

## SA・PS統合制御技術の研究

佐々木 啓 ・ 綱井 秀樹 ・ 金子 周平  
 工藤 朋之 ・ 久保 大和 ・ 菅原 央道

## 1 はじめに

将来、自動運転の普及が進み、2040年には新車の約30%がレベル3以上の自動運転車になると予測されている<sup>1)</sup>。これに伴って自動運転時の安全・安心と快適さのニーズは拡大・多様化すると予想される。このニーズに応えるため、ショックアブソーバー(以下SA)とパワーステアリング(以下PS)の両製品を扱うKYBの強みを活かして車両挙動を自在に制御するSA・PS統合制御技術の研究に取り組んでいる。自動運転時の安全・安心の向上には、正確でふらつかない走行が不可欠であり、路面凹凸の影響を抑えて目標軌道へ追従する技術が必要である。

そこで本研究ではSA・PS統合制御技術の一環として、主に上下振動に伴うSAの情報を電動パワーステアリング(以下EPS)の制御に活用した、図1に示す軌道追従制御と横揺れ抑制制御の2つの制御開発に取り組んだので紹介する。

軌道追従制御はSA・PS統合制御の要素技術であり、自動運転時の情報を活用して目標軌道に正確に追従するためのEPSの制御技術である。横揺れ抑制制御は上下振動時のSAの情報を利用してEPSを制御することで、上下振動に伴う横揺れを抑える技術である。

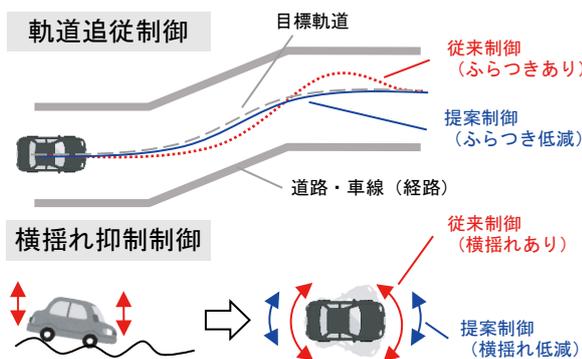


図1 SA・PS統合制御技術の概要

## 2 システム概要

本研究では、SAとPSの制御の研究開発のために構築した実験車両を利用した。この車両は事前に設定したテストコース内の経路データ（地図データ上に設定されたデジタルレーン）に対して自動で追従することが可能となっている。そのため、テストコース内の走行に限られる。なお、ステアリングの操舵のみ自動化しているため、本稿では自動操舵車両と分類している。

なお、ブレーキとアクセルは手動で、車速維持などは標準装備のクルーズコントロール機能を用いた。

## 2.1 実験車両の機材の構成

実験車両の機材の構成概要を図2に示す。実験車両は市販車両をベースに、サスペンションのストローク(変位)を計測するセンサ(以下サスストロークセンサ)や加速度センサなどの各種センサの他、高精度な自己位置の測位が可能なGPSセンサを追加した。また、制御用に汎用コントローラ、自動操舵用のPCを車内に搭載した。

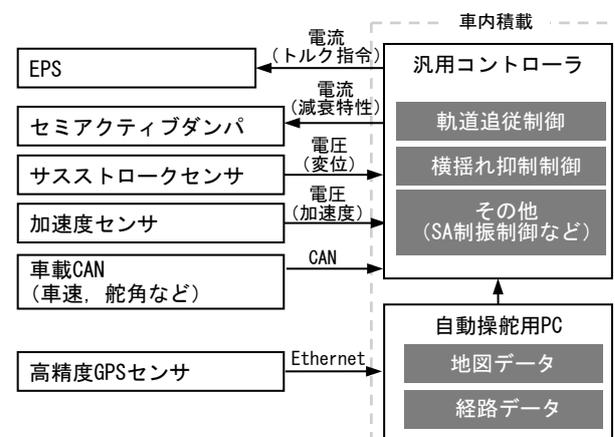


図2 実験車両の機材の構成概要

操舵の自動化に伴い当社製の試作EPSを利用して  
おり、汎用コントローラと接続することで制御可能  
になっている。その他、当社製の電子制御のセミア  
クティブダンパを搭載して、こちらも汎用コント  
ローラと接続して制御可能にした。

## 2.2 システム構成

システム構成を図3に示す。本稿で紹介する2つ  
の制御は主にEPSを扱うため、図3中ではEPSとの  
接続について記載している。

自動操舵用PCには自動運転ソフトウェアの  
Autoware<sup>®</sup>注1)を搭載した。また、事前に計測・設  
計したテストコースの経路データも搭載している。  
自動操舵用PCはこの経路データとGPSの測位情報  
を利用して、経路追従に必要な近傍の目標経路の情  
報を汎用コントローラに送っている。

汎用コントローラにはMATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>  
で作成した制御モデルを組み込んでいる。汎用コント  
ローラでは経路の追従に必要なEPSへの制御指令  
(トルク指令)の計算まで行っている。

Autoware<sup>®</sup>では本来、経路情報と自己位置から経  
路の追従に必要な舵角も算出できるが、本研究では  
その機能を汎用コントローラに移植して改良を行った。

注1) Autoware<sup>®</sup>：名古屋大学、長崎大学、産総研によ  
る共同成果の一部として、自動運転の研究開発用途  
で公開されているLinuxとROSをベースとした自動運  
転システム用オープンソースソフトウェア。

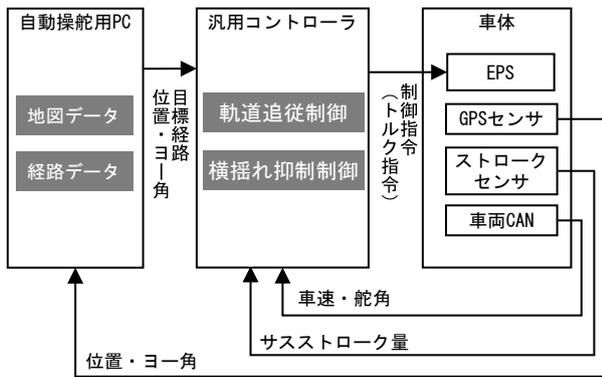


図3 システム構成概要

## 3 軌道追従制御の設計

狙った軌道への正確な追従に必要なことの一つと  
して、ヨーレートの応答の遅れの抑制が挙げられる。

ヨーレートの応答の遅れは、ステアリングを操舵  
してから車両が旋回を始めるまでに伝達する際の  
諸々の機械的・物理的な特性によって発生する。こ  
の応答の遅れを解消するためには、その伝達特性に  
基づいて位相が進むように動かし、ステアリングか

ら車両までの伝達の遅れを抑制する必要がある。

応答の遅れを解消する手法としてモデル予測制御  
があり、化学プラントなど比較的遅いプロセスを持  
つシステムで多く採用されている<sup>2)</sup>。しかし、制約  
や最適化の計算に比較的複雑な手続きを要し、処理  
時間が長いといった課題がある。近年はプロセッサ  
やアルゴリズムで解決しつつあるが、技術的なハー  
ドルは高い。

そこで本研究では、なるべく簡潔な方法での実装  
を目指し、図4に示す軌道追従制御を開発した。こ  
の制御では、まず車両の応答予測にて経路への追従  
時の車両の位置と姿勢の応答を予測する。そして、  
ヨーレート制御では予測される車両の応答の遅れ分  
だけ未来の目標値を参照して遅れを抑制する。

ここで、舵角制御はEPSの伝達関数の逆関数を利用  
し、EPSの伝達特性を打ち消す2自由度制御を取り  
入れて応答の遅れの抑制を行った。逆関数を扱う上  
で正確な微分値が必要となるため、舵角制御では目  
標舵角の2階微分までを入力として受け取っている。

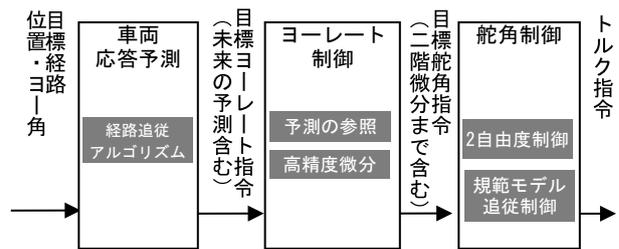


図4 軌道追従制御の構成概要

### 3.1 経路追従と目標軌道

本研究では、経路は地図上に事前に線路のように  
設定されたルートと定義し、目標軌道はこの経路に  
追従させる際に車両に実際に走行させたいルートと  
定義している。目標軌道は自動運転の設計思想やア  
ルゴリズムで様々で、特にカーブやレーンチェンジ  
などでは経路に対してどのように目標軌道を描くか  
で乗り心地や安全性などが異なってくる。

本研究ではAutoware<sup>®</sup>でも採用されているPure  
pursuit法<sup>3)</sup>と呼ばれる経路追従アルゴリズムを採用  
し、このアルゴリズムで経路追従する際の軌道を目  
標軌道と定義した。

経路追従のアルゴリズムの概要を図5に示す。  
Pure pursuit法では前方注視点と呼ばれる車両前方  
の一定距離先の点と経路との誤差から目標ヨーレ  
ートを算出し、車両特性に基づき操舵角を決定して経  
路追従するアルゴリズムである。

性能評価では、経路追従アルゴリズムで評価路の

経路データに対する車両の軌跡を事前に計算し、目標軌道として利用した。

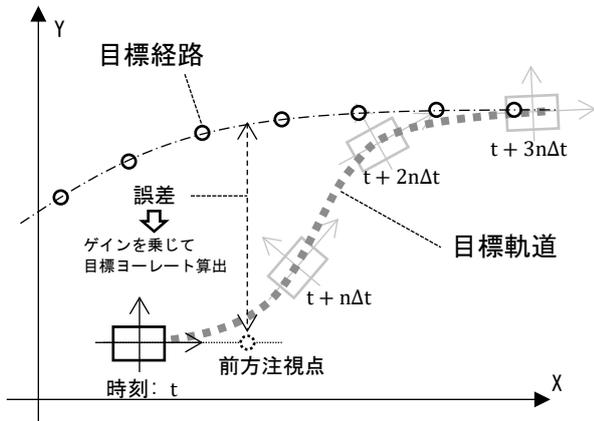


図5 経路追従アルゴリズムと目標軌道

### 3.2 車両の応答予測

車両の未来の位置・姿勢は、現在位置と経路の位置関係が分かる場合には、精度に限度はあるが経路追従アルゴリズムに基づいて応答を計算して予測できる。本研究では、計算量の削減と簡素な実装を目指し、平面上での2自由度車両モデルを利用して車両の応答を予測した。経路追従アルゴリズムには3.1節でも述べたPure pursuit法を利用し、離散モデルに基づく単位時間当たりの車両の位置・姿勢の変化を逐次計算して、最大1秒先までの未来のヨーレートを予測し、目標ヨーレートを算出した。

### 3.3 ヨーレート制御—予測の参照と制御

車両のヨーレートの応答遅れは、車両の特性や実際の車両の応答から、どれだけ応答が遅れるかを事前に予測することができる。そこで、図6に示す予測した目標値の参照方法のように、応答が遅れる時間分だけ、予測した未来の目標値を用いることで、応答の遅れを抑制することを狙った。

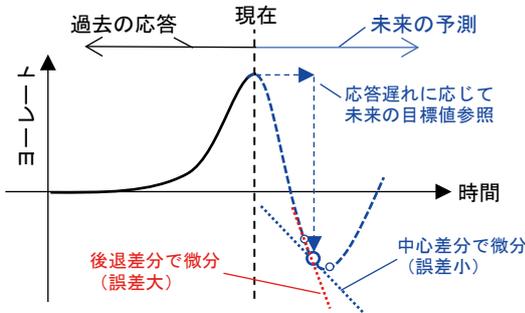


図6 予測した目標値の参照方法

さらに目標値前後の過去・未来の値を利用することで、舵角制御において必要な2階微分値までの近似値を中心差分により高い精度で算出可能になった。

目標ヨーレートの制御には、車両特性に基づく車両の安定性係数<sup>4)</sup>を考慮した車速可変ゲインで舵角を決定するフィードフォワード制御と、目標ヨーレートと実ヨーレートとの差分によるフィードバック制御を組み合わせを行った。

### 3.4 舵角制御—予測を利用した2自由度制御と規範モデル追従制御

応答遅れを抑制するための手法として2自由度制御がある。2自由度制御は制御対象に対して、その伝達特性の逆の特性を持つ逆関数を介して制御することで伝達特性を打ち消す手法である。しかし、逆関数を厳密に扱うには高精度な微分値が必要であり、さらにEPSの特性は複雑なため逆関数の扱いが難しい。

そこで、本研究では図7に示す2自由度制御と規範モデル追従制御を組み合わせ舵角を制御した。

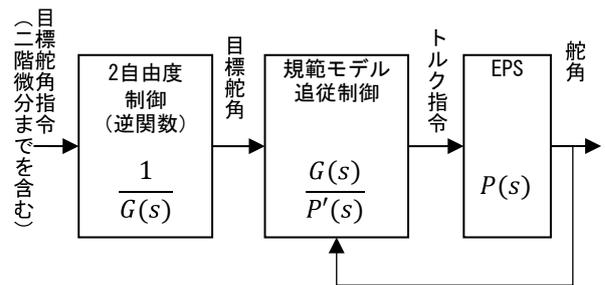


図7 EPSの舵角応答遅れ抑制制御の構成概要

EPSの伝達関数を $P(s)$ とすると、まず規範モデル追従制御によってEPSの応答特性を任意の伝達関数 $G(s)$ (規範モデル)に近づけた。この時、EPSの伝達関数を線形化して近似した伝達関数 $P'(s)$ を利用している。

そして2自由度制御では、3.3節で算出した高精度な微分値を使用して逆関数を演算することで、全体として次の式(1)が成立して、入力 $X \equiv$ 出力 $Y$ となるように制御した。

$$\frac{Y}{X} = \frac{1}{G(s)} \frac{G(s)}{P'(s)} P(s) \approx 1 \quad (1)$$

この時、逆関数 $1/P'(s)$ のみではEPSの特性 $P(s)$ が変動した場合に性能が悪化するため、フィードバック制御で規範モデル $G(s)$ に近づける規範モデル制御を利用することで、外乱に対するロバスト性を向上させることを狙っている。

開発した舵角制御の応答のシミュレーション結果を図8に示す。「従来」は当社試作EPSに搭載され

た舵角制御で、「提案」は本研究の舵角制御である。常用域の応答試験の一つでもある台形波応答（4秒で90度変化）では従来と比較すると提案の応答が早く、オーバーシュートも抑えられて、収束も早いことが分かる。また、ステップ応答でも応答・収束は早くなっている。一方で、ステップ応答ではややオーバーシュートが大きくなった。この要因として規範モデル制御のモデルへの追従誤差や逆関数の微分精度の影響が挙げられる。

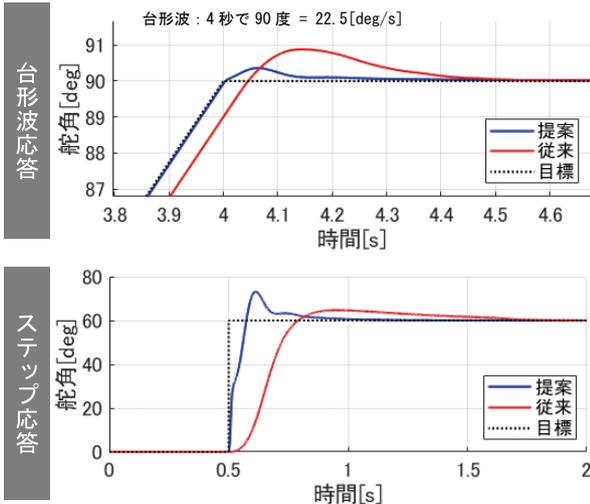


図8 EPSの舵角制御の応答

#### 4 横揺れ抑制制御の設計

車両が路面の凹凸によって上下に揺れたとき、サスペンションジオメトリ構造によってキャンバ角が変化してキャンバスラストが発生<sup>5)</sup>し、車体が横に揺られてヨーレートが発生することがある。

本研究では、このような路面凹凸によって発生するヨーレートを横揺れとして、SAに搭載したストロークセンサから事前に横揺れを予測して、EPSを用いて修正舵を行くことで横揺れを抑える横揺れ抑制制御を開発した。

##### 4.1 ストロークから横揺れの予測

路面の凹凸により発生する車体のヨーレートは、IMUなどのセンサでも計測できるが、これはすでに車体で発生した後の振動であるため、横揺れを素早く抑制することは難しい。

そこで、路面凹凸に対してタイヤが乗った瞬間の4輪のサスペンションのストロークの動きから横揺れを事前に予測して、足回りから車体へと振動が伝達して横揺れが発生するその前にステアリングで横揺れを抑制する。

設計した横揺れ抑制制御の構成を図9に示す。こ

の制御では、路面の凹凸の種類、例えば前後輪がロールする場合と、前輪・後輪が単独でロールする場合で、異なる推定ロジックを組み合わせることで予測精度を向上させている。

特に前輪と後輪の横揺れの差分の微分を取ることによって、片輪が段差に乗り上げた場合の車体のねじれによる横揺れを予測することができるようになった。

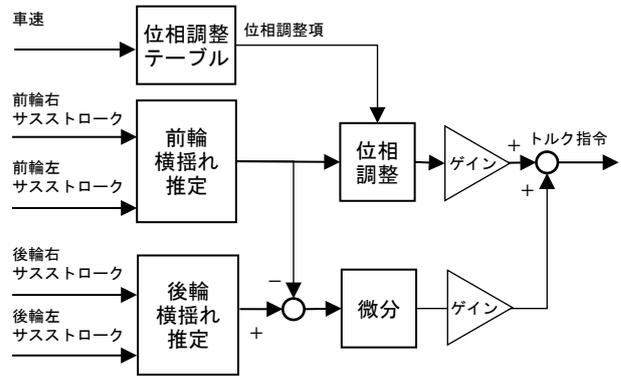


図9 横揺れ抑制制御の構成概要

##### 4.2 評価路面での応答と予測

路面凹凸に伴う横揺れの検証・評価のために2種類の評価路面を選定した。この評価路面の概要を図10に示す。両輪周期振動路は、路面がサイン波状になっており左右のタイヤが交互に上下する路面である。また、単発振動路は約10cmの段差に片輪側に乗り上げる段差路である。

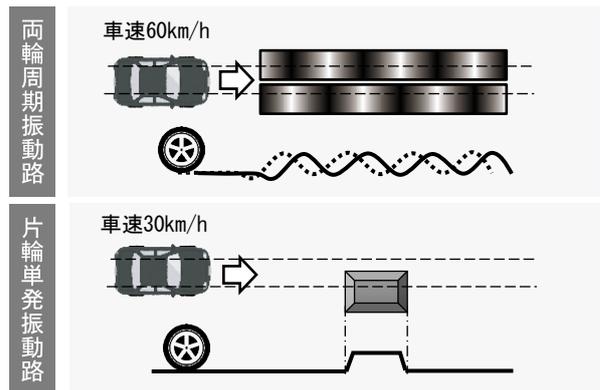


図10 横揺れの評価路面

路面の凹凸によるヨーレートの発生と、横揺れの予測精度を確認するため、横揺れ抑制制御は行わず、路面凹凸上を直進した。このときのヨーレートの実応答と予測の結果を図11に示しており、ストロークの動きからヨーレートの応答を比較的精度良く事前に予測することができている。

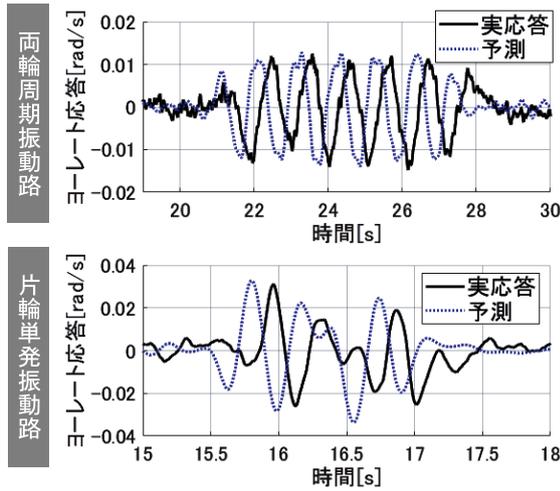


図11 評価路面走行時のヨーレートの応答と予測

### 4.3 予測に基づく横揺れの抑制

横揺れ抑制制御の指令をEPSに入力する際の構成を図12に示す。予測した横揺れ量にゲインをかけてトルク指令に換算し、EPSのトルク指令に加算して行う。応答速度の速いトルク指令に加算することで、横揺れの予測から抑制までの猶予に対応することができた。

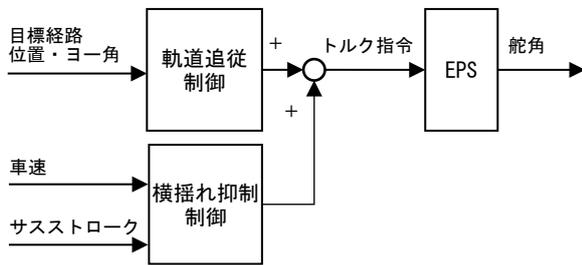


図12 横揺れ抑制制御指令の加算

## 5 軌道追従性能の評価

本研究で提案した軌道追従制御の軌道への追従性能を評価するため、テストコースで試験を実施した。比較対象の従来手法は、3.3節に述べた目標ヨーレートの指令に対して車速可変ゲインで舵角を決定するフィードフォワード制御を行う手法とした。

### 5.1 性能評価条件

目標軌道は、前述3.1節で述べた通り、地図上に設定された経路データに対して、経路追従アルゴリズムPure pursuit法で横滑りなしで理想的に追従した際の軌跡とした。

軌道追従誤差は車両の重心から左右方向に対して伸ばした垂線と目標軌道との交点との距離と定義して評価に利用した。性能は軌道追従誤差の最大値を比較し、従来制御に対する提案制御の誤差の比率を

従来比として算出して性能を比較した。

試験では図13に示す平坦な路面での車速60km/hのスラロームと、アップダウンがある周回路で車速40km/hで走行して計測した。計測では車速を一定に保ち、自動操舵で走行して実施した。

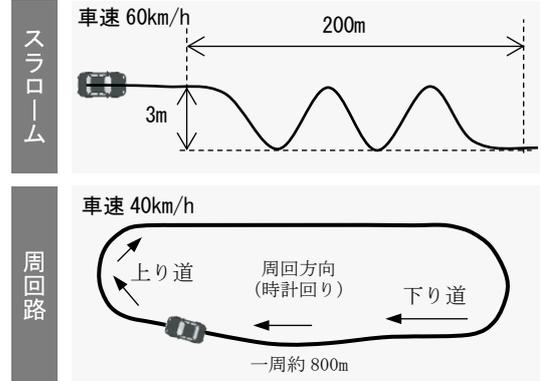


図13 軌道追従性能の評価路

### 5.2 性能評価結果

走行試験の結果として、各評価路での総走行距離に対する目標軌道との追従誤差を図14に示す。提案制御の結果、スラロームでは従来比で最大35%まで軌道追従誤差を低減できた。周回路ではカーブで発生する誤差を低減できており、低速での走行ではあるものの、上り下りがあり外乱要素の多いコースでも効果を確認できた。

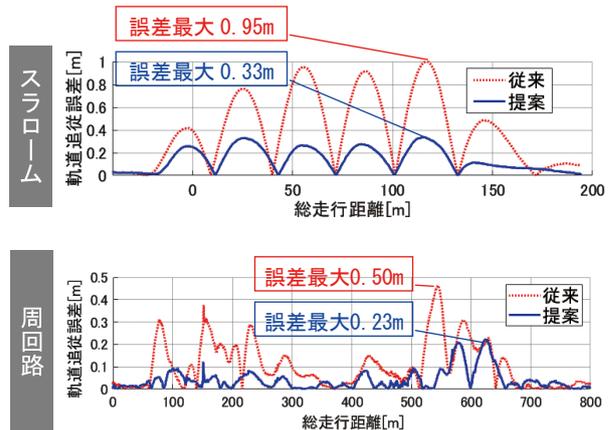


図14 軌道追従性能の評価結果

## 6 横揺れ抑制性能の評価

提案した横揺れ抑制制御の路面凹凸に伴う車両の横揺れの抑制性能を評価するため、テストコースで試験を実施した。比較対象の従来制御は、横揺れ抑制制御をしない場合とした。

### 6.1 性能評価条件

搭載したIMUセンサで計測したヨーレートのPP値（最大値と最小値の差）で評価した。従来制御でのPP値に対する提案制御でのPP値との比率を従来比として算出して性能を比較した。

試験における路面と車速の条件は4.2節で述べた内容と同じで、両輪周期振動路を60km/h、片輪単発振動路を30km/hで直進してその時のヨーレートを計測した。

### 6.2 性能評価結果

性能評価試験の結果を図15に示す。横揺れは従来比で最大46%に低減した。また、両輪周期振動路での中間地点付近では、従来と比べるとさらにヨーレートが小さく抑えられていることが分かる。

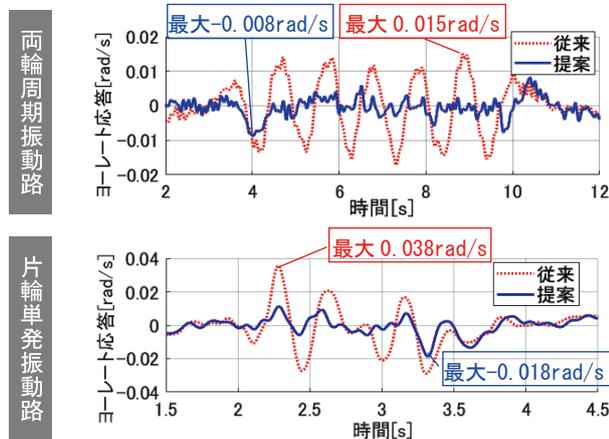


図15 横揺れ抑制性能の評価結果

横揺れ抑制制御の効果を確認するため、当社実験部のドライバーが試乗して官能評価を実施した。結果、「横への揺られ感が改善した」「ロールがきびきびと動く印象になった」「上下のショック感が改善した」といったポジティブなコメントが得られた。横

揺れを抑えた結果、上下やロール方向の振動への官能に影響も出ることが明らかになった。

一方で、「横揺れが抑えられ、上下振動が気になるようになった」「(上下揺れが激しいとき)横揺れの変化が分かりにくい」といったコメントもあった。上下振動との兼ね合いも併せて制御と官能を設計・調整していく必要があるという課題を確認した。

## 7 おわりに

自動運転時の安全・安心と快適性の向上に向けたSA・PS統合制御技術として、目標軌道に正確に追従可能な軌道追従制御と、路面凹凸による横揺れを抑制する横揺れ抑制制御を開発した。結果、目標軌道への追従誤差が従来比で最大35%に低減し、横揺れは従来比で最大46%に低減した。また、横揺れ抑制制御の官能評価では、制御による一定の改善効果を確認したが、上下振動との兼ね合いという点で課題が残った。

今後は、上下振動に連成して発生する横揺れ以外にも、操舵によって連成する上下振動にも着目して、SA・PS統合制御の改良を進める予定である。

### 参考文献

- 1) 富士キメラ総研：2019 次世代カーテクノロジーの本命予測と未来自動車像，(2019年)。
- 2) Jan M. Maciejowski著／足立修一・菅野政明訳：モデル予測制御 制約のもとでの最適制御，pp. 1-3 (2015年)
- 3) R. Craig Conlter：Implementation of the Pure pursuit Path Tracking Algorithm, Technical Report CMU-RI-TR-92-01, (1992).
- 4) 阿部正人：自動車の運動と制御，pp. 72 (2009年)
- 5) KYB株式会社編：自動車のサスペンション 構造・理論・評価，pp. 123 (2013年)

著者



**佐々木 啓**

2012年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．自動車向け運動制御システムの研究開発に従事．



**網井 秀樹**

2010年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．自動車向け先進運転支援システムのソフトウェアの研究開発に従事．



**金子 周平**

2011年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．自動車向け運動制御システムの研究開発に従事．



**工藤 朋之**

2012年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．自動車向けアクティブサスペンションの研究開発に従事．



**久保 大和**

2013年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．電動パワーステアリングの解析業務を経て，自動車向けアクティブサスペンションの研究開発に従事．



**菅原 央道**

2017年入社，技術本部基盤技術研究所運動制御研究室．自動車向けの先進運転支援システムの研究開発に従事．