

# ピッチ挙動に着目した旋回感向上

Enhancement of Feeling in Turn Focusing on Pitching Behavior

大久保 直 人<sup>1</sup>

Naoto OHKUBO

## 要 旨

一般ドライバに日常的な運転における自然な旋回感を提供するため、横運動に連係した加減速の制御において、操舵で生じるピッチ挙動を調整する手法を検討した。操舵周波数の2倍となるピッチ角応答の特徴を考慮し、旋回中の違和感を低減する制御則を考案した。シミュレーションにより制御則と制御量の効果を検証し、ロール挙動への影響なくピッチ挙動の発生タイミングを調整できることを確認した。次に、実車テストにより、シミュレーション同様の車両挙動が発生していることを確認した。また、官能評価により、旋回感の向上に効果があることと、制御の強さには適値があることもわかった。

## ABSTRACT

In order to provide a natural feeling in turn for general drivers in daily driving, a method was examined for adjusting the pitching behavior produced by steering in control of acceleration and deceleration linked with lateral motion. In consideration of the characteristic that the pitch angle response is twice the steering frequency, a control law was devised to reduce unnatural feeling in turn. The effect of the control law and the controlled variable was verified by simulation, and it was confirmed that the timing at which the pitching behavior occurs can be adjusted without impacting the rolling behavior. Next, actual vehicle tests were conducted, and the vehicle behavior was confirmed to be similar to that in the simulation. In addition, sensory evaluation showed that the method is effective in enhancing the feeling in turn, and that there is an appropriate value for the control strength.

## 1. まえがき

車両運動性能を向上するため、数多くの制御デバイスがシャシー領域に適用されている。代表例として、低車速での取り回し性と高車速での安定性の向上を図る前輪や後輪の舵角の制御<sup>(1), (2)</sup>、急ブレーキ時にタイヤのロックを防ぐABS制御、制駆動力の左右配分によるヨーモーメントの制御<sup>(3), (4)</sup>などがあり、スタビリティや応答性を高めてきた。

ブレーキによる制御では、ヨーモーメント制御が標準装備化されたことによりスタビリティ性能が高まり、緊急回避以外にも様々な領域に適用が広がっている<sup>(5), (6)</sup>。しかし、ブレーキデバイスの使用頻度を高めると耐久性や静粛性などへの考慮も必要となるため、一般ドライバが日常的に使う運転領域 (Fig. 1) にはあまり適用されてこなかった。

パワープラントによる制御では、旋回中に加減速すると前後輪間の荷重移動によるヨーモーメントが発生すること

が知られており<sup>(7)</sup>、横運動に連係した加減速の制御<sup>(8)</sup>により、旋回動作を支援して「滑らかなGのつながり」を実現することで、日常の運転領域における運転の楽しさと安心感を提供する技術<sup>(9)</sup>が報告されている。

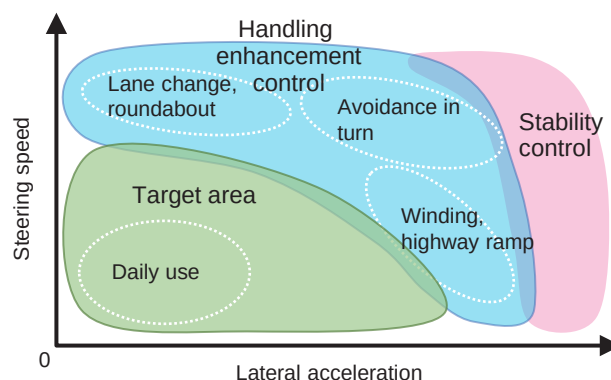


Fig. 1 Target scene

<sup>1</sup> 本田技研工業株式会社

E-mail: naoto\_ohkubo@jp.honda

パワープラントの電動化により、モータの応答性のよさを利用した車両運動制御の適用範囲が拡がりつつある。そのため、制御介入による違和感への配慮も必要となる。

また、旋回中にはヨー挙動ロール挙動とともにピッチ挙動も発生し、ロールとピッチの挙動の時間差が旋回感覚に影響するという報告もある<sup>(10)</sup>。

そこで、本研究では、ドライバのハンドル操作に対し違和感なく旋回する感覚を「旋回感」と定義し、前述の横運動に連係した加減速制御技術において、旋回中のピッチ挙動に着目して旋回感を向上させ、かつ制御介入による違和感を低減する手法を検討した。

## 2. 操舵によって発生するピッチ運動

旋回中に加減速があると前後輪間の荷重移動が発生し、ヨーモーメント<sup>(7)</sup>が発生することが知られている。横運動に連係した前後力制御においては、減速側前後力により旋回を促進するヨーモーメントが発生するが、同時にピッチモーメントも発生するため、ピッチ挙動にも寄与する。

ここで、Fig. 2 に周期操舵時の横加速度とロール角、ピッチ角の応答の例を示す。横加速度やロール角は左右の操舵方向に対して対称に応答するのに対して、ピッチ角は操舵方向に依存しない応答をし、ピッチ角の応答周波数が操舵周波数の2倍になる特徴があることがわかる。

そこで、ピッチ挙動の位相を前後力制御で調整することでロールとピッチの挙動の時間差を調整できれば旋回感の向上に有効であると考えた。

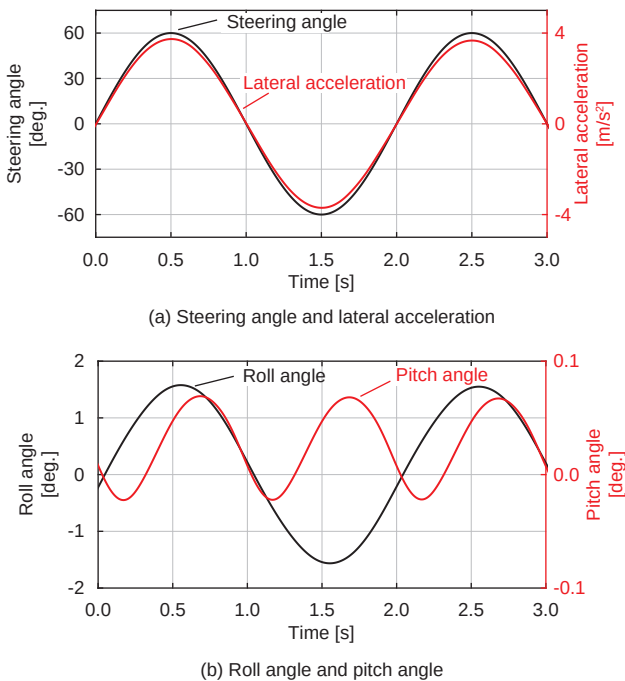


Fig. 2 Example of vehicle motion during sinusoidal steering input

## 3. 旋回感向上制御

### 3.1. ピッチ運動のモデル化

ピッチ挙動の位相を前後力制御で調整する制御をおこなうためにはピッチ運動の特徴を制御則に組み込むことが求められるが、ピッチ運動を考慮しようとする車両モデルは複雑になる。

そこで、最小限のモデルで前述のピッチ運動の特徴を再現する近似式を導出し、その近似式に基づく制御則を検討した。

まず、操舵によって発生するピッチ運動を整理すると、式(1)となる。

$$I_Y \ddot{\theta} = -hF_x + M_{YJ} + M_{YS} \quad (1)$$

ここで、式(1)右辺の  $F_x$  は前後力、そして、 $M_{YJ}$  と  $M_{YS}$  はそれぞれジャッキアップ力とサスペンションによって発生するピッチモーメントである。ピッチモーメントはFig. 3に示すように前下がりが方向が正で、操舵とピッチ運動に寄与の小さいジャイロモーメント、タイヤ縦バネ剛性、バネ下重量、アンチダイブ・リフト・スクワットは無視した。

前後力  $F_x$  は車体  $x$  軸方向に作用する力であり、旋回によって発生する前後力のみを対象としている。操舵時は前輪の横力により発生するコーナリングドラッグが前後力  $F_x$  として作用するため、車体を減速させる方向に前後加速度が生じる。

横すべり角が微小なので、横力とコーナリングフォースは等しいとして扱うと、コーナリングドラッグによる前後力は、前輪コーナリングフォースと前輪舵角を用いて、式(2)のように書くことができる。

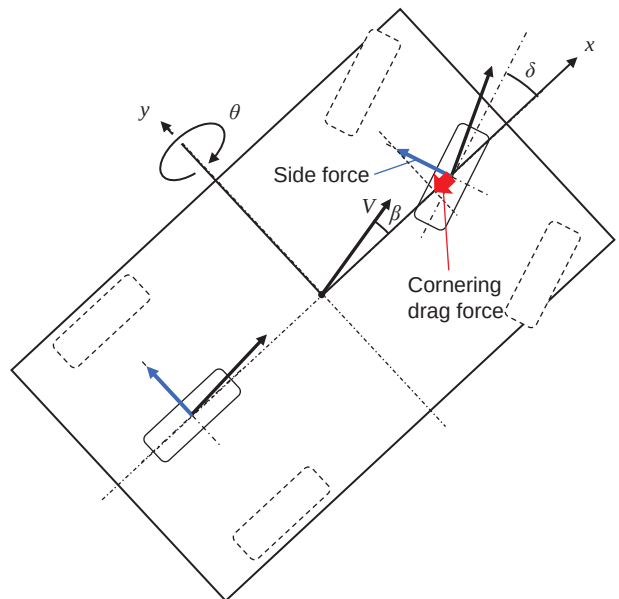


Fig. 3 Cornering drag force

$$F_x = -F_{Yf} \delta \quad (2)$$

前輪コーナリングフォースは、定常状態の横加速度  $Y_G$  を用いて簡潔に記述すると式 (3) となる。

$$F_{Yf} = \frac{l_r}{l} m Y_G \quad (3)$$

そして、式 (2) に式 (3) を代入すると、コーナリングドラッグは、式 (4) となる。

$$F_x = -\frac{l_r}{l} m Y_G \delta \quad (4)$$

ここで、前輪舵角に対する横加速度ゲイン  $G_Y$  とすると、式 (4) は式 (5) ととも記述できる。

$$F_x = -\frac{l_r}{l} m G_Y \delta^2 \quad (5)$$

式 (5) より、コーナリングドラッグは前輪舵角の 2 乗に比例するため、操舵方向に依存せず、かつ応答周波数が操舵周波数の 2 倍となる。この特徴は Fig. 2 に示したピッチ運動の特徴と一致する。

次に、式 (1) 右辺第 2 項のジャッキアップ力によって発生するピッチモーメント  $M_{Yf}$  は、ロールセンター高、トレッド、重心高、コーナリングフォースなどを用いて、式 (6) と表せる。

$$M_{Yf} = 2 \frac{h}{mg} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f F_{Yf}^2 + h_r F_{Yr}^2 \right) \quad (6)$$

ここで、式 (3) 同様に後輪コーナリングフォースを求め、それらを式 (6) に代入すると式 (7) となる。

$$M_{Yf} = 2 \frac{mh}{g} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f \frac{l_r}{l} + h_r \frac{l_r}{l} \right) Y_G^2 \quad (7)$$

式 (7) より、ジャッキアップ力によって発生するピッチモーメントは、横加速度の 2 乗に応じて発生する。また、式 (5) と同様に前輪舵角に対する横加速度ゲイン  $G_Y$  を用いると、式 (7) は式 (8) ととも記述できる。

$$M_{Yf} = 2 \frac{mh}{g} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f \frac{l_r}{l} + h_r \frac{l_r}{l} \right) (G_Y \delta)^2 \quad (8)$$

式 (8) も前輪舵角の 2 乗に比例するため、ジャッキアップ力によって発生するピッチモーメントもピッチ運動の特徴と一致する。

式 (1) 右辺第 3 項のサスペンションによって発生するピッチモーメント  $M_{Ys}$  は、サスペンションのピッチ減衰係数とピッチ剛性を用いて式 (9) と表せる。

$$M_{Ys} = -C_\theta \dot{\theta} - K_\theta \theta \quad (9)$$

したがって、操舵とピッチ運動との基本的な関係は、式 (1) に近似式 (4)、(7)、(9) を代入すると式 (10) が得られる。

$$I_Y \ddot{\theta} = h \frac{l_r}{l} m Y_G \delta + 2 \frac{mh}{g} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f \frac{l_r}{l} + h_r \frac{l_r}{l} \right) Y_G^2 \delta^2 - C_\theta \dot{\theta} - K_\theta \theta \quad (10)$$

式 (10) より、操舵によって発生するピッチ運動の特徴を簡易に表すことができる近似式が得られた。

### 3.2. 制御則の導出

次に、旋回感の向上には操舵入力に対するピッチ挙動の位相を前後力制御で調整できるようにすることが有効であると考え、前節で得られた近似式を用いて、Fig. 4 に示すようなターンインなどの切り増し操舵における挙動を対象に前下がりピッチ挙動を早める制御則を検討した。

式 (10) 右辺第 1 項は、コーナリングドラッグによって発生する前後力に比例するピッチモーメントである。この項を用いてピッチモーメントの位相を進められれば、Fig. 2 (b) に示したピッチ角応答の特徴を保持できるので、制御介入による違和感を低減しつつ旋回感を向上できると考えられる。

ピッチ挙動を早めるため、式 (10) 右辺第 1 項に時定数  $\tau_c$  で位相を進める項を追加すると、式 (11) が得られる。

$$I_Y \ddot{\theta} = h \frac{l_r}{l} m \left( Y_G \delta + \tau_c \frac{d}{dt} (Y_G \delta) \right) + 2 \frac{mh}{g} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f \frac{l_r}{l} + h_r \frac{l_r}{l} \right) Y_G^2 \delta^2 - C_\theta \dot{\theta} - K_\theta \theta \quad (11)$$

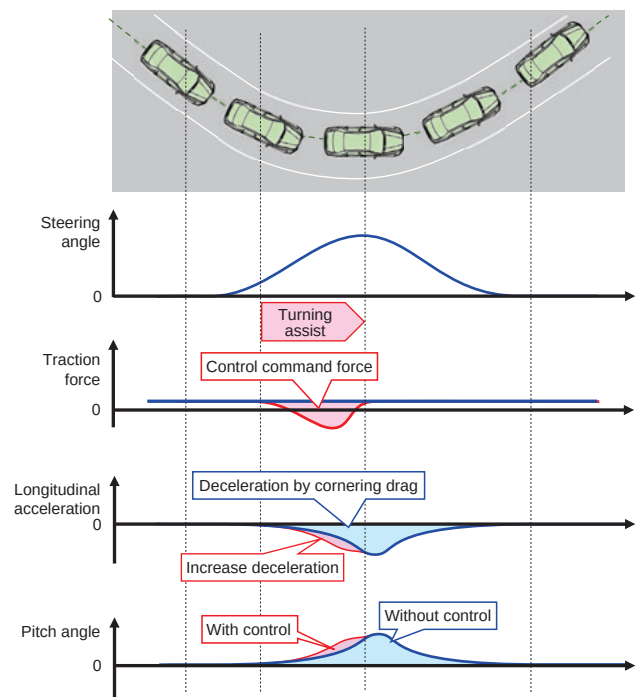


Fig. 4 Example of control law operation

一方で、前後力制御をおこなった場合のピッチ運動は、式 (10) に制御指令値  $F_{XC}$  によって発生するピッチモーメントが加算されるため、式 (12) となる。

$$I_Y \ddot{\theta} = h \frac{l_r}{l} m Y_G \delta + 2 \frac{mh}{g} \left( \frac{2}{T} \right)^2 \left( -h_f \frac{l_r}{l} + h_r \frac{l_r}{l} \right) Y_G^2 - C_\theta \dot{\theta} - K_\theta \theta - h F_{XC} \quad (12)$$

更に、式 (11) を式 (12) に代入して整理することにより、ピッチ挙動を早めるための制御指令値として式 (13) が得られた。

$$F_{XC} = -\frac{l_r}{l} m \tau_c \frac{d}{dt} (Y_G \delta) \quad (13)$$

式 (13) では横加速度と前輪舵角の積が微分されていることから、ピッチ位相を進める前後力は、切り増し操舵時は減速側に、切り戻し操舵時は加速側に作用する。この制御則ではターンイン時のピッチ挙動を早めることを対象としているため、式 (13) の制御指令値を切り増し操舵時の減速側でのみ作用するよう式 (14) とした。

$$F_{XC}' = \min \left( -\frac{l_r}{l} m \tau_c \frac{d}{dt} (Y_G \delta), 0 \right) \quad (14)$$

ここで、式 (14) の制御指令値は式 (5) を代入して、式 (15) とも記述できる。

$$F_{XC}' = \min \left( -\frac{l_r}{l} m \tau_c \frac{d}{dt} (G_Y \delta^2), 0 \right) \quad (15)$$

式 (15) 右辺には式 (5) と同様に前輪舵角の 2 乗の要素が含まれるため、制御指令値は操舵方向に依存せず、応答周波数が操舵周波数の 2 倍になることを示している。

以上より、時定数  $\tau_c$  を使ってターンイン時のピッチ挙動の位相を前後力制御によって調整する制御則ができた。

#### 4. シミュレーション結果

制御則の制御効果をシミュレーションで検証した。

シミュレーションで用いた車両モデルは、ばね上 6 自由度、ばね下各輪上下 4 自由度の 10 自由度モデルで、ロールセンター高、アンチダイブ角、アンチスクワット角によるジャッキアップを考慮、タイヤ特性はコーナリングパワーが荷重に線形な特性とした。

車両モデルには、D セグメントのハイブリット EV セダンの諸元値を使用した。制御指令値はホイールセンターでの前後力として車体を与えた。パワープラントの応答遅れは無駄時間として考慮した。

Fig. 5(a) に示すようにテストモードに車速 50 km/h での J ターンを用い、ターンイン時の制御動作と車両挙動を検証した。

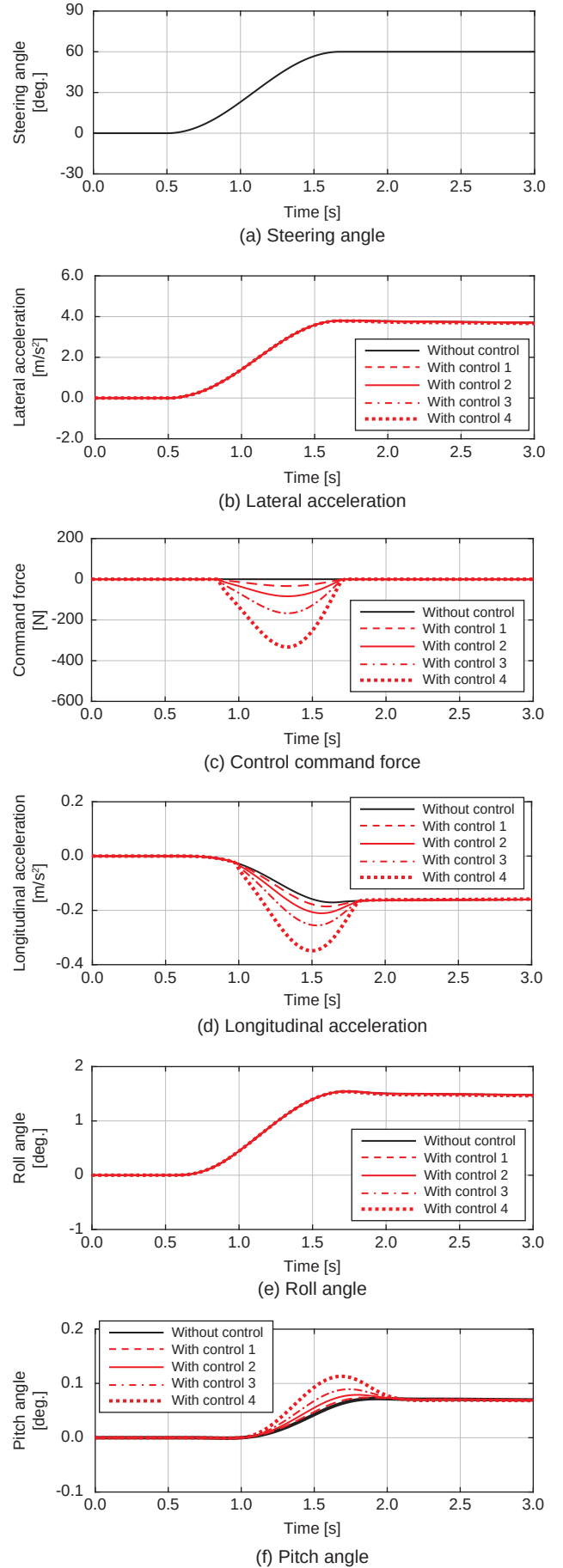


Fig. 5 Simulation results

制御効果を確認するため、制御なしと制御ありを比較した。制御ありの時定数 $\tau_c$ は、有意な差が観察された最も小さい値の案別1を基準とし、その値の2.5倍、5倍、10倍の4案別とした。

シミュレーション結果を Fig. 5 に示す。

制御指令値として前後力 Fig. 5(c) は、直進からの切り増し操舵時に出力され、時定数 $\tau_c$ が大きくなると制御指令値も大きくなった。

このとき、前後加速度 Fig. 5(d) は時定数 $\tau_c$ が大きくなるとともに立ち上がりが早くなりそのピークも大きくなった。

この時、ピッチ角 Fig. 5(f) も、前後加速度と同様の変化を示した。一方で、ロール角 Fig. 5(e) は影響を受けないことも確認できた。

これより、時定数 $\tau_c$ によって前後加速度とピッチ角が制御できることが確認できた。

## 5. 実車テスト結果

次に実車テストによる検証をおこなった。

テスト車両にはシミュレーション用車両モデルのベースとしたDセグメントのハイブリッドEVセダンを使用した。制御指令値は電動パワープラントシステムの駆動力の修正値として与えた。Fig. 6(a) に示すようにテストモードには車速 50 km/h でのJターンを用い、ターンイン時の制御動作と車両挙動を検証した。

計測ごとの操舵入力を合わせるためステアリングロボットを使って操舵し、ロール角とピッチ角は対地レーザー変位計を用いて計測した。

シミュレーション同様に、制御なしと制御ありを比較し、制御ありの時定数 $\tau_c$ も同じ案別を用いた。

実車テストの計測結果を Fig. 6 に示す。

直進からの切り増し操舵時に出力される制御指令値 Fig. 6(c) は、時定数 $\tau_c$ を変化させると、シミュレーションと同様に变化した。

前後加速度 Fig. 6(d) も同様に变化した。そして、ロール角 Fig. 6(e) についても、シミュレーションと同様に影響しないことを確認した。

これらの結果より、ピッチ角 Fig. 6(f) も同様に变化していると推測でき、制御指令値の大きな案別3、4についてはシミュレーションと同様に变化した。一方で、制御指令値の小さな案別1、2は、測定誤差の影響によりシミュレーションと同様の傾向とはならなかった。

次に、この制御の開発を担当したエキスパートドライバによる官能評価を実施した。制御なしに対して、時定数 $\tau_c$ を大きくしていくと旋回感の向上が確認できた。しかし、さらに大きくしていくと逆に違和感が増したことから、制御の強さには適値があることがわかった。

加えて、制御効果を検証するため、制御開発担当外の複

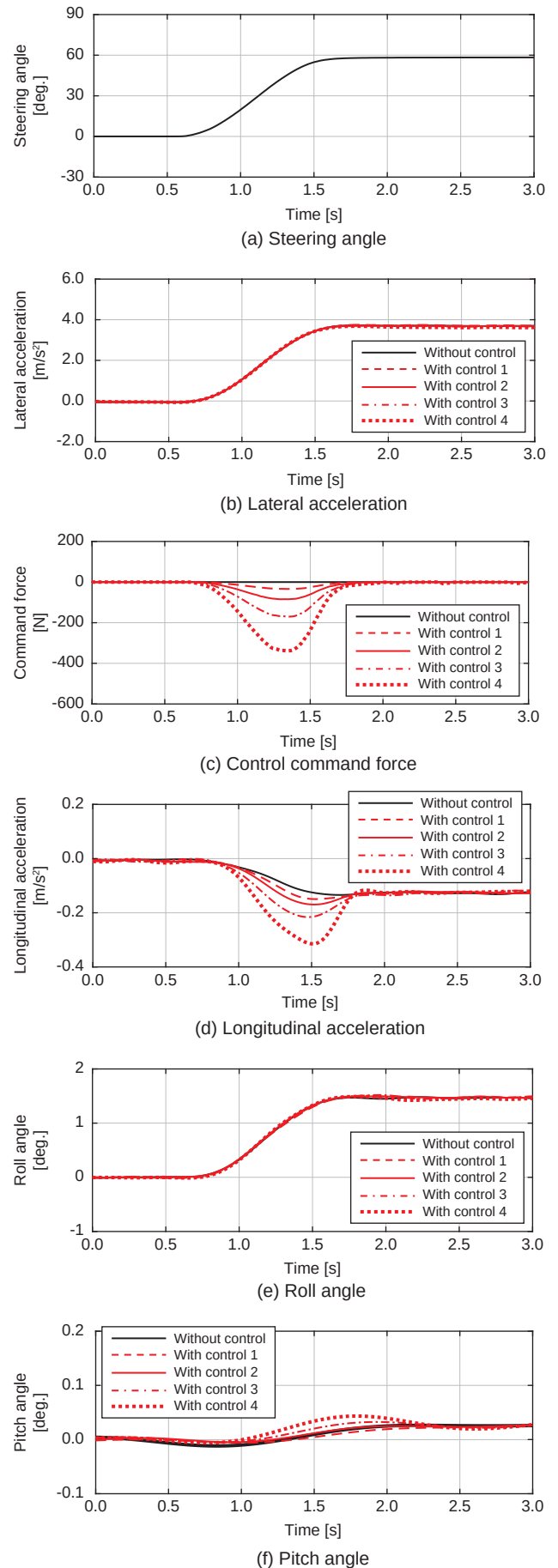


Fig. 6 Actual vehicle test results

数のテストドライバによる官能評価もおこなった。制御ありの時定数  $\tau_c$  の設定は、エキスパートドライバが適値と評価したもととした。その結果、制御ありは制御なしに対して旋回感が向上しているとのコメントが得られた。

以上より、考案した制御則による旋回感の向上効果は、ピッチ角で定量的に実証することはできなかったが、前後加速度の定量値と官能評価で効果を確認することができた。

## 6. まとめ

一般ドライバが日常的に使う運転領域における自然なピッチ挙動を伴う旋回感を提供するため、旋回中のピッチ挙動に着目して旋回感を向上させ、かつ制御介入による違和感を低減する手法を検討した。

- (1) 最小限のモデルで前述のピッチ運動の特徴を再現する近似式を考案し、その近似式に基づく制御則を検討した。
- (2) 操舵方向に依存せず、操舵周波数の2倍となるピッチ挙動の特徴を制御則に組み込み、ピッチ角応答の特徴を保持することで旋回中の違和感を低減する制御則を考案した。
- (3) ロール角への影響なくピッチ角の発生タイミングを調整できることをシミュレーションで効果を確認した。
- (4) 実車テストにおいてもシミュレーション同様の車両挙動が発生していることを確認した。
- (5) 複数ドライバによる実車を使った官能評価で、旋回感の向上に効果があることが示された。

## 参考文献

- (1) 阿部賢, 木幡高志, 川本善通, 野永郁生, 鶴宮修: 電子制御電動式四輪操舵システムについて, 自動車技術会学術講演会前刷集 No. 921-1, p.131-134, (1992)
- (2) 鈴木将人, 小城隆博, 松田守弘, 河室巡児, 福井勝彦, 菅原朋子: フロントステア制御システムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 34-03, p. 5-8, (2003)
- (3) 山本真規: 横すべり抑制のための車両安定性制御システム, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No. 96-02, p. 9-17, (1996)
- (4) 北村克弘, 芝端康二, 和田一浩, 本多健司, 桑原一好, 大熊真司, 梶原肇, 栗城信晴: ATTS の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 971, p. 13-16, (1997)
- (5) 鈴木達也, 保坂元明, 九十歩直照, 磯野洋一, 宮下直樹, 松本真次, 内藤原平: コーナリングスタビリティアシスト機能の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 27-10, p. 7-12, (2010)
- (6) 小島武志, 二村知幸, 大村一剛: Agile Handling Assist の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 26, No. 1, p. 46-54

- (7) 島田和彦, 芝端康二: ヨーモーメントによる車両の運動特性の評価について, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 933, p. 199-202, (1993)
- (8) 山門誠, 安部正人: 横運動に係して加減速を制御する車両の運動特性に関する検討 ―車両横運動を好適とする前後・横加速度連係 (G-Vectoring) 制御の提案―, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 8-08, p. 9-14, (2008)
- (9) 梅津大輔, 安部正人, 山門誠, 狩野芳郎, 高原康典, 加藤史律, 吉岡透, 砂原修, 高橋絢也: 高応答エンジンをういた量産型 G-Vectoring 制御車両の開発, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, p. 1310-1314, (2016)
- (10) 酒井英樹, 穂積仁, 山本泰, 佐野克幸, 富田晃市: 過渡的な旋回感覚を強調する減衰力制御 ～カルマンフィルタを用いたロール・ピッチ同期化制御～, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 145-11, p. 13-18, (2011)

## List of Symbols

|                 |                                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| $m$             | Vehicle mass                                             |
| $I_Y$           | Pitching moment of inertia around center of gravity      |
| $l$             | Wheelbase                                                |
| $l_f$           | Distance of front axle to center of gravity              |
| $l_r$           | Distance of rear axle to center of gravity               |
| $T$             | Track width                                              |
| $h$             | Center of gravity height                                 |
| $h_f$           | Front axle roll center height                            |
| $h_r$           | Rear axle roll center height                             |
| $C_\theta$      | Suspension pitch damping coefficient                     |
| $K_\theta$      | Suspension pitch stiffness                               |
| $F_{yf}$        | Front wheel cornering force                              |
| $F_{yr}$        | Rear wheel cornering force                               |
| $F_x$           | Longitudinal force                                       |
| $F_{xc}$        | Control command force                                    |
| $F_{xc}'$       | Control command force limited to deceleration side       |
| $M_{ys}$        | Pitching moment by suspension                            |
| $M_{yj}$        | Pitching moment by jacking force                         |
| $M_z$           | Yawing moment                                            |
| $Y_G$           | Lateral acceleration                                     |
| $G_Y$           | Lateral acceleration gain for front wheel steering angle |
| $g$             | Gravity acceleration                                     |
| $\ddot{\theta}$ | Pitch angular acceleration                               |
| $\dot{\theta}$  | Pitch angular velocity                                   |
| $\theta$        | Pitch angle                                              |
| $\delta$        | Front wheel steering angle                               |

## 著 者



大久保直人