

ヨーレートの微分値まで考慮した車両の運動制御

中邨勉*, 堀洋一 (東京大学)

Motion Control of Electric Vehicles taking Derivative of Yaw Rate into Account

Tsutomu Nakamura*, Yoichi Horii (University of Tokyo)

Abstract

Ride Comfort is an important factor for any vehicles. We already developed the optimal speed Pattern generator to improve longitudinal ride comfort. This paper extends it also to lateral motion. We consider the derivative of yaw rate in this paper, and evaluate ride comfort when step and ramp steering angle is inputted.

キーワード：速度パターン, ヨーレート微分値, 乗り心地, 電気自動車
(speed pattern, yaw rate, ride comfort, electric vehicle)

1. はじめに

世界的に内燃機関（ガソリン）自動車から電気自動車への移行が進もうとしている時代である。これの一つの要因として環境問題が挙げられる。ニュース、新聞、その他のメディアにより環境問題が取り上げられて久しい。

内燃機関車に比べて、電気自動車の方が効率が良く、電気自動車はクリーンであることから上記のような移行が進む、というわけである。

しかしながら、電気自動車の利点はそれだけではない。電気自動車には電気モータが搭載されているため、制御面においてこそ真の強みを持っている。

制御面から見た電気自動車の利点は

- (1) トルク指令からトルク出力までの応答が高速かつ正確である
- (2) 出力トルクの大きさが正確に把握できる
- (3) モータを各輪に分散配置可能である

という3点が挙げられる。この3点目は、「4輪独立駆動にすることで、ヨーレートそのものを制御入力とすることが可能である。エンジンを4個用いることは考えられないが、電気モータであればこれが可能である」と言うのと分かりやすい。

2. 乗り心地の評価と速度パターン

2.1 乗り心地の定量的評価 自動車、旅客車両、飛行機、またはエレベータなど各種の乗り物があるが、これらはただ人を移動させればいいのではない。安全性、快適性が伴わなければならない。つまり、これら各種の乗り物にとって乗り心地とは重要な要素である。しかし乗り心地というのは曖昧な単語である。世には自動車、電車、船舶、航空機など様々な乗り物がある。それらには騒音や振動、温度、湿度といった要素がありそれらも乗り心地に大きな影響を及ぼすであろう。また人によってその乗り物での運行を「心地よい」とする人もいれば「不快である」とする人もいるだろう。乗り心地ということを見ると、主観的な評価に頼らざるを得ない。乗り心地は定量的な評価が難しいものである。しかしながら、人間の生活にとって乗り

心地は重要な要素であるから工学の様々な面から乗り心地が議論されてきた。

最近の人間工学の研究で、車両の前後方向の乗り心地は車両の加速度とジャークを独立変数として乗り心地を評価する方法が提案された⁽³⁾。また同研究グループにより車両横方向の乗り心地に関しても車両横方向の加速度、ジャークにより説明できることが報告されている⁽⁴⁾。その研究によると車両進行方向に対して横方向の加速度、ジャークと乗り心地評定値（不快指数）との関係は式(1)によって表される。

$$d(t) = \beta_0 + \beta_a a(t) + \beta_j j(t) + \epsilon(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d(t)$ は第 t 秒における乗り心地評定値、 $a(t)$ は第 t 秒における加速度の代表値、 $j(t)$ は第 t 秒におけるジャークの代表値、 β_0 は定数項、 β_a と β_j はそれぞれ加速度の代表値とジャークの代表値の偏回帰係数、 $\epsilon(t)$ は誤差項を表す。

2.2 従来の速度パターン 速度パターンとは加速度、速度、位置、時間、乗り心地などの要求をみたすために車両の速度を計画し、実現するものである。従来の速度パターンは前後方向の、つまり一次元的な運動のみを考慮し、速度パターンの生成による乗り心地の向上を目指すものであった。文献(1)は最適制御理論により速度パターンを生成し、文献(2)はそれを拡張した。拡張された速度パターンによる一例を挙げれば図1で表される。ここでジャークは図2の形をとっている。

これは、式(1)において乗り心地を評価する際に、文献(3)において、加速度、ジャークの代表値としてそれらの絶対値のピーク値をとることができる、としてあるからである。文献(2)では、ジャークの不連続性が乗り心地に悪影響を与える、としている。この台形型での速度パターン生成は、ジャークの絶対値を考慮しつつ、またジャークの連続性も考慮し、かつ速度をある時間内に目標値まで上げたいという場合にもっとも単純なアルゴリズムによるジャークのパターンである。

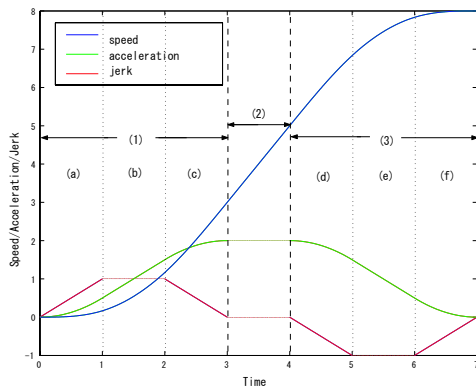


図 1 パターン生成の例

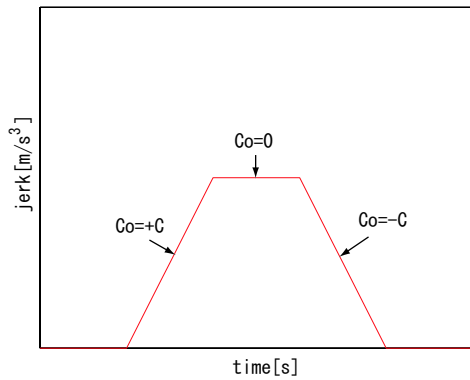


図 2 速度パターンにおけるジャークの決定方法

2.3 車両の横加速度、ジャークとヨーレートの関係
先にも述べたように、車両の横方向の加速度とジャークを独立変数として乗り心地を重回帰分析で評価できる。ここでヨーレートと車両の横加速度、ジャークの関係を示しておきたい。

車両の二次元運動において重要なパラメータが二つある。それが横滑り角 β とヨーレート γ である。図に示すと図 3 で表される。

通常横滑り角 β の値は小さい。 β の値が大きくなるのは、スピンやドリフトアウトなどの車両の制御が不能となった時であり、その場合において β の値は発散し大きな値をとる。

そこで当研究では横滑り角 β による横加速度への影響を無視し、横加速度はヨーレート γ によってのみ生じるものと考え、横加速度における乗り心地の評価をヨーレートにおける乗り心地の評価として扱うこととした。

3. 車両の解析モデル

車両の挙動を説明するモデルとして車両の一輪モデル、二輪モデルというものがある。一輪モデルは一次元運動を、二輪モデルは二次元平面内の運動を表すモデルである。車両の二輪モデルにおける基礎方程式を以下で説明する。

3.1 車両の一輪モデル-タイヤモデル- 車両の 1 輪

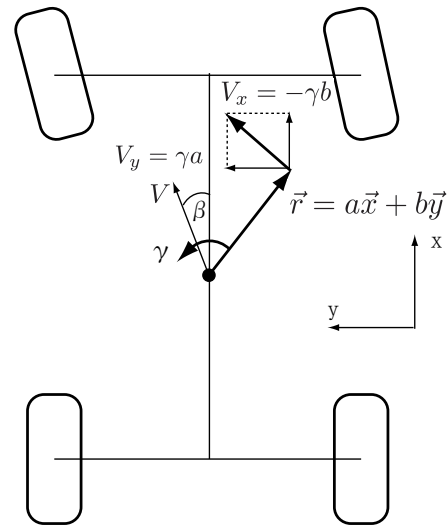


図 3 ヨーレートと速度の関係

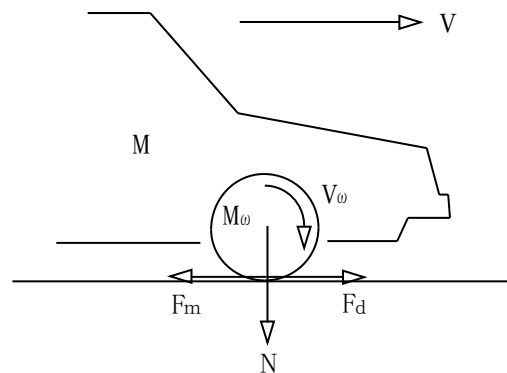


図 4 車両の 1 輪モデル

モデルとは図 4 で表されるモデルである。
この図より次式が成立する。

$$M_w \frac{dV_w}{dt} = F_m - F_d \dots\dots\dots (2)$$

$$F_d = \mu N \dots\dots\dots (3)$$

$$M_w = \frac{J_r}{r^2}, V_w = \omega r \dots\dots\dots (4)$$

但し、 M_w はタイヤの慣性 J_r を質量に換算した値、 V_w は角速度を速度に換算した値である。次にスリップ率 λ を定義する。 λ の定義は次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{\max(|V_w|, |V|)} \dots\dots\dots (5)$$

タイヤと路面の間で作用する駆動力(若しくは制動力)はこの λ の関数である μ によって式 (3) で表される。 λ と μ の関係は自動車工学の分野で解析がされていて、例えば Magic Formula と呼ばれるモデルがある。Magic Formula は次式で表される。

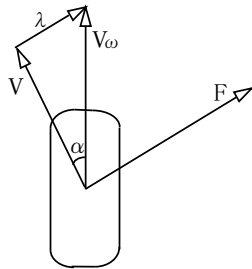


図5 λ-Method

$$\mu(\lambda) = D \sin \left(C \arctan B \left\{ (1 - E)\lambda + \frac{E}{B} \arctan B\lambda \right\} \right) \quad (6)$$

この式によって決まった μ を式 (3) に代入することで、タイヤが路面から力を受け車体が動き出す。これが車両の一輪モデルである。

3.2 λ-Method による二次元への拡張 次に λ-Method について説明する。これはスリップ率 λ をベクトルとして扱い、 $\vec{\lambda}$ の方向にタイヤは力を発生すると考える手法である。ここで $\vec{\lambda}$ は次式で定義される。

$$\vec{\lambda} = \frac{\vec{V}_\omega - \vec{V}}{\max(|\vec{V}_\omega|, |\vec{V}|)} \quad (7)$$

タイヤに発生する力 F は λ に平行に発生し、タイヤにかかる荷重を N とすれば、式 (3) は次式に拡張される。

$$\vec{F}_d = \mu(|\lambda|)N \frac{\vec{\lambda}}{|\lambda|} \quad (8)$$

図で表すと 図5 である。

図5より

$$\lambda_x = \frac{V_\omega - V \cos \alpha}{\max(|V_\omega|, |V|)} \quad (9)$$

$$\lambda_y = \frac{-V \sin \alpha}{\max(|V_\omega|, |V|)} \quad (10)$$

であり、 $|\lambda|$ は

$$|\lambda| = \sqrt{\lambda_x^2 + \lambda_y^2} \quad (11)$$

$$\angle \lambda = -\arctan \frac{\lambda_y}{\lambda_x} \quad (12)$$

ただし図中の α はタイヤのすべり角である。

3.3 車両の2輪モデル 車両の2輪モデルとは図6で表されるモデルである。

これは左右タイヤの横すべり角が等しく、かつその値が小さく、実舵角も小さいとみなしてよい範囲を考え、車体のロールを無視する場合、車両のトレッド d_f 、 d_r を無視し、前後の左右輪が等価的に車両の前後軸と車軸との交点

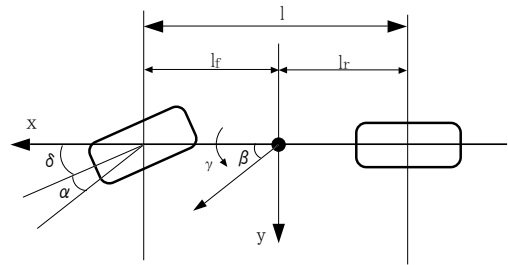


図6 2輪モデル

にそれぞれ集中している車両に近似して考える、ということである。車両の2輪モデルによれば車両の基本方程式は

$$\begin{bmatrix} mVs + 2(K_f + K_r) & mV + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \\ 2(l_f K_f - l_r K_r) & Is + \frac{2}{V}(l_f K_f^2 + l_r K_r^2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta(s) \\ \gamma(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2K_f \delta(s) \\ 2l_f K_f \delta(s) \end{bmatrix} \quad (13)$$

で表される。

3.4 操舵角からヨーレートまでの伝達関数 前輪操舵角からヨーレートまでの伝達関数は、2輪モデルの運動方程式を解くことで次のようにもとまる。

$$\gamma^* = P(0) \frac{1}{1 + T_\gamma^* s} \delta(s) \quad (14)$$

ただし

$$P(0) = \frac{1}{1 + AV^2} \frac{V}{l} \quad (15)$$

$$T_\gamma = \frac{ml_f V}{2lK_f} \quad (16)$$

$$A = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (17)$$

となる。ここで $P(0)$ はヨー角速度ゲイン定数と呼ばれる。

ここで注目すべきは操舵角が決まれば、それにヨー角速度ゲイン定数を乗じたものがヨーレートの最終値になる、ということである。

4. 乗り心地改善のためのヨーレート指示値作成方法の提案

4.1 速度パターンの二次元への拡張 一次元での速度パターンでの乗り心地改善ではジャークの連続性、ジャークの絶対値を考慮し、図2のジャーク、つまり傾きが $C_0 = +C$ 、 $C_0 = 0$ 、 $C_0 = -C$ の3値をとるような等脚台形型の連続的なジャークを発生させることで問題解決とした。それになら、ヨーレートの微分値として等脚台形型のもを最初に考えた。この変更は一次元から二次元への拡張として自然なものであると考える。

そこで、ヨーレート微分値を等脚台形型のものにしてシミュレーションを行ってみた。シミュレーションの概要としては5.56[m/s]=20[km/h]で直進走行中、 $t=1[s]$ の時に前輪操舵角 δ を 10° 切ることとした。シミュレーションの結果を図7に示す。

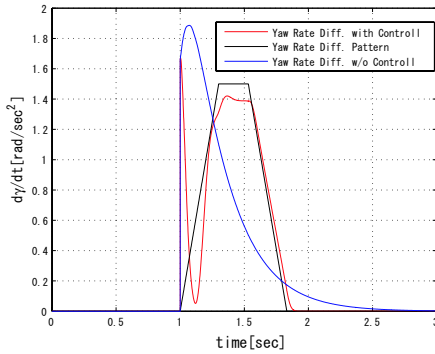


図7 $\delta=10^\circ$ のステップを切った時のヨーレート微分値

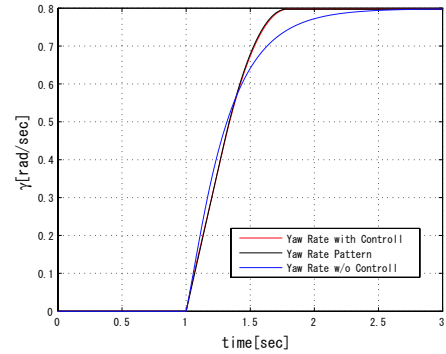


図9 前輪操舵角 $\delta=10^\circ$ のステップを切った時のヨーレート

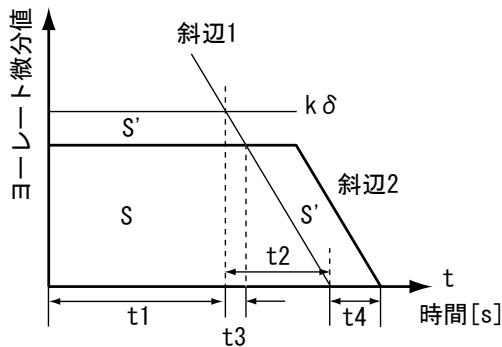


図8 新しい台形型

図7よりヨーレート第一次微分値の絶対値のピーク値が制御なしと比較して低減されているのが分かる。これは乗り心地に関する要素で、小さければ小さい程いいので追従できたのは乗り心地が良くなった、と解釈することができる。

しかしながらヨーレート第一次微分値の値が前輪操舵角 δ を切った直後にステップ状に上がってしまっているため、ヨーレート第二次微分値の値としては有限の値を取っていない。つまり無限の値になってしまっていて、この点からヨーレート第二次微分値を考慮できなくなってしまっている。

4.2 新しい台形型のヨーレート微分値の提案 そこで新しい台形型での制御を考える。先ほどの等脚台形に似せて、右側は角度を持って滑らかに0に落ちる台形で、左側は最初から台形の高さを持った形の台形を考えた。

これを図8に示す。

最初に考えたのは $k\delta$ と斜辺1で囲まれたところであり、斜辺1は P_2 の傾きを持って下がっている。この場合時間 t_1 と t_2 は式(18)から式(23)のように求められる。

$$S = P(0)\delta \dots\dots\dots (18)$$

$$t_2 P_2 = k\delta \dots\dots\dots (19)$$

$$t_2 = \frac{k\delta}{P_2} \dots\dots\dots (20)$$

$$S = (t_1 + \frac{t_2}{2})k\delta \dots\dots\dots (21)$$

$$t_1 = \frac{S}{k\delta} - \frac{t_2}{2} \dots\dots\dots (22)$$

$$= \frac{P(0)}{k} - \frac{k\delta}{2P_2} \dots\dots\dots (23)$$

また P_1 というパラメータにより台形の高さに、つまりヨーレート一次微分値に制限をつけた場合、 t_4 だけ時間を延ばしてやるが必要であり

$$t_3 = \frac{k\delta - P_1}{P_2} \dots\dots\dots (24)$$

$$S' = (t_1 + \frac{t_3}{2})(k\delta - P_1) \dots\dots\dots (25)$$

$$t_4 = \frac{S'}{P_1} \dots\dots\dots (26)$$

のように計算可能である。

この形でシミュレーションを行った。先のシミュレーションと同様に $5.56[m/s]=20[km/h]$ で直進走行中、 $t=1[s]$ の時に前輪操舵角 δ を 10° 切ったものと δ を 20° 切ったものを考えることとする。駆動力差は後輪のみに伝えるものとする。また、指示値としてのパラメータ P_1 、 P_2 は先ほどと同様それぞれ $1.5[rad/sec^2]$ 、 $10[rad/sec^3]$ とした。

シミュレーションの結果および考察 前輪操舵角 δ を 10° 切ったもののシミュレーション結果を図9、図10に示す。

図10よりヨーレート一次微分値の値を制御していない場合に比べて低減できているのが分かる。この点で乗り心地は良くなっていると解釈できる。また、第4.1節で考えたパターン(図7)とくらべてヨーレート微分値を上下に振っていない分、無駄がなくなると考えられる。

4.3 前輪操舵角としてランプ関数を入力したときのヨーレート指示値 これまでの議論は全て前輪操舵角 δ をステップ状に入力し、それについての指示値の作成法等を考えてきたが、この節では簡単なランプ状の関数を想定し、それについてのヨーレート指示値作成方を考えてみたい。前輪操舵角としては図11を想定する。

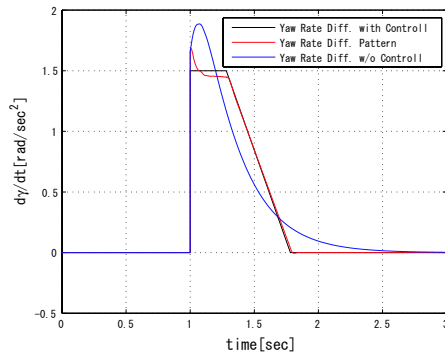


図 10 前輪操舵角 $\delta=10^\circ$ のステップを切った時のヨーレート微分値

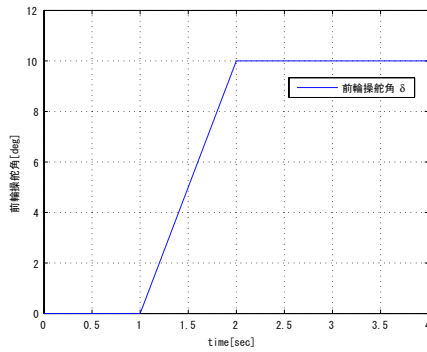


図 11 ランプ状の前輪操舵角 δ

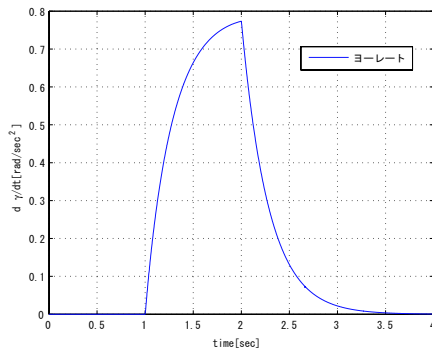


図 12 ランプ状の δ を入力した場合のヨーの値

図 11 で表される前輪操舵角 δ を入力した時のヨーレートの値 (制御なし) は図 12 のようになる。そこでヨーレート一次微分値と二次微分値にある値を持たせた等脚台形型の指示値作成とすることにした。これを図 13 に示す。

ランプ状の前輪操舵角 δ を想定すると、 δ の最終値が決定するまでヨーレート微分値の線が囲む面積が決定できない。そのため時間 t_3 は δ の最終値が決定し、作るべき面積が求まってから決定される。

t_3 を求める式は図 13 より

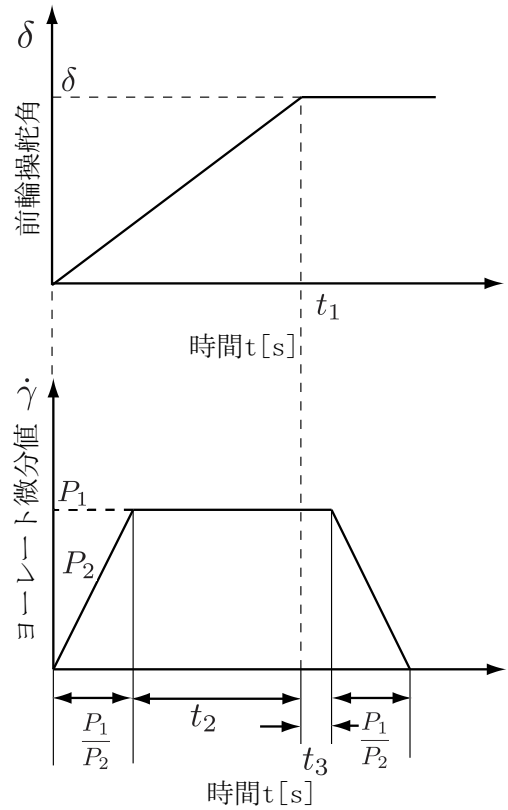


図 13 ランプ状の δ を入力した場合のヨーレート指示値作成方法

$$\left(\frac{P_1}{P_2} + t_2 + t_3\right)P_1 = \delta P(0) \dots \dots \dots (27)$$

$$t_2 + t_3 = \frac{\delta P(0)}{P_1} - \frac{P_1}{P_2} \dots \dots \dots (28)$$

よって

$$t_3 = \frac{\delta P(0)}{P_1} - \frac{P_1}{P_2} - t_2 \dots \dots \dots (29)$$

により、求められる。

シミュレーションの概要としては先のシミュレーションと同様、同様に $5.56[\text{m/s}] = 20[\text{km/h}]$ で直進走行中を想定する。前輪操舵角は $t=1[\text{s}]$ から $t=2[\text{s}]$ まで図 11 のようにランプ状に 10° まで切ることを考える。パラメータはコムのものである。またヨーレート微分値、二次微分値の制限値 P_1 、 P_2 はそれぞれ $0.8[\text{rad/sec}^2]$ 、 $2[\text{rad/sec}^3]$ とした。

シミュレーションの結果および考察 シミュレーション結果を図 14 から図 16 に示す。

図 15 よりヨーレート微分値の絶対値のピーク値が低減されていることが分かる。また図 16 よりヨーレート二次微分値の絶対値のピーク値の値においても、提案手法によって小さくすることができていることが分かる。

5. 結論

5・1 まとめ まず前輪操舵角 δ をステップ状に入力するシミュレーションにおいて、従来の速度パターンを二

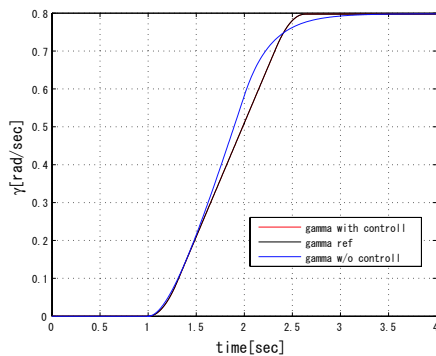


図 14 ランプ状の δ を入力した場合のヨーレート

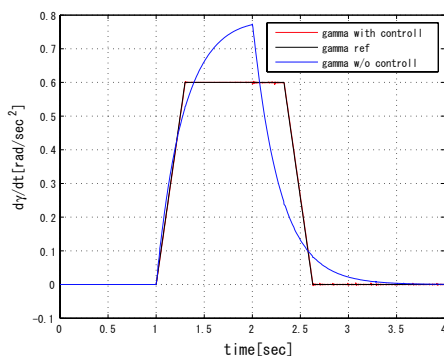


図 15 ランプ状の δ を入力した場合のヨーレート微分値

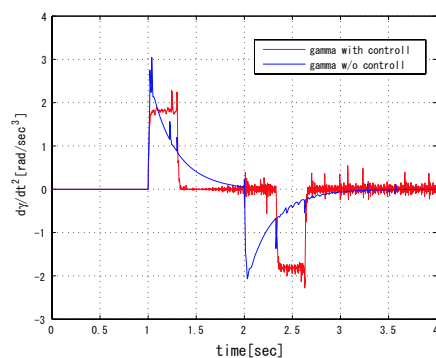


図 16 ランプ状の δ を入力した場合のヨーレート二次微分値

次元に拡張した形そのままでは無駄があることを示し、等脚台形型のヨーレート微分値から新しい台形型のヨーレート微分値に変更をした。その新しい台形型を積分した形でのヨーレート指示値で制御シミュレーションを行い、ヨーレート微分値の絶対値のピーク値を下げる事ができた。これは乗り心地の指標（不快指数）を下げられたことを意味し、乗り心地が良い制御ができたと考えている。

また、前輪操舵角 δ をランプ状に入力するシミュレーションにおいては、等脚台形型での制御が有用であることを示し、その積分形での制御シミュレーションを行い、ヨー

レート微分値の絶対値のピーク値を下げるるとともに、ヨーレート二次微分値の絶対値のピーク値の値も下げることができた。これも δ をステップ状に入力するシミュレーション同様、乗り心地が良い制御ができた、と考えている。

5.2 今後の課題 今回のヨーレート指示値作成によるヨーレートの制御は前輪操舵角 δ を一回切ることしか考えていない。一回切り、その過渡応答としてのヨーレートを乗り心地の良いものにしたのが今回の研究である。またその操舵角の切り方もステップ状に切るものと、ランプ状に切るもの（図 11 参照）しか考えていない。もっと普遍的な前輪操舵角の切り方に対してヨーレートの指示値を作成し制御をしてやる必要がある。

また今回、乗り心地の指標としたのはヨーレートの微分値、二次微分値の絶対値のピーク値であった。ヨーレートの微分値、二次微分値としたのは、第 2.3 節において、車両の横滑り角 β が通常走行時、つまりスピンやドリフトアウト等をおこしていない時に無視できることから、ヨーレートの微分値、二次微分値と車両の横加速度、横ジャークの間に比例関係が生まれることに起因していた。しかし、通常走行時においても車両の横滑り角 β は存在する。そのため、ヨーレートだけではなく横滑り角の値も考慮した乗り心地を今後考える必要がある。

また絶対値のピーク値としたのは、それが見た目に分かりやすいことからこれを乗り心地の指標とした。文献 (3) (4) によれば、乗り心地評定値（不快指数）は加速度、ジャークの代表値として他に絶対値の平均値、実効値が使えるとしている。乗り心地の指標として今後はこれらも考える必要がある。

参考文献

- (1) タイチェンファ: "速度パターンを導入した電気自動車の新しい運動制御手法の提案", 2003.
- (2) 斎藤知行, 堀洋一: "乗り心地の向上を目指しジャークと加速度限界を考慮した速度パターンのリアルタイム生成", 電気学会研究会資料, vol.2004(1-12), pp.31-36, 2004.
- (3) 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光: "自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究", 人間工学, vol.36, No.4, pp.191-200, 2000.
- (4) 山岸義忠, 猪岡光, 王鋒: "車両旋回時の乗り心地についての研究", 人間工学, vol.39, No.4, pp162-168, 2003.
- (5) 安部正人: "自動車の運動と制御", 山海堂, 1992.
- (6) 景山一郎, 阿部正人他: "「自動車の運動力学」資料集", 2005.
- (7) 原哲: "車輪の駆動力飽和を考慮した電気自動車の新しい 2 次元運動制御", 2001.