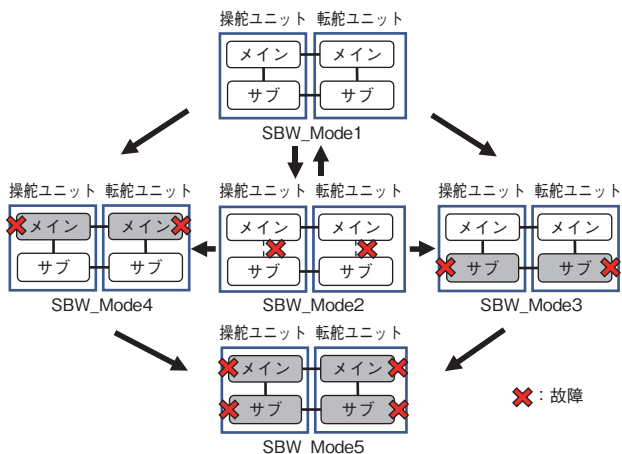


図5 システム動作の状態遷移  
System operation mode

内で故障が発生した場合はマイコン間の通信およびユニット間の通信を継続した状態で故障系統の動作を停止させ、正常系統側のみによる動作に切り替える (SBW\_Mode3 / SBW\_Mode4 : 片系統駆動)。その後、正常系統側でも故障 (2次故障) が発生した場合は両系統とも動作を停止させる (SBW\_Mode5 : 両系統停止)。

### 5.2 車両電源失陥時の安全性確保

電源系統にBPSを用いることで、車両電源失陥時にもステアリング機能を継続できる構成とした。図6に電源系統図を示す。通常時はBPSを経由して車両電源から系統1に電源が供給される。車両電源失陥時はBPSから系統1に電源が供給されステアリング機能が継続可能である。その際、系統2には電源供給されず停止状態に移行するため、系統1による片系統駆動 (SBW\_Mode3) に切り替える。

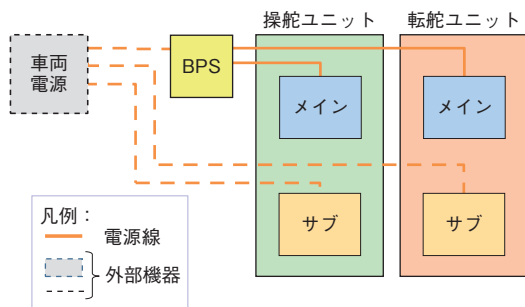


図6 電源系統図  
Power supply diagram

### 5.3 ステアリングホイール使用に対する安全機能

操舵ユニットと転舵ユニット (タイヤ) との機械的接続がないことで、ステアリングホイールが過回転してスパイラルケーブルなど他部品の故障を誘発させることや、ステアリングホイールに手をかけて乗降する場合にステアリングホイールが動いてしまい運転者が不都合を感じる事が考えられる。

ステアリングホイールが過回転することに対して、パワーON中はラックエンドに当たる際の手応え (操舵反力) を電氣的に発生させ (以下、仮想ラックエンド反力) (図7)、これを仮想エンドストッパーとすることで過回転を防止し、転舵ユニットのラックバーがラックエンドに当たる前にその状態を運転者へ伝える。またパワーOFF中および運転者が仮想ラックエンド反力以上の操舵力で切り込むことに対して、メカニカルストッパーで過回転を防止する (図8)。

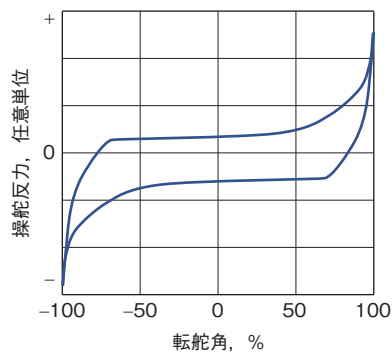


図7 仮想ラックエンド反力の一例  
Example of virtual rack end reaction torque

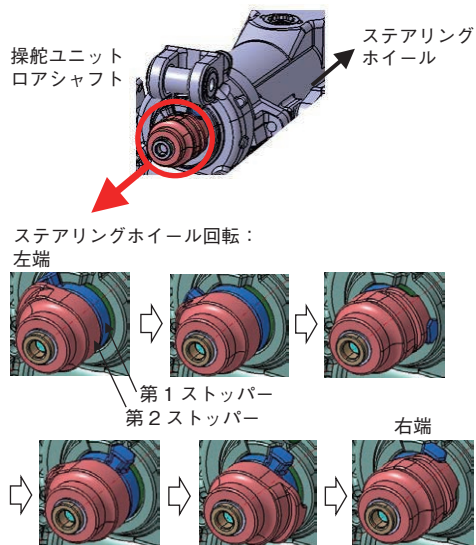


図8 メカニカルストッパーの一例  
Example of mechanical stopper

ステアリングホイールに手をかけて乗降する場合も想定されるため、パワー OFF 中はステアリングを機械的にロックする機構も付与する。

上記の各機能が有効となるタイミングとシステム状態の関係を図9に示す。

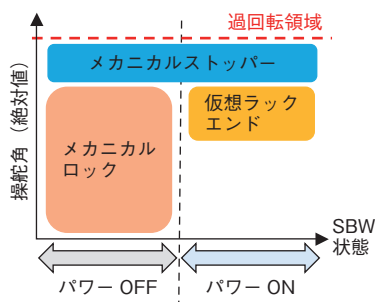


図9 ステアリングホイール過回転対策  
Countermeasure concept for wheel over-rotation

## 6. システム制御

### 6.1 システム起動・終了シーケンス

図10にシステムの起動・終了時のタイミングチャートを示す。イグニッション ON によりシステムを起動し、イニシャルチェックを実施する。その後ステアリングロックが解除された後に操舵ユニット→転舵ユニット間の位相合せを実施する。これは、両ユニット間に機械的接続がないことで、システム起動前に操舵角と転舵角の間でずれが生じている可能性があるために実施する。位相合せ完了後はエンジンの始動完了および BPS の起動完了を受けてシステムの制御を開始する。

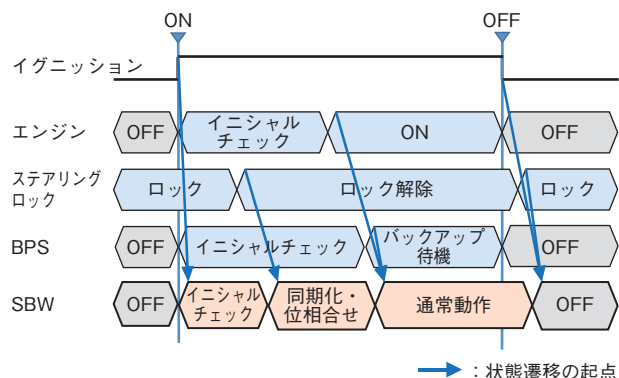


図10 SBW システムのタイミングチャート  
Timing chart of SBW system

システム終了時は、イグニッション OFF およびステアリングロックがロックされた後にシステムの制御を終了する。このシーケンスによりシステム停止時のステアリングホイール空転状態を防止している。

### 6.2 EE システム故障時の動作状態切替え

5.1 節で述べたシステムの動作状態について、故障発生時の動作状態の切替えを具体的な故障事例を用いて説明する。図11は操舵 MCU の系統 1 側のマイコンが故障した場合の事例である。このとき操舵 MCU は直ちに系統 1 の動作を停止し、系統 2 による片系統駆動 (SBW\_Mode4) に切り替える。系統 1 の転舵 MCU は正常動作可能であるが、制御が複雑になるため、信頼性を重視し、系統 1 すべての動作を停止させる。

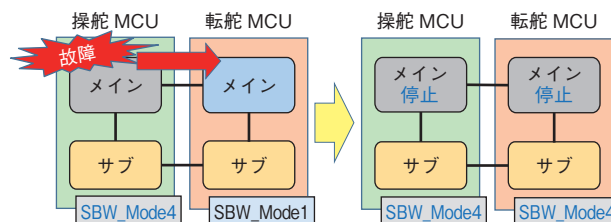


図11 SBW 動作状態の遷移  
Transition of SBW\_Mode

### 6.3 車両電源失陥時の切替え

5.2 節で述べた電源系統において、車両電源失陥が発生すると BPS がその失陥を検出し、系統 1 への電源供給源を車両電源から BPS 内部電源に切り替え、MCU への電源供給を継続させる。

## 7. ステアリング制御

### 7.1 制御概要

図12に制御概要を示す。操舵ユニットはステアリングホイール操舵角を検出し、転舵ユニットに送信する。転舵ユニットは操舵角からギヤ比などを考慮して目標転舵角を演算し、目標転舵角と実転舵角とで角度フィードバック制御を実施する。一方、転舵ユニットはモーター電流値や転舵角などを検出し、操舵ユニットに送信する。操舵ユニットは転舵モーター電流値、転舵角、操舵角に基づいて反力トルクを生成する。

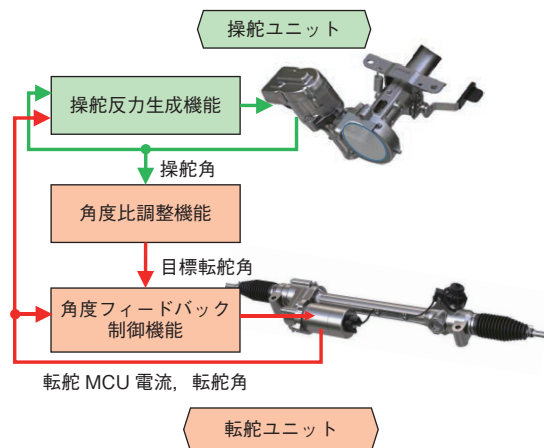


図12 制御概要  
Control outline

### 7.2 運転者への路面情報の伝達

操舵ユニットと転舵ユニットが機械的に接続されていないため、運転者へ走行中の路面状態を伝える機能が必要である。ただし、ブレーキ振動や悪路走行時のキックバックなど伝達しない方が良い情報もあるため、必要な情報のみを伝達するようにした。図13に示すように、転舵ユニットのモーター電流を基にした反力を操舵ユニットで生成する。その電流には車両の挙動や路面情報などが含まれており運転者はその情報を基に操舵することが可能となるため、従来のステアリングと同様の安心感が得られる。また情報伝達が不要な場合は操舵角より求めた目標転舵角に基づき操舵ユニットで反力を生成する。これにより不要な情報による運転者の負担を軽減する。

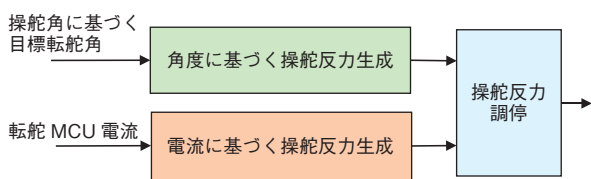


図13 操舵反力生成機構  
Block diagram of reaction torque generators

### 7.3 運転者へのシステム状態の伝達

操舵ユニットと転舵ユニットが機械的に接続されていないため、たとえばタイヤが何らかの障害物に当たった際に、操舵角と転舵角にずれが発生する場合があります。運転者へ違和感を与える可能性がある。そこで、一定値以上操舵角と転舵角がかい離した場合にその旨の情報を運

転者に伝える機能を設けた。図14に示すように、操舵角と転舵角の角度偏差が一定値以上となった場合、操舵反力を増大させることにより運転者へ転舵量が追従できていないことを伝えるとともに、それ以上角度偏差が発生しないよう運転者の操舵を抑制する。

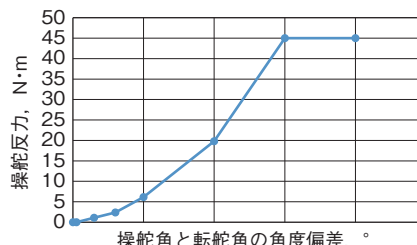


図14 角度偏差に応じた操舵反力  
Reaction torque against angle deviation

## 8. おわりに

ADAS・自動運転への親和性に優れ、手動運転時の快適性・利便性の向上が可能なSBWの開発を進めてきた。本開発においては、システムの安全性確保を第一に掲げ、EE系統および電源の失陥に対してEE系統の冗長化をおこないBPSを搭載した。またステアリングホイール過回転に対して回転角を制限する機能を織り込むことで、安全を確保したシステムを実現した。さらにEPSで確立した技術を基にシステムの信頼性確保を図った。そのうえで、操舵角と転舵角の位相合せなど、EPSと同等以上の性能を実現するためのSBWの基盤技術を確立した。

今後は、SBWの利点を活かした手動運転時の快適性・利便性を図るとともに、ADAS・自動運転との親和性を活かした高付加価値の実現を目指し、引き続き開発を推進していく。

本システムの開発に当たり有益なご助言・ご協力をいただきましたトヨタ自動車株式会社ならびに株式会社デンソーご関係各位に深く感謝致します。

\* J-EPICSは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 松岡 浩史 : Development and Future Outlook of Steering Systems, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013E(2016)8.
- 2) ERTRAC : Development paths, ERTRAC Connected Automated Driving Roadmap 2019 (2020)12.
- 3) 内閣官房 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 : 今後の ITS 構想の基本的な考え方, 参考資料, 官民 ITS 構想・ロードマップ 2021(2021)18-34, 35-37.
- 4) SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016(2016).

## 筆者



西村 興\*  
K. NISHIMURA



並河 勲\*\*  
I. NAMIKAWA



安部健一\*  
K. ABE



梶澤祐太\*  
Y. KAJISAWA



山崎 亮\*\*\*  
R. YAMAZAKI

\* 自動車事業本部 先行システム開発部

\*\* 自動車事業本部 制御・SW 技術部

\*\*\* 自動車事業本部 技術企画部