

特集：MAZDA MX-30

03

エレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス (e-GVC Plus) の開発

Development of electric G-Vectoring Control Plus (e-GVC Plus)

梅津 大輔 ^{*1} Daisuke Umetsu	塚野 孝俊 ^{*2} Takatoshi Tsukano	小川 大策 ^{*3} Daisaku Ogawa
藪中 翔 ^{*4} Sho Yabunaka	加藤 史律 ^{*5} Fuminori Kato	

要約

MX-30 EV モデルに G-ベクタリング コントロール (GVC) を搭載した。GVC は車両の横加加速度に応じて、わずかな前後加速度を付与することで車両の運動性を高める。具体的には、ターンインの切り込み操舵に合わせて減速し、ターンアウトの切り戻し操舵に合わせて加速する。この切り戻し操舵における GVC を量産車に搭載するのは世界初であり、応答性に優れた電気モーターを用いて実現できた。電気モーターによる制駆動トルクを、走行状態に合わせて適切に付与する。今般、この GVC にブレーキを用いた直接ヨーモーメント制御を関係させた、エレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス (e-GVC Plus) を開発した。本稿では、まず e-GVC Plus の制御則及びシステム構成を紹介する。そして、前後と横加速度、及びロールとピッチが、e-GVC Plus によって滑らかに関係することを実測データで示す。さらに、ドライバーの運転行動へ及ぼす効果を検証した実験結果を紹介する。e-GVC Plus は視線を安定させ、操舵を緩やかにし、修正操舵を減少させることがわかった。

Abstract

G-Vectoring Control (GVC) is installed in MX-30 EV Model. The GVC is a method to control vehicle's longitudinal acceleration according to vehicle's lateral motion. By using electric motor torque, the GVC system is effective not only in a phase of turning in a corner but also in a phase of turning out. The GVC system for EV is called as electric G-Vectoring Control Plus (e-GVC Plus) which coordinates longitudinal and lateral acceleration, and roll and pitch motion. This vehicle dynamics control has beneficial effects on driving behaviors: it stabilizes driver's line of sight, provides mild steering, and reduces steering corrections.

Key words : Vehicle Dynamics, Driving Stability, Chassis Control, Electric Vehicle, Biomechanics

1. はじめに

車両の減速・旋回・加速といった各々の運動を滑らかに関係させることが、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向上させるために重要である。この車両の前後・横運動を関係させる技術として G-Vectoring Control (GVC) を、マツダは高応答な内燃エンジンによって実現した⁽¹⁾。2016 年に初めて量産車に搭載された GVC は、ドライバーの切り込み操舵によって発生する横加加速度に基づいて制動トルクを緻密に制御する。2018 年には、ブレーキユニットを用いて中高 G 旋回時の車両安定性を

向上する直接ヨーモーメント制御を備えた G-Vectoring Control Plus (GVC Plus)⁽²⁾へと進化した。

MX-30 EV モデルに搭載されたエレクトリック G-ベクタリング コントロール プラス (e-GVC Plus) は、内燃エンジンよりも高応答な電気モーターの制駆動トルクを制御し、ターンイン時の制動トルク制御に加えて、ターンアウト時に駆動トルクを制御することで、車両の横運動と前後運動を切れ目なく関係させる。

今般、e-GVC Plus を量産される電気自動車に初めて搭載した。その制御則とシステム構成を、本稿で説明する。そして、e-GVC Plus の有無で運転行動を比較し、e-GVC

*1,2,5 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*4 技術研究所
Technical Research Center

*3 電子基盤開発部
Electronic Platform Development Dept.

Plus の効果を検証した結果について報告する。

2. e-GVC Plus のシステム

2.1 e-GVC Plus の概要

e-GVC Plus の制御則は、式(1) と式(2) で示される。式(1) において、 G_{xc} は前後加速度の制御指令値、 G_y は横加速度、 \dot{G}_y は横加加速度、 C_{xya} は切り込み操舵時の制御ゲイン、 C_{xya} は切り戻し操舵時の制御ゲイン、 T は一次遅れ系の時定数をそれぞれ示す。 $G_y \cdot \dot{G}_y > 0$ 時は、高応答エンジンをを用いた GVC⁽¹⁾ と同様で、 $G_y \cdot \dot{G}_y < 0$ 時の加速制御は電気モーターを用いて初めて実現した。式(2) の制御則は GVC Plus⁽²⁾ と同様で、 M_{zc} はヨーモーメントの制御指令値、 C_m は制御ゲインをそれぞれ示す。式(1) の C_{xya} と C_{xya} 、式(2) の C_m は、エキスパートが綿密にチューニングした。

式(1) の GVC 制御則によって、Fig. 1 のようにドライバーの切り込み/切り戻し操舵のそれぞれに適した、制御ゲインを設定できる。これによりターンインからターンアウトまでシームレスに、適切な制駆動トルクを付与する。

$$\begin{cases} G_{xc} = -\frac{C_{xya}}{1+Ts} |\dot{G}_y| & (G_y \cdot \dot{G}_y > 0) \\ G_{xc} = 0 & (G_y \cdot \dot{G}_y = 0) \\ G_{xc} = \frac{C_{xya}}{1+Ts} |\dot{G}_y| & (G_y \cdot \dot{G}_y < 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{zc} = \frac{C_m}{1+Ts} \dot{G}_y & (G_y \cdot \dot{G}_y < 0) \\ M_{zc} = 0 & (G_y \cdot \dot{G}_y \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

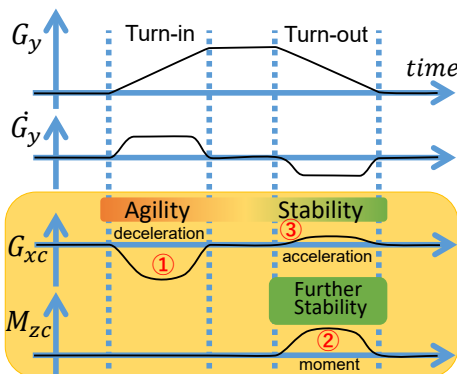


Fig. 1 Time Series Behavior of Motion Control Concept

Fig. 1 における①のターンイン時に減速する GVC は、2017 年に報告⁽¹⁾ しており、この①に②の直接モーメン

ト制御を加えた GVC Plus は、2019 年に報告⁽²⁾ した。本稿では、③のターンアウト時に加速する制御を加えた e-GVC Plus について報告する。なお、②は横加加速度が大きい領域で作動する。

2.2 電気モーターを用いたシステムの構成と車両運動

MX-30 EV モデルは前輪駆動車であり、電気モーターによって生じる前輪の制駆動トルクを制御して GVC を実現し、ターンアウト時は、ブレーキユニットを用いた直接ヨーモーメント制御によって安定性を向上する。このシステム構成を Fig. 2 に示す。

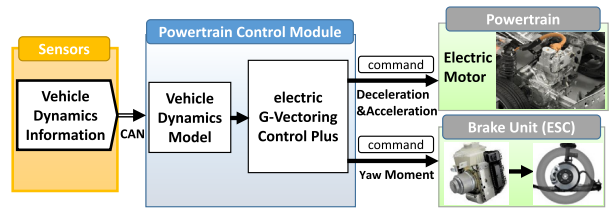


Fig. 2 Motion Control System

実例として、実測した車両運動と制御信号を Fig. 3 と Fig. 4 にそれぞれ示す。80[km/h] の一定速でシングルレーンチェンジを行った結果を Fig. 3 に示す。操舵角 (SWA) に応じて、横加速度 G_y と横加加速度 \dot{G}_y が発生する。これら横加速度と横加加速度の積で、制御指令値の正負が、式(1) と式(2) のとおり決まる。

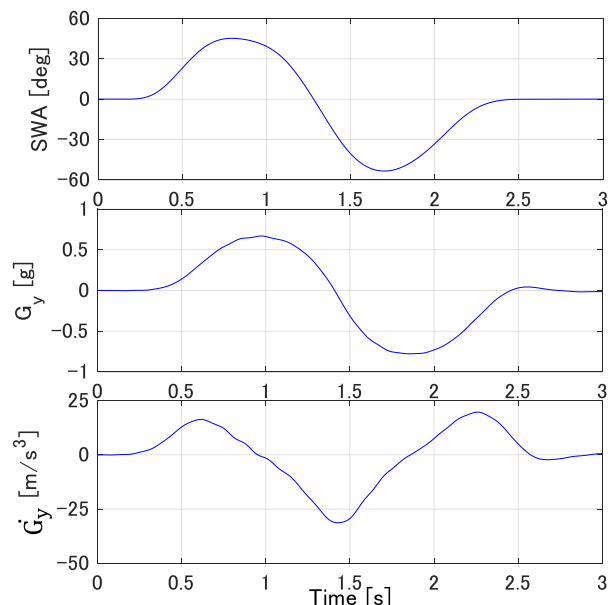


Fig. 3 Time Histories of Vehicle Motions during Lane Change

Fig. 3 に示した横加加速度 \dot{G}_y に合わせて、式(1) と式(2) に従い制御指令値の大きさが決まる。実際の制御指令値を Fig. 4 に示す。GVC req. は電気モーターに指令する制駆動トルク、M+req. は直接ヨーモーメント制御の指令値である。

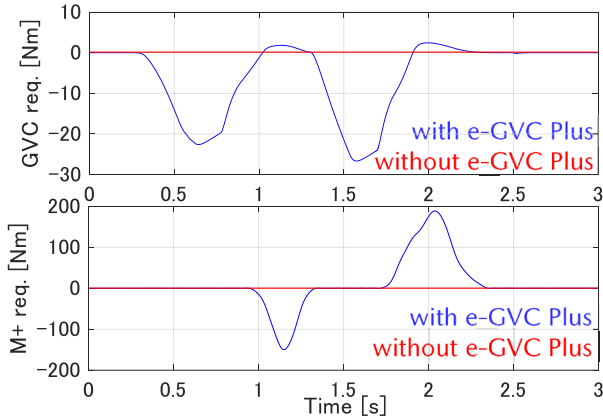


Fig. 4 Time Histories of Control Signals during Lane Change

Fig. 4においてGVC req. が減速側の絶対値が大きく、加速側の絶対値が小さいのは、式(1)のGVC制御則における C_{xyd} と C_{xya} に異なる値を設定しているためである。路面や風圧等さまざまな要因で自然に発生する減速とは異なり、アクセルペダルの操作を伴わない加速はドライバーにとって違和感となるため、ドライバーの切り込み操舵における制御ゲイン C_{xyd} に対し、切り戻し操舵の制御ゲイン C_{xya} は1/10程度とした。このように切り戻し操舵時の加速は僅かであるが、フィーリングに及ぼす影響は大きく、後述するようにドライバーの視線や操舵を安定させる。

2.3 前後・横加速度及びロール・ピッチの連係

ここではe-GVC Plusの中で、式(1)を制御則とするGVCについて、車両の運動へ及ぼす効果を示す。自動操舵装置を用いたオープンループ試験で、GVC有無の2仕様において試験を実施した。試験モードは、車速50[km/h]以上まで加速した後にアクセルオフし、車速が50[km/h]になった瞬間にFig. 5の操舵角を自動操舵装置で与える走行モードとした。ヨーレートについてはGVCの有無で差がなく、操舵に対して同じように応答している。このような穏やかな操舵の走行では、Fig. 1における②の直接ヨーモーメント制御は作動せず、Fig. 1における①③の加減速制御のみ作動する。

直進から操舵角を切り込むターンイン、操舵角一定の旋回、そして直進状態に操舵角を切り戻すターンアウトを通じた走行モードで計測実験を行った。

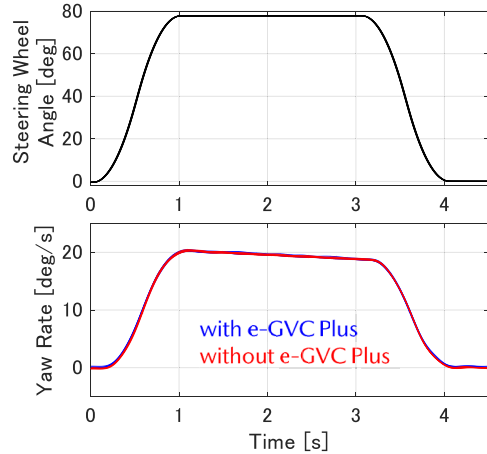


Fig. 5 Steering Wheel Angle and Yaw Rate

計測した前後加速度と横加速度をFig. 6に示す。前後加速度は、Fig. 1で示した制御コンセプトと対応して、GVCによって切り込み操舵時に減速し、切り戻し時に遅滞なく僅かに加速した。一方で、横加速度は、GVCの有無でほとんど差がなかった。

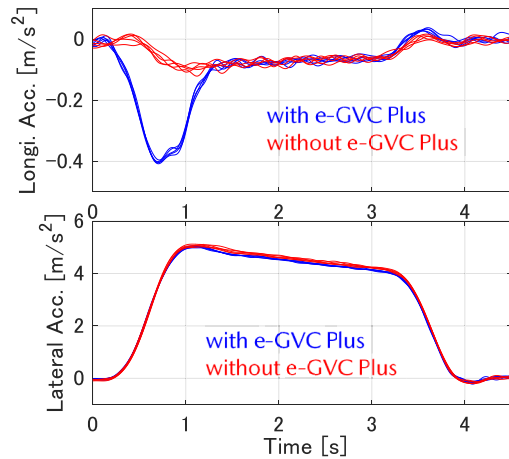


Fig. 6 Longitudinal and Lateral Acceleration

GVCなしの“g-g”ダイアグラムをFig. 7に、GVCありの“g-g”ダイアグラムをFig. 8に示す。Fig. 7の制御なしでは、前後加速度の変化が小さく、前後加速度と横加速度が不連続に折り返している。一方で、Fig. 8では加速度が滑らかにつながっている。また、ターンアウト時(Fig. 6では3秒から4秒の間)に、ごく僅かであるが加速している。ターンインからターンアウトまで前後加速度と横加速度が滑らかにつながる。

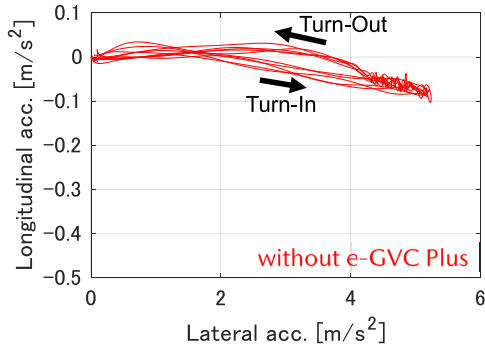


Fig. 7 Longitudinal Acc. vs Lateral Acc. without e-GVC Plus

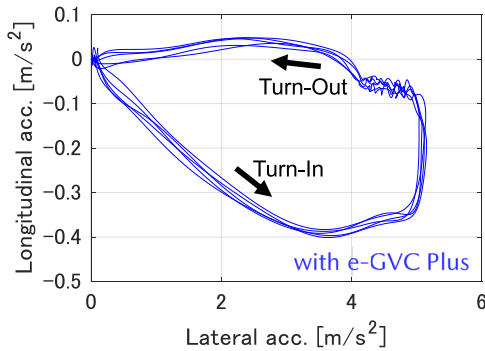


Fig. 8 Longitudinal Acc. vs Lateral Acc. with e-GVC Plus

次に、計測したロール角とピッチ角を Fig. 9 に示す。ロール角については、GVCの有無でほとんど差がなかった。一方で、ピッチ角については、前下がりとなるタイミングが GVC によって早まり、ピッチ角とロール角の時間差が小さくなった。

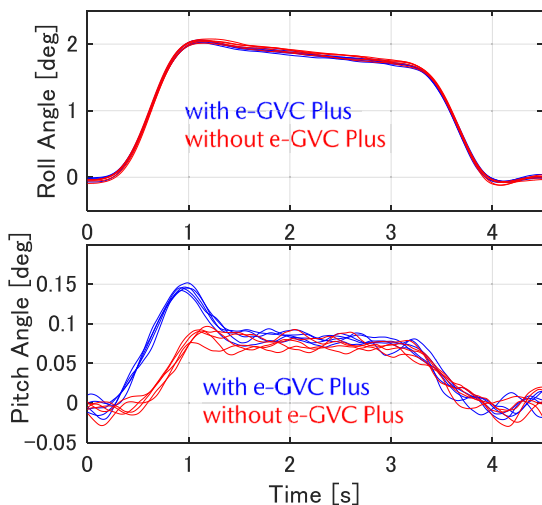


Fig. 9 Roll and Pitch Angle

このロール角とピッチ角の時間差が小さいと、官能評価が良好である⁽³⁾。また、切り込み操舵に合わせてピッチ角を付加することで、走行軌跡のバラツキを低減でき

る⁽⁴⁾。これらの観点から、人が評価する操縦安定性能にとって望ましい運動特性が GVC によって得られていると考えられる。

ロール角とピッチ角の関係について、GVC なしを Fig. 10 に、GVC ありを Fig. 11 に示す。GVC によって、切り込み操舵時にロール角とピッチ角が滑らかに連係する。

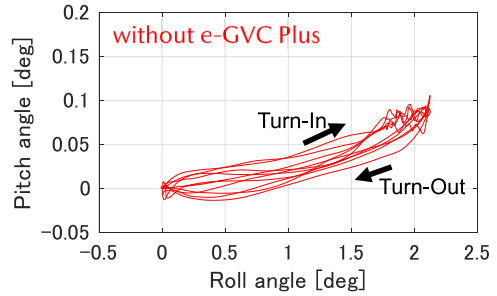


Fig. 10 Roll Angle vs Pitch Angle without e-GVC Plus

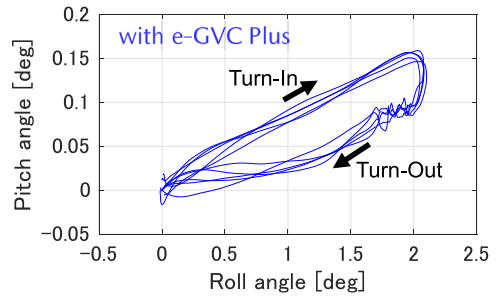


Fig. 11 Roll Angle vs Pitch Angle with e-GVC Plus

3. 人間 - 自動車系における e-GVC Plus の効果

3.1 コーナリング中の人の視線への効果

先行研究⁽⁵⁾は、人の歩行中の視線運動は最大ピッチ角速度が 3 [deg/sec] 程度であると報告している。同様に運転中も、ピッチ角速度が小さいと視線が安定しており、明瞭な視覚を保っていると考えられる。

そこで、1) GVC なし、2) 減速 GVC のみ、3) 加減速 GVC (e-GVC plus)、4) 加速ゲイン C_{xya} を減速ゲイン C_{xyd} と等しくした加速が過剰な GVC の各仕様について 5 試行ずつ計測した。車速 30 [km/h]、半径 15 [m] で 180 [deg] の旋回する走行モードにおいて視線のピッチ角速度を計測した結果を、Fig. 12 から Fig. 15 に記す。

なお、この走行モードでは、Fig. 1 における②の直接ヨーモーメント制御は作動しない。

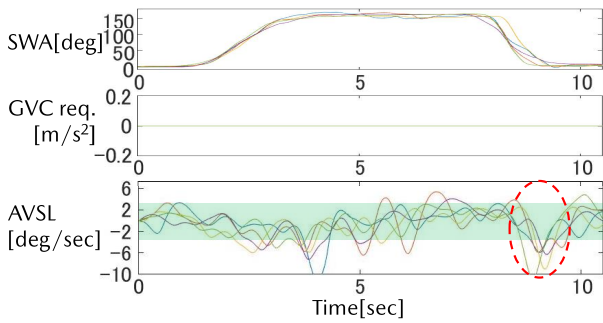


Fig. 12 Angular Velocity of Sight Line (AVSL) without GVC

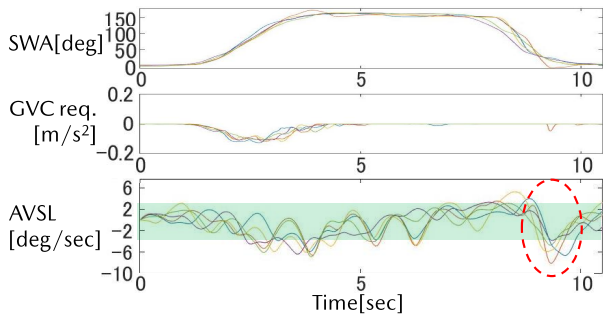


Fig. 13 Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration GVC

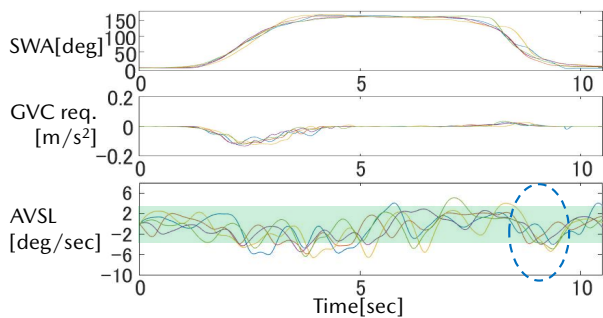


Fig. 14 Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration & Acceleration GVC

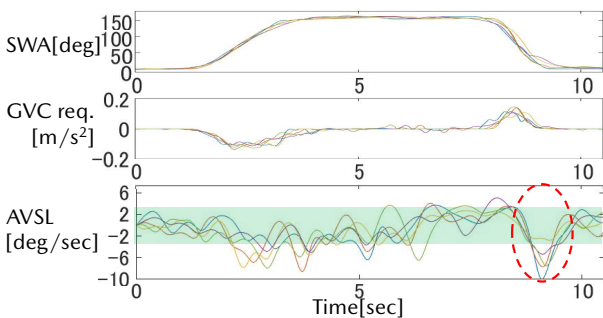


Fig. 15 Angular Velocity of Sight Line (AVSL) with Deceleration & Excess Acceleration GVC

MX-30 EV モデルに搭載された e-GVC Plus と同じ設定の GVC を行う Fig. 14 の結果のみ、ターンアウト時に視線のピッチ角速度が小さいことがわかる。このように、

適切な設定の GVC は、人の負担を軽減する。なお、視線に加え、GVC によって頭部と胸郭が連動して動くことが観測されており、詳細は文献⁽⁶⁾に示す。

3.2 レーンチェンジ中の操舵行動への効果

3.1 では緩やかなコーナリング中の視線について分析した。本節では、操舵行動について分析する。ダブルレーンチェンジモードで、時系列の操舵角変化を比較する。約 50[km/h] の車速で進入しアクセルオフで操舵のみを行う、ダブルレーンチェンジ試験を行った。ISO 3888-2 に準じてレーンチェンジコースを設定し、進入路は車幅×1.1+0.25[m] と狭く設定した。これにより、操舵の開始タイミングが制限される。e-GVC Plus 有無の 2 仕様について比較する。なお、この走行モードにおいては、Fig. 1 における①②③全ての制御が作動する。

脱出速度が近いものを、e-GVC Plus の有無で其々選び、時系列の車両運動を Fig. 16~18 で比較する。まず、Fig. 16 に車速と操舵角を示す。脱出車速は、e-GVC Plus の有無で同じであるが、進入車速は e-GVC Plus があると速い。しかしながら、より緩やかに余裕をもった操舵が、e-GVC Plus によってできている。

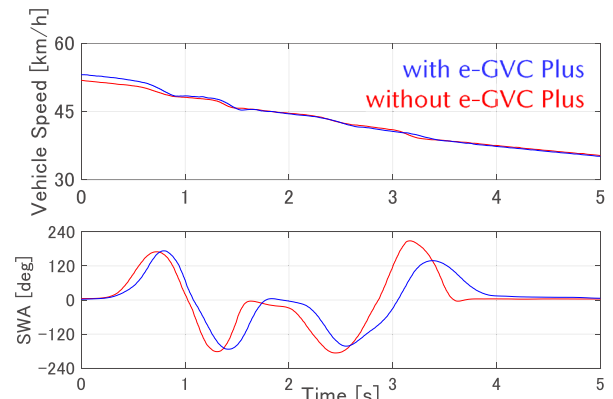


Fig. 16 Vehicle Speed and Steering Wheel Angle

e-GVC Plus によって、ロール角に同期した前下がり of ピッチ角が発生し、先行研究⁽⁷⁾からドライバーのヨー認識が強調されると考えられる。そして、e-GVC Plus があると「操舵に対する応答がよい」とドライバーはコメントし、Fig. 16 のように緩やかに最大舵角まで操舵している。一方で e-GVC Plus がないと、操舵速度を速めて切り増している。この操舵行動について、ドライバーは「操舵初期の応答が足りないと感じて切り増した」とコメントした。このような GVC による切り込み操舵の変容は、先行研究⁽¹⁾でも観測されている。レーンチェンジの後半についても、e-GVC Plus があると、操舵角の絶対値が小さく滑らかである。

Fig. 16 において、e-GVC Plus がないと操舵の完了が早いのが、この時点で Fig. 17 のヨーレートは収束しておらず、車両運動が収束するタイミングは、e-GVC Plus の有

無で変わらない。e-GVC Plus がないと、直進に戻る際に車両運動の収まりが悪く、ヨーレートが揺らぎ、収束に時間を要する。

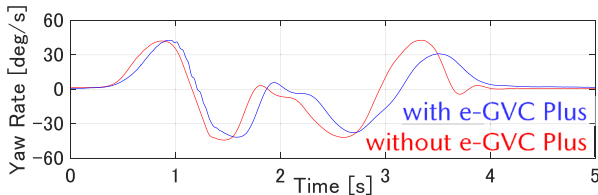


Fig. 17 Yaw Rate

Fig. 18 には、前後加速度と横加速度を示した。まず、e-GVC Plus があると、操舵初期に早く減速し、その後も横加速度の変容に沿って、前後加速度が生じる。横加速度の立ち上がりで、e-GVC Plus があると大きく減速するが、切り戻し操舵では加速するゆえ、車速低下は抑えられている。また、ヨーレートと同様に、e-GVC Plus があると横加速度は穏やかに収まる。

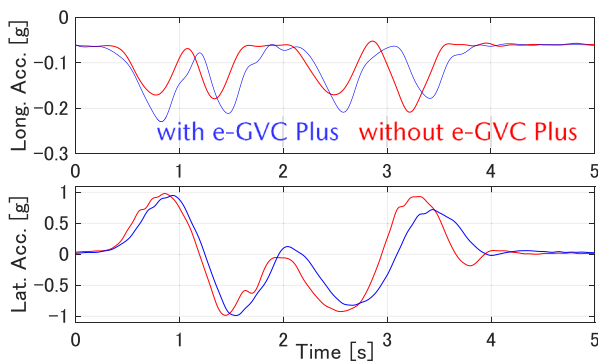


Fig. 18 Longitudinal and Lateral Acceleration

3.3 ワインディングコースにおける修正操舵の低減効果

ドライバーがペダル操作で 50[km/h] の一定速を保ち、コーナーが連続したワインディング路を走行し、操舵角を計測した。計測した操舵角を Fig. 19 に示す。1 周 200 秒のコースを 2 周走行したデータである。制御なし、減速 GVC のみ、と加減速 GVC (e-GVC plus) の 3 仕様でほとんど同じように走行している。

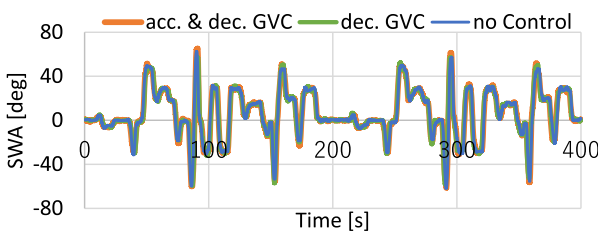


Fig. 19 Steering Wheel Angle Behavior on Winding Course

Fig. 19 で示した時系列の操舵角データについて、ドライバー負担を評価するステアリングエントロピー法⁽⁸⁾を適用した。ステアリングエントロピーが小さいと、時系列の操舵角がスムーズに推移し、いわゆる修正操舵が少ない。制御なし、減速 GVC のみ、と加減速 GVC の 3 仕様について比較した結果を Fig. 20 に示す。まず、減速 GVC によって修正操舵が減り、更に加速 GVC が加わることで更に修正操舵が減少することが分かる。

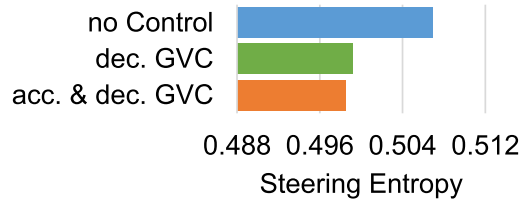


Fig. 20 Steering Entropy

Fig. 19 に示したワインディング路走行中の操舵角について、155 秒から 175 秒に絞った時系列グラフを Fig. 21 に示す。制御なし (青線) は舵角変化の曲率が大きく、ドライバーが急峻に操舵角を変えていることが分かる。一方で、減速 GVC のみ (緑線) や加減速 GVC (橙線) は、舵角変化の曲率が小さく滑らかに操舵している。161 秒や 169 秒辺りの切り戻しに注目すると、減速 GVC のみ (緑線) よりも、加減速 GVC (橙線) は緩やかに切り戻していることが分かる。このような時系列でみた操舵角のスムーズさが、Fig. 20 のステアリングエントロピーに表れており、加減速 GVC の実験仕様が一番ステアリングエントロピーが小さく、修正操舵が少なかったと考えられる。

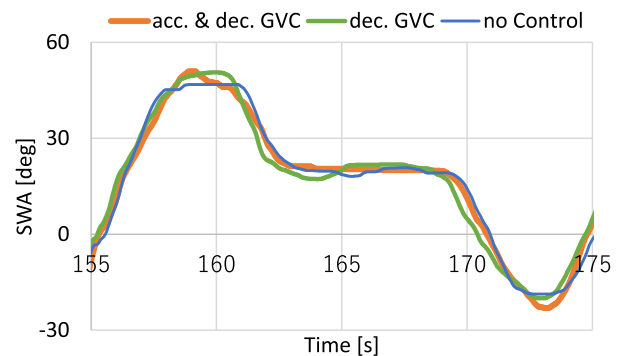


Fig. 21 Steering Wheel Angle Behavior (155-175 sec.)

4. まとめ

高応答エンジンを用いた GVC⁽¹⁾ に直接ヨーモーメント制御を加えた GVC Plus⁽²⁾ から、更に高応答な電気モーターを活用して切り戻し操舵時の加速制御を加えた e-GVC Plus を MX-30 EV モデルで初めて実現した。

電気モーターという高応答なアクチュエータを用いた GVC によって得られる前後、横加速度や、ロール・ピッチなどの車体姿勢角が滑らかに連係する運動特性は、

ターンインからターンアウトを通してドライバーの視線を安定させ、操舵を滑らかにし、修正操舵を減少させることが分かった。この制御効果により、雪上のレーンチェンジ走行においても Fig. 22 に示すように挙動の収束性に優れた運動特性が得られた。

以上の結果は、日常域の微小な挙動から高G旋回まで、幅広いシーンにおいて、ドライバーとしての人の特性に合致した心地よい運動特性を追求した制御開発の結果と考える。マツダは今後も、人にとってより制御しやすい車両運動のあり方を追求し、運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能のさらなる質感向上に取り組んでいく。

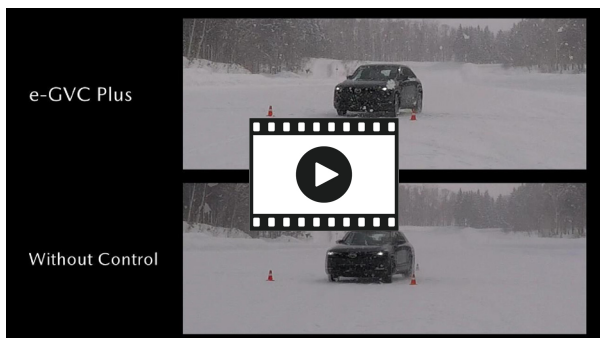


Fig. 22 Lane Change on Snow-covered Ground

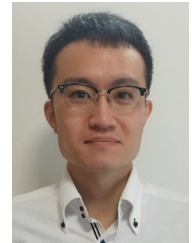
■著者■



梅津 大輔



塚野 孝俊



小川 大策



藪中 翔



加藤 史律

参考文献

- (1) 梅津ほか：G-Vectoring Control の開発, [マツダ技報, No.34, pp.99-104 \(2017\)](#)
- (2) 梅津ほか：G-Vectoring Control Plus の開発, [マツダ技報, No.36, pp.235-240 \(2019\)](#)
- (3) 山本ほか：視覚・動揺感受性に基づく操舵過渡応答性能の向上(第2報)ーロール感の解析ー, 自動車技術会前刷集, No.10-06, pp.5-9 (2006)
- (4) 田尾ほか：微小操舵域のライトレースのバラツキを低減するピッチ特性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.52, No.2, pp.286-292 (2021)
- (5) Grossman, G. E. et al.: Performance of the human vestibuloocular reflex during locomotion, J. Neurophysiol, vol.62, pp.264-272 (1989)
- (6) 藪中ほか：G-Vectoring 制御が人の視線や身体挙動に与える効果に関する分析, 自動車技術会 2020 年春季大会 学術講演会 講演予稿集, No.12-21, pp.1-6 (2021)
- (7) 酒井ほか：過渡的な旋回感覚を強調する減衰力制御ーカルマンフィルタを用いたロール・ピッチ同期化制御ー, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 3, pp. 709-716 (2012)
- (8) 中山ほか：運転者負荷定量化手法「ステアリングエントロピ法」の開発, 自動車技術会前刷集, No.45-99, pp.5-8 (1999)