

論文・解説

38

G-Vectoring Control Plus の開発 Development of G-Vectoring Control Plus

梅津 大輔*1 高原 康典*2 砂原 修*3
Daisuke Umetsu Yasunori Takahara Osamu Sunahara
加藤 史律*4 津村 和典*5
Fuminori Kato Kazunori Tsumura

要 約

車両の横加加速度に基づき、前後加速度制御と直接ヨーモーメント制御を連係させる G-Vectoring Control Plus を開発した。本制御技術はエンジン駆動トルク制御とブレーキ制御を用いており、旋回中のヨー、ロール、ピッチ姿勢の過渡的な動きをスムーズに連係させることで、ドライバーの運転操作を安定化し、車両限界性能を向上することができる。

Summary

G-Vectoring Control Plus developed for mass production integrates longitudinal acceleration control and direct yaw moment control based on lateral jerk information. The integrated-control-system uses engine torque control and brake unit, improving smoothness in transition between yaw, roll and pitch attitudes of a vehicle at turning. This stabilizes driver's steering operations and enhances vehicle's limit handling performance.

Key words : Vehicle Dynamics, Driving Stability, Chassis Control, Driver Model

1. はじめに

減速・旋回・加速という車両の各運動を連係させることが運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能の質感を論じる上で非常に重要であり、マツダはこれまでに横運動に対して前後運動を連係させる G-Vectoring Control (GVC) を高応答エンジンで実現した⁽¹⁾⁽²⁾。

GVCはドライバー操作による横加加速度情報に基づいてエンジン駆動トルクを緻密に制御し、旋回初期の車両横運動と前後運動をスムーズに連係させ、一般走行領域から限界域におけるドライバーの運転操作負担を低減した。

今回、新たにGVCの進化版として、同じ制御則を用いて旋回後半に直接ヨーモーメント制御を加えることで、中高G領域の車両安定性を向上させる G-Vectoring Control Plus (GVC Plus) を開発したので報告する。

2. GVC Plus の概要

GVCとGVC Plus の制御則を式(1), (2)に示す。

$$\begin{cases} G_{xc} = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{C_{xy}}{1+T_s} |\dot{G}_y|, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) < 0) \\ G_{xc} = 0, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{zc} = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{C_m}{1+T_s} |\dot{G}_y|, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) > 0) \\ M_{zc} = 0, (-\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 G_{xc} はGVCの前後加速度指令値であり、車両の横加加速度 \dot{G}_y に制御ゲイン C_{xy} をかけ1次遅れを付与した値である。また、 M_{zc} はGVC Plusの付加モーメント制御量であり、車両の横加加速度 \dot{G}_y に制御ゲイン C_m をかけた値である。

次にGVC Plusの制御コンセプトをFig. 1に示す。

*1, 4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.
*3 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*2 シャシー開発部
Chassis Development Dept.
*5 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

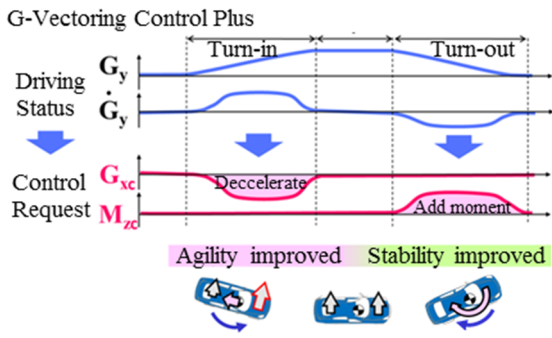


Fig. 1 Concept of GVC Plus

3. システム構成

GVC Plus のシステム構成をFig. 2に示す。GVC Plus のロジックを Powertrain Control Module (PCM) に実装した。PCMは車両に搭載されている各種センサ信号をCANバス経由で受信し、制御要求量 G_{xc} 、 M_{zc} を演算する。アクチュエータには高応答エンジンによる減速度制御とブレーキユニット (DSC) による直接ヨーモーメント制御を用いた。

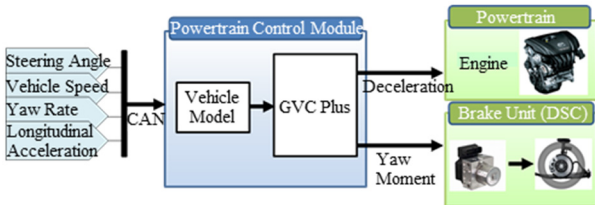


Fig. 2 Control System Configuration

上記PCM内で演算されるGVC Plusの制御作動フラグと制御指令値の一例として、車速80km/hの右レーンチェンジ走行時の時系列データをFig. 3に示す。

操舵切り込み時に $-0.2m/s^2$ 程度の前後減速度指令を出し、操舵を戻す時に200Nm程度のヨーモーメント指令を出しており、ねらいどおりのGVC Plus制御機能を実現していることが分かる。

次にGVC Plusのヨーモーメント指令に基づいて、ブレーキユニットで実際に付加される制動制御の作動状況として、4輪のブレーキ液圧の時系列データをFig. 4に示す。

本システムは、旋回前外輪の液圧を制御しており、制御指示に対して100~150ms程度の遅れ時間でねらいどおりのブレーキ液圧が付加されていることが分かる。

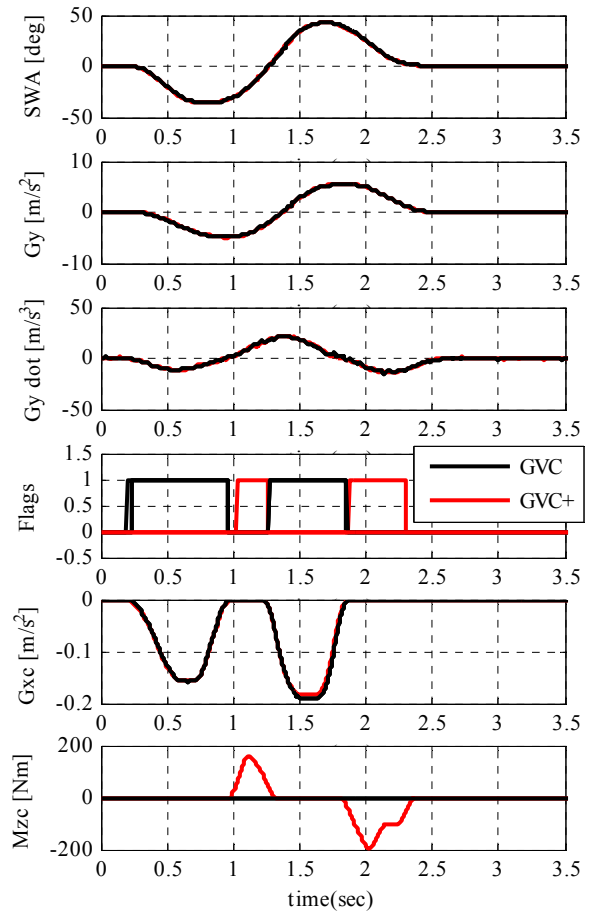


Fig. 3 GVC Plus Control Flags and Request Signals

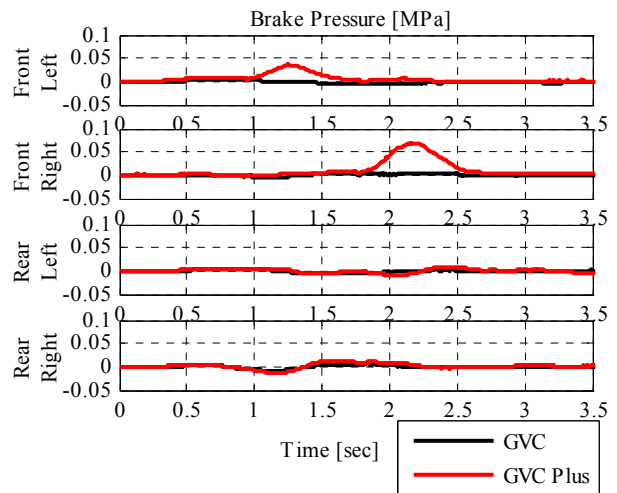


Fig. 4 Yaw Moment Control Actuation by Brake

4. 人間-自動車系での制御効果

人間-自動車系（閉ループ）でのGVC Plusの制御効果を実際の試験車両で明らかにする。

4.1 試験車両

2台の試験車両（Fig. 5）の車両諸元をTable 1に示す。



Fig. 5 Test Vehicle

Table1 Test Vehicle Specification

Dimension	unit	AXELA	CX-5
Length	mm	4470	4495
Width	mm	1795	1840
Wheelbase	mm	2700	2700
Tread (Fr/Rr)	mm	1555/1560	1595/1595
Weight(Fr/Rr)	kg	803/521	874/648
CG height	mm	561	668

4.2 レーンチェンジ性能の評価

Fig. 6に示すコースで、アクセラを用いてレーンチェンジ評価を行った。車速は80km/h（アクセル開度一定制御）、車線移行幅（横変位）は3.0m、レーン乗移り区間（前後変位）は37mとした。中央に設置した方向指示器は、車両前軸が車線移行区間に入った時に点灯し左右方向をドライバーに知らせる。

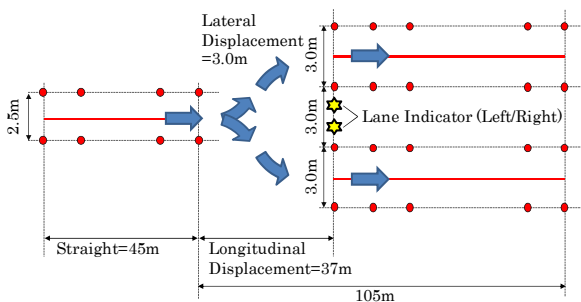


Fig. 6 Lane Change Test Course

制御仕様は前後減速度制御（Gxc）を常時ありとし、直接ヨーモーメント制御（Mzc）の有無を比較評価した。ドライバー操舵角の時系列データと車両走行軌跡をFig. 7に示す。ほぼ同じ走行経路を通っているがGVC Plusにより、時刻1.6sec付近の操舵角がおよそ20%程度小さ

く、レーンチェンジ後半のドライバーの運転操作負担が低減されている。

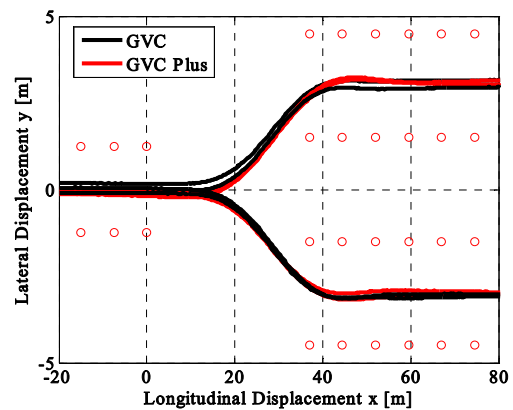
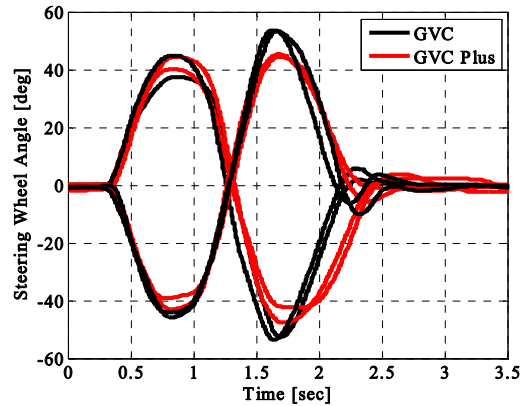


Fig. 7 Lane Change Test Result

人間-自動車系の走行結果について車種間でのドライバー運転行動の違いを相対的に比較するため、Fig. 8に示すドライバー-車両モデルを用いて評価を実施する。先行研究においてドライバーパラメータ τ_L の値が大きいほどドライバーはゆったりと余裕を持って運転できていることが知られている⁽⁴⁾。

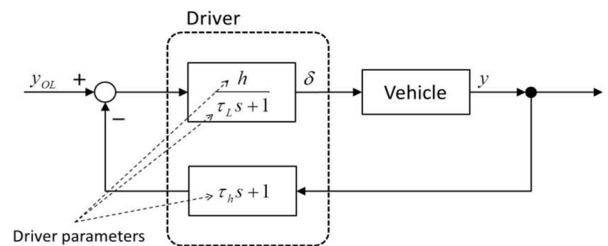


Fig. 8 Driver-Vehicle Closed Loop Model

ここで、 h はドライバーゲイン、 τ_L はドライバー遅れ時間、 τ_h はドライバー前方予見時間を表し、 y_{OL} は目標軌跡（横変位）、 y は車両の実走行軌跡、 δ_h はドライバーの操舵角を表す。実車実験の y 、 δ_h の計測値とモデル計算値の誤差が最小となるように、パラメーター h 、 τ_L 、 τ_h を同定する。

τ_L を同定した結果をFig. 9に示す。GVC Plus なしに比べて、GVC Plusありの車両では τ_L がおよそ0.013 sec大きくなっており、ドライバーが余裕を持って運転操作できていることが分かる。

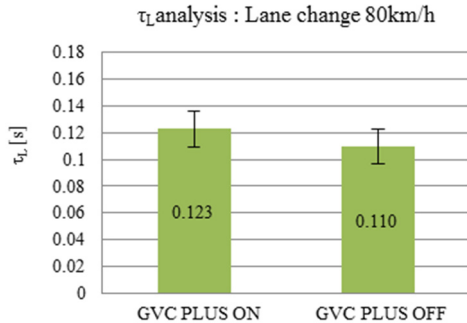


Fig. 9 Identification Result of Driver Parameter τ_L

実際のドライバーの官能評価でも、GVC Plusありの方が操舵後半の車両挙動の繋がりが良く安定性が上がるため、楽にレーンチェンジできると感じており、 τ_L の分析結果と一致する。

4.3 車両限界性能の評価

次に、Fig. 10に示すコースでCX-5を用いてダブルレーンチェンジ時の最大通過車速（区間平均）を評価した。ドライバーによる操舵、加減速の運転操作は任意とし、コース上の光電管で通過車速を計測した。

制御仕様は前後減速度制御Gxc とDSCは常時制御ありとし、直接ヨーモーメント制御Mzcの有無を比較評価した。この時の操舵角、車速、制御要求量、ヨーレート、横加速度の時系列データをFig. 11に示す。

通常のDSC制御による車両安定化効果に加えて、GVC PLUS が付加されることによって、車両の収斂性が向上し、ダブルレーンチェンジの最高通過車速（区間平均）が4.45km/h向上した。

5. 車両機械特性での制御効果

次に、前述のGVC Plusによるドライバーの運転操作負担低減効果が、人間の影響を排除した車両の機械特性（開ループ）として見た場合に、どのような車両挙動変化に起因して生じたのかを明らかにする。

5.1 車両への操作入力

ドライバーの操作ばらつきを排除するために、自動操舵装置とアクセル開度一定制御を併用し、車両への入力を揃えた。

操舵入力にはドライバー操舵によるレーンチェンジ試験のデータを基にFig. 12に示すような自動操舵入力波形を設定し、車速は進入車速のばらつきを81km/h±0.2km/h

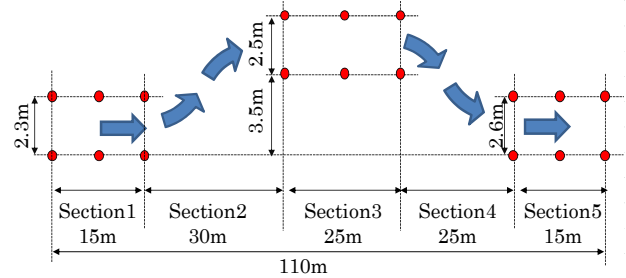


Fig. 10 Double Lane Change Course

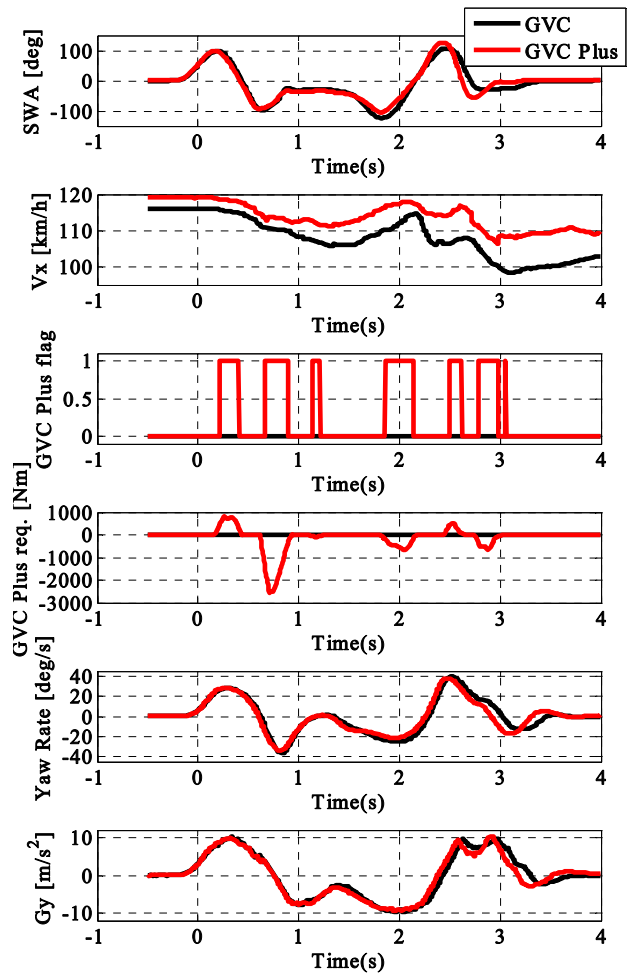


Fig. 11 Double Lane Change Test Result

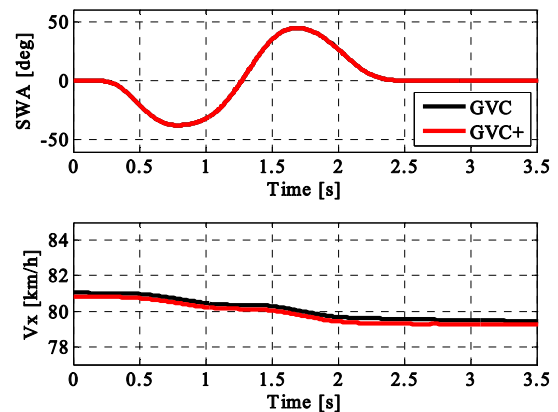


Fig. 12 Vehicle Input for Open Loop Test

以内とし、その後はアクセル開度を固定した。以降に示す結果はアクセラを用いた右レーンチェンジの走行データである。

5.2 車両平面運動の改善効果

車両平面運動の改善効果として、まず操舵角に対するヨーレートのリサージュをFig. 13に示す。

GVC Plus によって1次操舵を戻す時のヨーレートの応答遅れがわずかに低減している。

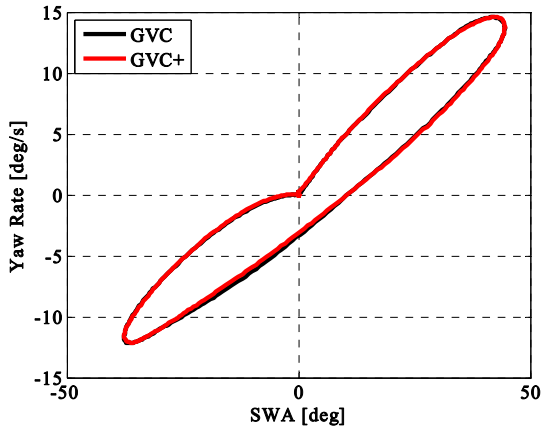


Fig. 13 Vehicle Planar Motion (Yaw Rate Response)

次に、前後加速度と横加速度の時系列データとリサージュ (G-G diagram) をFig. 14に示す。前後加速度は正の符号が加速方向を示す。

1次操舵の戻し操舵と2次操舵の戻し操舵の区間で、GVC Plusが旋回前外輪を制動することによって車体減速度が最大0.05m/s²程度発生し、結果として前後加速度の揺り返しが抑えられている。これにより、G-Vectoring制御 (操舵切り込み時のエンジン減速度制御) だけでは実現できなかった切り戻し操作時のGの繋がりも同時に改善している。

5.3 車両ばね上旋回姿勢の改善効果

次に、3次元的な車体ばね上旋回姿勢の改善効果として、ピッチ角とロール角の時系列データとリサージュをFig. 15に示す。ピッチ角は正の符号が前下がりピッチを表す。

時系列データで見るとGVC Plusによって操舵を戻す際のピッチ角の揺り返しが小さくかつスムーズになり、結果的に遅れも少なくなる。リサージュ図で見ると、GVC Plusなしのピッチ角が不連続になっているのに対し、GVC Plusありはスムーズな下に凸の波形になっており、レーンチェンジ全区間で操舵入力に対するロール角とピッチ角の連係性が改善している。

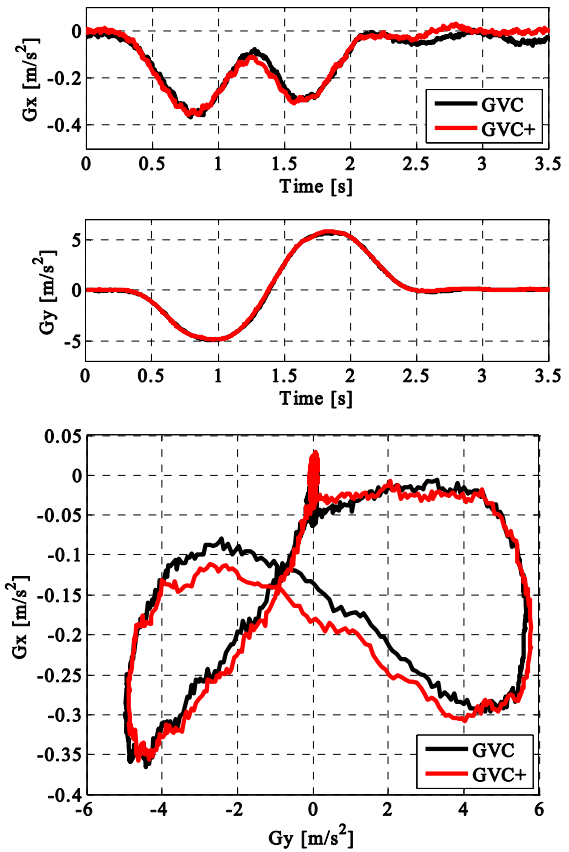


Fig. 14 Vehicle Planar Motion (G-G Diagram)

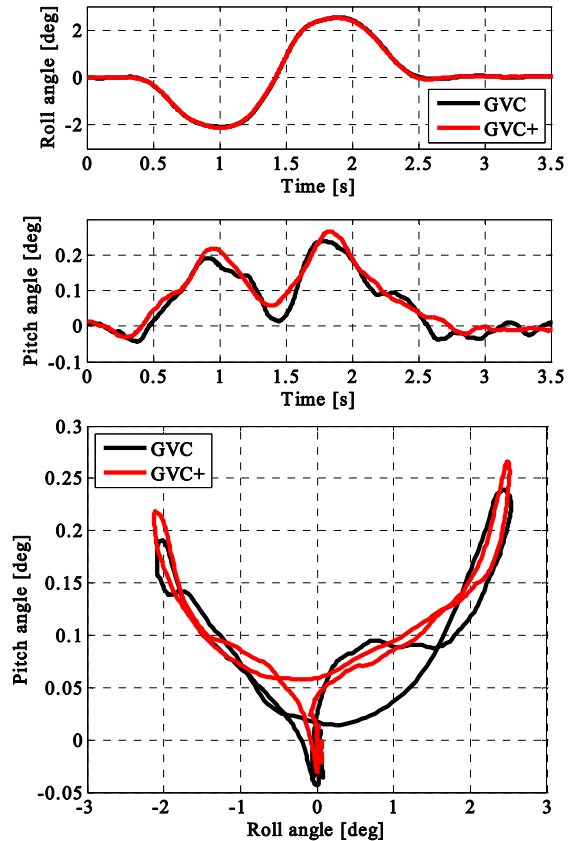


Fig. 15 Vehicle Body Attitude (Roll-Pitch response)

6. GVC Plus制御効果についての考察

ここまでの閉ループ評価と開ループ試験の結果から、GVC Plusによってドライバーが運転行動を変化させる要因は、車両機械特性として操舵角入力に対する車両平面運動（ヨー応答、前後G・横Gの繋がり）と車体ばね上旋回姿勢（ロール角・ピッチ角の繋がり）が改善することが主要因であると考ええる。

このことは、従来のGVC開発を通じて知られている、ごくわずかな車体姿勢制御や車両応答のリニアリティー改善が、閉ループでのドライバーの操作を大きく改善するという結果とも一致している。

今回新たに開発したGVC Plusではその機能を、ハンドルを切り戻すシーンや左右に切り返すつながりの部分にまで拡張することで、ドライバーにとって更に質感の高い車両挙動を実現することができたと考える。

7. まとめ

- ・横加加速度に基づく直接ヨーモーメント制御機能であるGVC Plusを、エンジン制御コントローラとブレーキ制御ユニットを用いて実現した。
- ・主な制御効果として、車両の安定性向上によりドライバーの操作負担が低減する。レーンチェンジ走行時のドライバー操舵負担が約20%低減し、ダブルレーンチェンジ限界走行時の最大通過車速が約4km/h向上する。
- ・GVC Plusによってドライバーの運転操作が好適となる要因は、車両平面運動のヨー応答の改善に加えて、前後加速度・横加速度の係数や、ばね上車両姿勢のピッチ角・ロール角の係数といった車両3軸6自由度運動の係数を微小な質感レベルまで改善しているためであると考ええる。

参考文献

- (1) 山門ほか：横運動に連係して加減速を制御する車両の運動特性に関する検討，学術講演会前刷集，No.8-08，pp.9-14 (2008)
- (2) 梅津ほか：高応答エンジンを用いた量産型G-Vectoring制御車両の開発，学術講演会講演予稿集，No54-16，pp.1310-1314 (2016)
- (3) 山門ほか：通常領域におけるブレーキDYCとG-Vectoring制御の比較検討，自動車技術会論文集，Vol.43，No.6，pp.1299-1305 (2012)
- (4) 安部：ドライバの車両運動性能評価の新たな視点（特集 走りの質感を追求する評価技術），自動車技術 Vol.69，pp.30-37 (2015)
- (5) 酒井ほか：視覚感受性に基づくロール感の向上，TOYOTA Technical Review，Vol.55，No.1，pp.20-25 (2006)

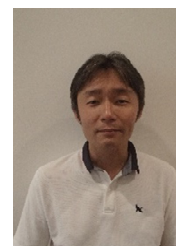
■ 著 者 ■



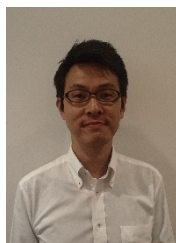
梅津 大輔



高原 康典



砂原 修



加藤 史律



津村 和典