

- 卒業論文 -

ヨーレートの微分値まで考慮した  
車両の運動制御

平成18年2月13日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電子情報工学科

40406 中邨 勉

## 内容梗概

電気自動車はその制御面においてこそ強みを持っている。トルク応答の速さ、トルク値の正確な把握、そしてモータならではの4輪分散配置である。そして、この三点目のモータの4輪分散配置により、左右輪に逆方向のトルクを入力することで、ヨーレートを制御入力とすることが可能である。車両の一次元運動において加速度と Jerk が乗り心地を決める重要な要素である、ということが知られている。本論文では、車両の二次元運動にこの考え方を拡張できないかと考え、ヨーレートの一次微分値、二次微分値がそれに対応する要素であると考えた。車両の二次元運動において、基礎的な運動の一つとして前輪操舵角をステップ状とランプ状に切り、そのときの乗り心地を考慮したヨーレート指示値の自動生成を行い、車両の運動を制御するシミュレーションを行った。その結果、ステップ入力に対してはヨーレート一次微分値を、ランプ入力に対してはヨーレート一次、二次微分値を低減させることができ、乗り心地の向上が実現できた。またステップ入力に対しては実験を行い、ヨーレート一次微分値の値を下げることに成功した。実験においても乗り心地の向上が実現できた。

# 目次

第1章	序論	3
1.1	電気自動車の現状と優位性	3
1.2	研究背景と目的	3
第2章	乗り心地の評価と速度パターン	5
2.1	乗り心地の定量的評価	5
2.2	従来の速度パターン	5
2.3	車両の横加速度、ジャークとヨーレートの関係	7
第3章	自動車のシミュレーションモデルの構成	8
3.1	車両の一輪モデル-タイヤモデル-	8
3.2	$\lambda$ -Method による二次元への拡張	9
3.3	車両の非線形四輪モデル	10
3.4	シミュレーションモデルの全体像	11
第4章	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	13
4.1	車両の2輪モデル	13
4.1.1	操舵角からヨーレートまでの伝達関数	14
4.2	速度パターンの二次元への拡張	14
4.2.1	シミュレーションの概要	15
4.2.2	シミュレーションの結果および考察	16
4.3	新しい台形型のヨーレート微分値の提案	16
4.3.1	シミュレーションの概要	18
4.3.2	シミュレーションの結果および考察	18
4.4	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	19
4.4.1	シミュレーションの概要	21
4.4.2	シミュレーションの結果および考察	21
第5章	提案したヨーレート指示値による電気自動車の制御実験	22
5.1	コムスによる実験	22
5.2	実験概要	22
5.3	実験結果	22
5.4	実験結果の検討	23
第6章	結論	25
6.1	まとめ	25

## 目次

---

6.2 今後の課題 . . . . .	25
参考文献	27

# 第1章 序論

## 1.1 電気自動車の現状と優位性

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。環境問題が現在の車社会に多大な影響を及ぼすのは自明である。それは多くの自動車が、その原動力としてガソリンを利用した内燃機関車であるからである。排出される NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> などが環境に悪影響を及ぼす、ということは多くの人が知っているところであろう。

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。

## 1.2 研究背景と目的

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。

研究の背景としては電気自動車の一次元的な運動に関する乗り心地を評価する先行研究がある。これを二次元平面内に適応できないか、と考えた。

また二次元平面内での電気自動車の挙動安定化の先行研究として、ヨーレートを後に述べる二輪モデルに追従させることで、横滑り角の発散、つまりスピンやドリフトアウトなどの不安定挙動から脱した、というものがある。当研究ではヨーレートを二輪モデルに追従させるのではなく、ヨーレートの滑らかな指示値を自動生成し、それに追従させることで乗り心地および安全性を向上させる目的がある。

ヨーレートの指示値の自動生成は例えば高速道路におけるレーンチェンジ等に使用できると思われる。特に将来高度に ITS(intelligent transport [transportation] system) が発達し

## 1.2 研究背景と目的

---

た社会において、前方の車が何らかの緊急停止を行った場合などを想定すると、ヨーレートの自動生成により滑らかに、かつ安全にその車両を避ける、といったことが可能である。

そのための基礎研究として前輪操舵角 $\delta$ をステップ状及びランプ状に入力したときにヨーレートの指示値を自動生成して、滑らかに車両を曲げることを当研究の目的とした。

## 第2章 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

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进行を考えると、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。例えば振動に関する乗り心地の研究は長い間なされており、サスペンションやダンパーによる振動抑制にも受動的なものではなく、能動的に働くアクティブサスペンションや電磁ダンパーなどが今研究されているようである。従来の乗り心地に関する研究は車両走行時の上下振動を中心としたものが主である。

一方、車両の前後方向に関する乗り心地や、車両の横方向に関する乗り心地、というのはあまり議論がなされてこなかった。しかしながら最近の研究で、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 [5]。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 2.1 によってあらわされる。

$$d(t) = \beta_0 + \beta_a a(t) + \beta_j j(t) + \epsilon(t) \quad (2.1)$$

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、 $\beta_0$  は定数項、 $\beta_a$  と  $\beta_j$  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。[1] は最適制御理論により速度パターンを生成し、[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 2.1 のようにあらわされる。

## 2.2 従来 of 速度パターン

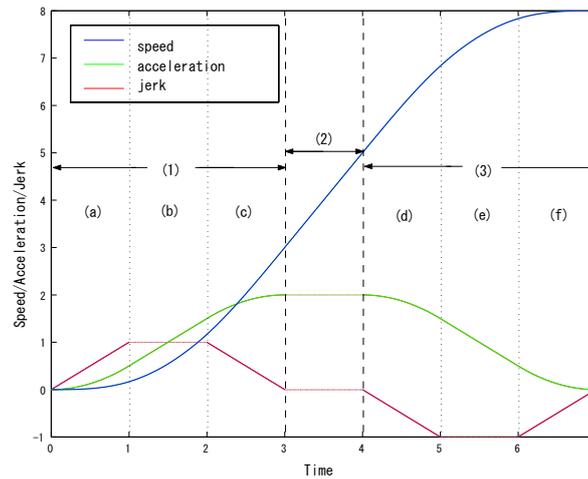


図 2.1: パターン生成の例

この図ではジャークに制限として  $1[\text{m}/\text{sec}^3]$ 、加速度に制限として  $2[\text{m}/\text{sec}^2]$  をつけた場合の、速度を  $8[\text{m}/\text{sec}]$  まで上昇させるための速度パターンである。このように、速度パターンでは乗り心地を考慮して、ジャークや加速度に制限をつけ、滑らかな運転を可能にするものである。

ここでジャークは図 2.2 のような形をとっている。

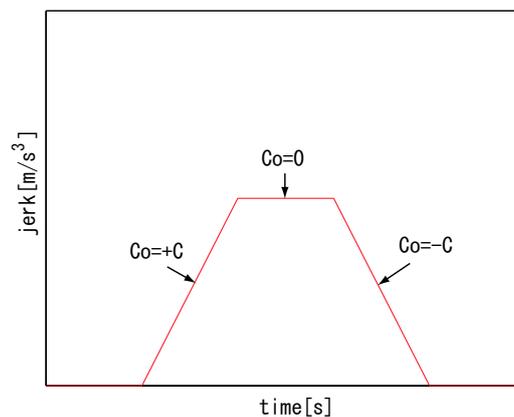


図 2.2: 速度パターンにおけるジャークの決定方法

これは、式 2.1 において乗り心地を評価する際に、[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。[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。

## 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  $\beta$  とヨーレート  $\gamma$  である。図に示すと図 2.3 であらわされる。

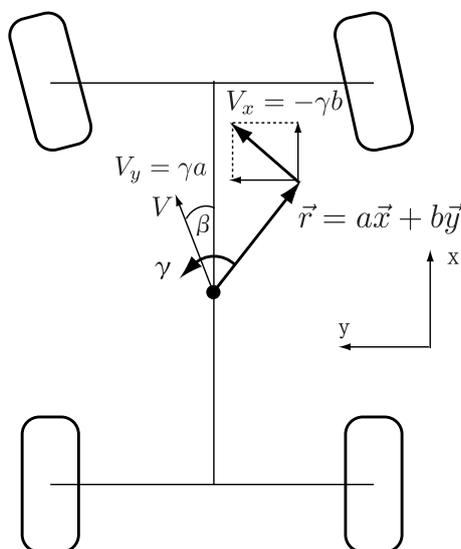


図 2.3: ヨーレートと速度の関係

通常横滑り角  $\beta$  の値は小さい。 $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$  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  $\gamma$  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。

# 第3章 自動車のシミュレーションモデルの構成

車両の挙動を表すモデルとして車両の1輪モデル、車両の2輪モデルというものがある。車両の挙動を厳密に表すならば車両の4輪モデルが必要であるが、車両の4輪モデルは非線形であり解析には向かない。そこで1次元の解析では車両の1輪モデル、2次元での解析では車両の2輪モデルが解析に用いられる。

## 3.1 車両の一輪モデル-タイヤモデル-

車両の1輪モデルとは図3.1のような図で表されるモデルである。

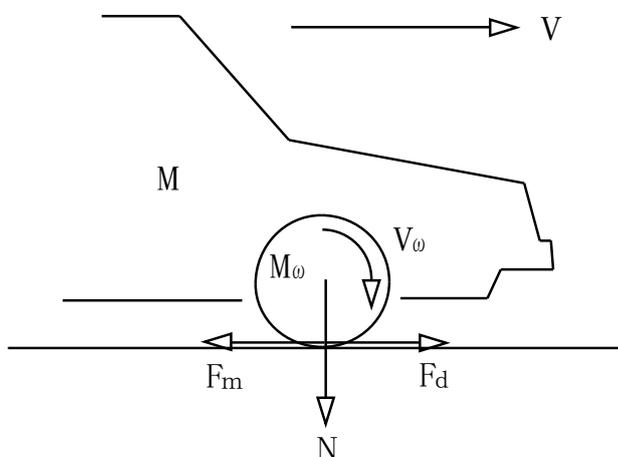


図 3.1: 車両の1輪モデル

この図より次式が成立する。

$$M_\omega \frac{dV_\omega}{dt} = F_m - F_d \quad (3.1)$$

$$F_d = \mu N \quad (3.2)$$

$$M_\omega = \frac{J_r}{r^2}, V_\omega = \omega r \quad (3.3)$$

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

$$\lambda = \frac{V_\omega - V}{\max(|V_\omega|, |V|)} \quad (3.4)$$

### 3.2 $\lambda$ -Method による二次元への拡張

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  $\lambda$  の関数である  $\mu$  によって式 (3.2) で表される。 $\lambda$  と  $\mu$  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。

$$\mu(\lambda) = D \sin \left( C \arctan B \left\{ (1 - E)\lambda + \frac{E}{B} \arctan B\lambda \right\} \right) \quad (3.5)$$

パラメータを適当に定めると 図 3.2 のような  $\mu - \lambda$  曲線が出てくる。

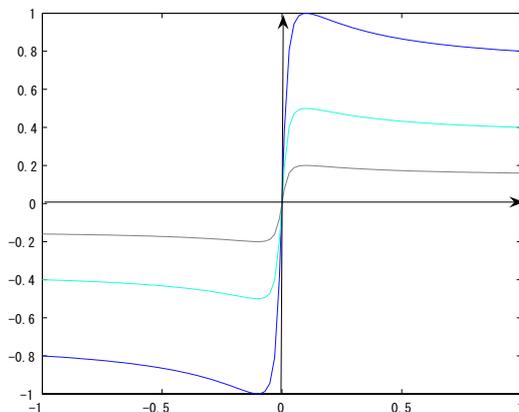


図 3.2:  $\mu - \lambda$  曲線

この曲線で決まった  $\mu$  を式 (3.2) 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わけである。

### 3.2 $\lambda$ -Method による二次元への拡張

次に  $\lambda$ -Method について説明する。これはスリップ率  $\lambda$  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。

$$\vec{\lambda} = \frac{\vec{V}_\omega - \vec{V}}{\max(|\vec{V}_\omega|, |\vec{V}|)} \quad (3.6)$$

タイヤに発生する力  $F$  は  $\lambda$  に平行に発生し、タイヤにかかる荷重を  $N$  とすれば、式 (3.2) は次式に拡張される。

$$\vec{F}_d = \mu(|\lambda|)N \frac{\vec{\lambda}}{|\lambda|} \quad (3.7)$$

図で表すと 図 3.3 のようになる。

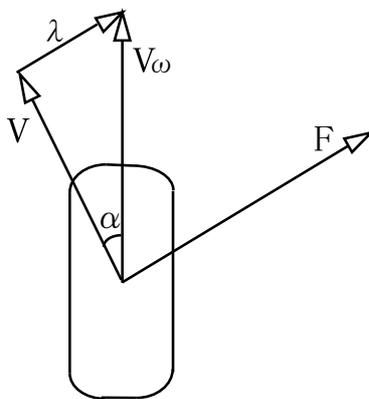


図 3.3:  $\lambda$ -Method

図 3.3 より

$$\lambda_x = \frac{V_\omega - V \cos \alpha}{\max(|V_\omega|, |V|)} \quad (3.8)$$

$$\lambda_y = \frac{-V \sin \alpha}{\max(|V_\omega|, |V|)} \quad (3.9)$$

であり、 $|\lambda|$  は

$$|\lambda| = \sqrt{\lambda_x^2 + \lambda_y^2} \quad (3.10)$$

$$\angle \lambda = -\arctan \frac{\lambda_y}{\lambda_x} \quad (3.11)$$

ただし図中の  $\alpha$  はタイヤのすべり角である。これでタイヤが発生する力が分かったことになる。

### 3.3 車両の非線形四輪モデル

以上が 2 輪解析に必要な事項であったが、シミュレーションモデルはできるだけ厳密するために 4 輪モデルをつくる。4 輪モデルの運動方程式は以下の式で与えられる。

$$m\dot{V}_x = f_{x-fr} + f_{x-fl} + f_{x-rr} + f_{x-rl} \quad (3.12)$$

$$m\dot{V}_y = f_{y-fr} + f_{y-fl} + f_{y-rr} + f_{y-rl} \quad (3.13)$$

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3.14)$$

$$\beta = \arctan \frac{V_y}{V_x} \quad (3.15)$$

$$I\dot{\gamma} = l_f(f_{y-fr} + f_{y-fl}) - l_r(f_{y-rr} + f_{y-rl}) + \frac{d}{2}(f_{x-fr} + f_{x-rr} - f_{x-fl} - f_{x-rl}) \quad (3.16)$$

### 3.4 シミュレーションモデルの全体像

ここで、 $m$ :車両質量、 $V$ 、 $V_x$ 、 $V_y$ :それぞれ車両速度、その  $x$  方向成分、その  $y$  方向成分、 $f_{x-fr}$ 、 $f_{x-fl}$ 、 $f_{x-rr}$ 、 $f_{x-rl}$ :各タイヤの出す力の  $x$  方向成分、 $f_{y-fr}$ 、 $f_{y-fl}$ 、 $f_{y-rr}$ 、 $f_{y-rl}$ :各タイヤの出す力の  $y$  方向成分、 $\beta$ :車両の横滑り角、 $\gamma$ :車両のヨーレート

但し、進行方向を  $x$  軸正の向き、鉛直上向きを  $z$  軸正の向きとし、右手系により  $y$  軸正の向きを定めた。

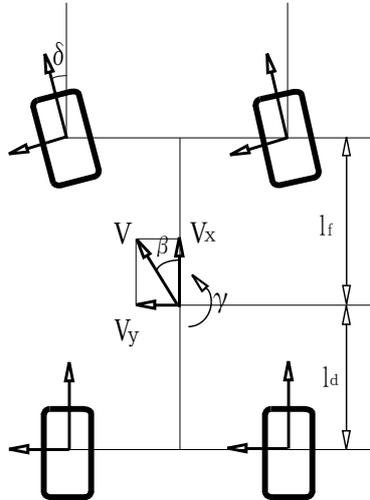


図 3.4: 4 輪モデル

各タイヤのスリップ角 4 輪モデルでは各タイヤのスリップ角が必要である。各タイヤのスリップ角は以下の式で与えられる。

$$\alpha_{fr} = \frac{V\beta + l_f\gamma}{V + \frac{d}{2}\gamma} - \delta \quad (3.17)$$

$$\alpha_{fl} = \frac{V\beta + l_f\gamma}{V - \frac{d}{2}\gamma} - \delta \quad (3.18)$$

$$\alpha_{rr} = \frac{V\beta - l_f\gamma}{V + \frac{d}{2}\gamma} \quad (3.19)$$

$$\alpha_{rl} = \frac{V\beta - l_f\gamma}{V - \frac{d}{2}\gamma} \quad (3.20)$$

### 3.4 シミュレーションモデルの全体像

以上よりシミュレーションモデルを作ることができる。シミュレーションモデルの構成としては図 3.5 のようになる。図中のタイヤモデルと表されているのは、 $\lambda$ -Method を使って図 3.7 のように計算される。図 3.7 中の Calculator では、式 (3.17) から式 (3.20) で表される  $\alpha$  をそれぞれのタイヤについて計算している。またコントローラは図 3.6 のように  $\delta$  からヨーレートのパターンを作り出すブロックによりヨーレート指示値を作り出し、PI Controller によって実際のヨーレートの値との偏差を後輪に左右逆方向の力として加えることで、制御している。

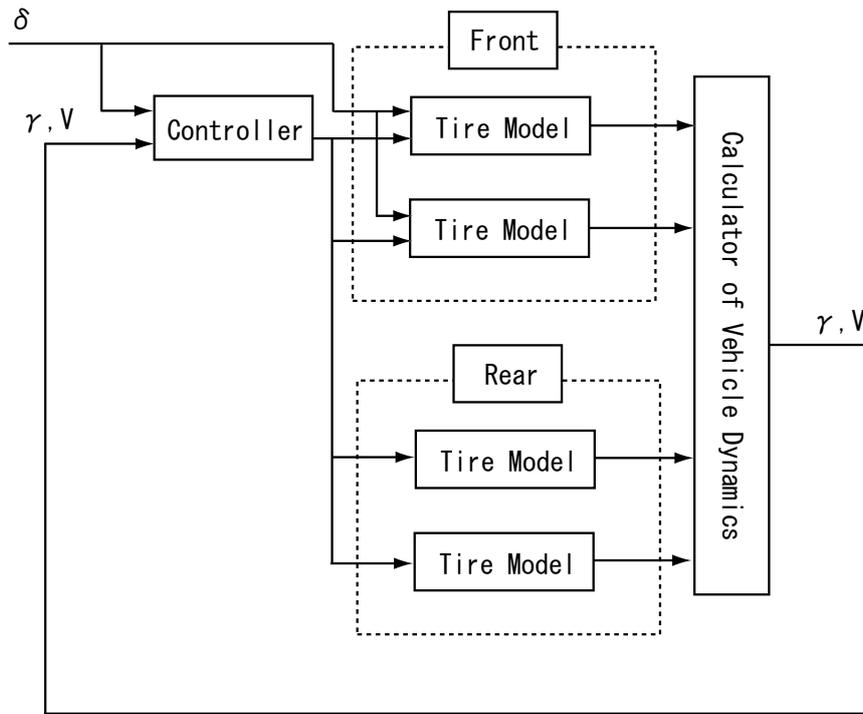


図 3.5: シミュレーションモデルの構成

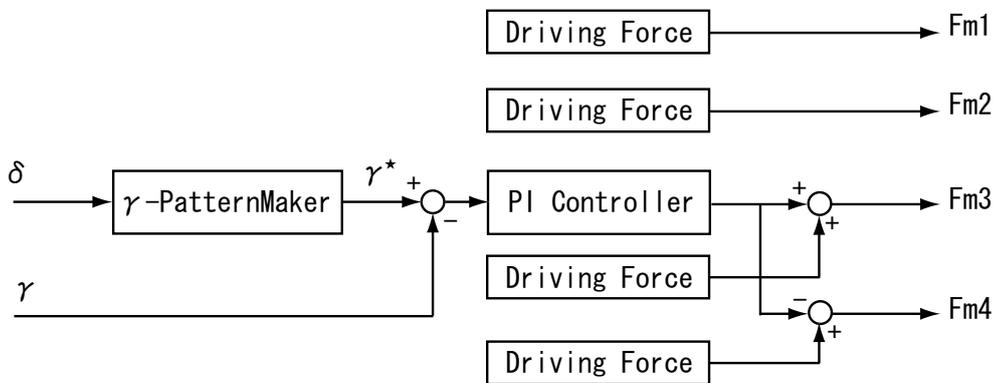


図 3.6: コントローラーの構成

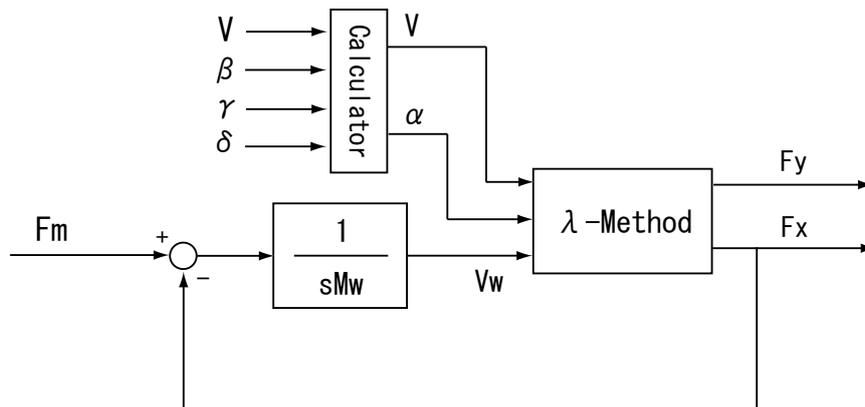


図 3.7: タイヤモデル

## 第4章 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

前輪操舵角  $\delta$  をステップ状に切る。この時どのようなヨーレート指示値が適切であるだろうか。またどのようなヨーレート指示値が乗り心地が良く感じられるだろうか。この章ではまず適切なヨーレート指示値としてどのような値をとらなければいけないか、自動車工学の見地から観察し、次に具体的にどのようなヨーレート指示値を作り出すかを議論する。

### 4.1 車両の2輪モデル

車両の2輪モデルとは図4.1のようなものをいう。

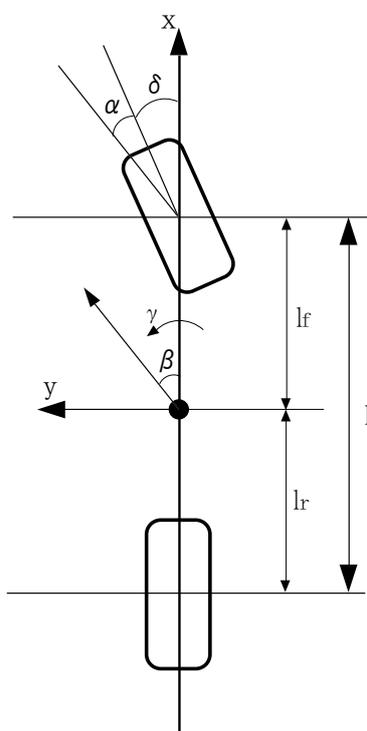


図 4.1: 2輪モデル

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にそれぞれ集中している車両に近似し

## 4.2 速度パターンの二次元への拡張

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

$$\begin{bmatrix} mVs + 2(K_f + K_r) & mV + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \\ 2(l_f K_f - l_r K_r) & Is + \frac{2}{V}(l_f K_f^2 + l_r K_r^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta(s) \\ \gamma(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2K_f \delta(s) \\ 2l_f K_f \delta(s) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

で表される。

### 4.1.1 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。

$$\gamma^* = P(0) \frac{1}{1 + T_\gamma^* s} \delta(s) \quad (4.2)$$

ただし

$$P(0) = \frac{1}{1 + AV^2} \frac{V}{l} \quad (4.3)$$

$$T_\gamma = \frac{ml_f V}{2lK_f} \quad (4.4)$$

$$A = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (4.5)$$

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。

## 4.2 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

- 加速度とジャークの連続性を保つ
- 目標速度  $v_f$  に達したとき加速度  $a_f = 0$  ジャーク  $\alpha_f = 0$

の二点を絶対条件としていた。

この問題は図 2.2 のようなジャーク、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。

それにならい、ヨーレートの微分値として等脚台形型のものを最初に考えた。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。

等脚台形型のヨーレート微分値での制御のために図 4.2 のような台形においてヨーレート一次微分値、二次微分値の制限をかけるパラメータが時間とどのような関係にあるかを考える。

図 4.2 より

$$S = \frac{1}{2} th \quad (4.6)$$

$$tP_1 = 2h \quad (4.7)$$

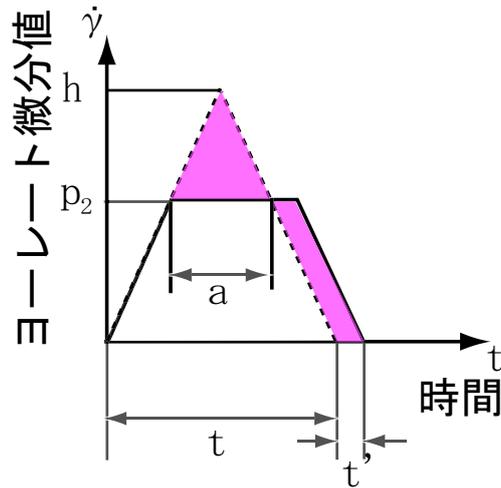


図 4.2: 等脚台形におけるパラメータと時間の関係

今、ヨーレート微分値の上限を  $P_1$ 、傾きつまりヨーレート二次微分値の上限が  $P_2$ 、面積を  $S = P(0)\delta$  とすれば

$$h = \sqrt{SP_2} \quad (4.8)$$

$$t = 2\sqrt{\frac{S}{P_2}} \quad (4.9)$$

切り取られた三角形の底辺を  $a$ 、高さを  $h_1$ 、面積を  $S'$  とすれば

$$a = t - 2\frac{P_1}{P_2} \quad (4.10)$$

$$h_1 = h - P_1 \quad (4.11)$$

$$S' = \frac{1}{2}ah_1 \quad (4.12)$$

$S'$  から  $t'$  は

$$t' = \frac{S'}{P_1} \quad (4.13)$$

のように求まる。

#### 4.2.1 シミュレーションの概要

5.56[m/s]=20[km/h] で直進走行中、 $t=1$ [s] の時に前輪操舵角  $\delta$  を  $10^\circ$  切りそのヨーレートの値や、ヨーレート微分値、二次微分値の値を評価する。

車両のパラメータとしては、後の実験で使うコムスのパラメータを用いる。コムスのパラメータを表 4.1 に示す。

また、指示値としてのパラメータ  $P_1$ 、 $P_2$  はそれぞれ  $1.5[\text{rad}/\text{sec}^2]$ 、 $10[\text{rad}/\text{sec}^3]$  とした。

表 4.1: コムスのパラメータ

M	300[kg]	重量
j	2.5[kgm <sup>2</sup> ]	車輪の慣性モーメント
r	0.23[m]	タイヤ半径
M <sub>ω</sub>	47[kg]	車輪の換算質量
l <sub>f</sub>	0.6[m]	重心からフロント軸までの距離
l <sub>r</sub>	0.6[m]	重心からリア軸までの距離
d	0.82[m]	左右輪の距離
I	500[kgm <sup>2</sup> ]	車両のイナーシャ
K <sub>f</sub>	3000[kgm/s <sup>2</sup> /rad]	前輪のコーナリングフォース
K <sub>r</sub>	3000[kgm/s <sup>2</sup> /rad]	後輪のコーナリングフォース

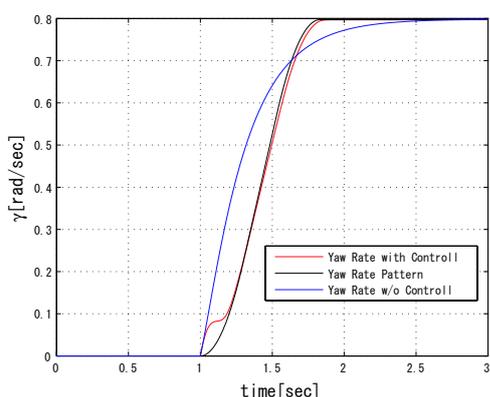


図 4.3:  $\delta=10^\circ$  のステップを切った時のヨーレート

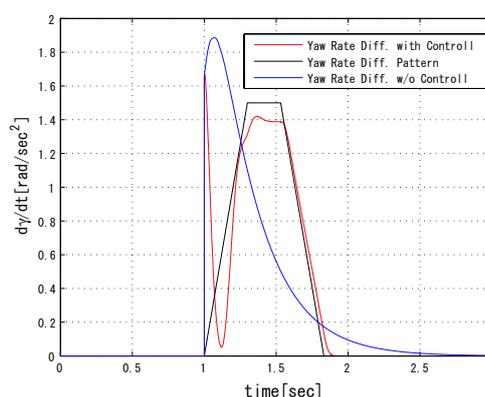


図 4.4:  $\delta=10^\circ$  のステップを切った時のヨーレート微分値

#### 4.2.2 シミュレーションの結果および考察

シミュレーションの結果を図 4.3、図 4.4 に示す。

図 4.4 よりヨーレート第一次微分値の絶対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係する要素で、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  $\delta$  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いる。

### 4.3 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 4.5 に示す。

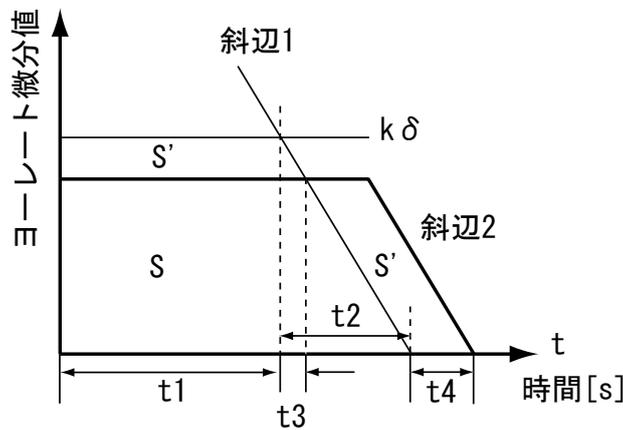


図 4.5: 新しい台形型

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 4.14 から式 4.19 で求められる。

$$S = P(0)\delta \quad (4.14)$$

$$t_2 P_2 = k\delta \quad (4.15)$$

$$t_2 = \frac{k\delta}{P_2} \quad (4.16)$$

$$S = \left(t_1 + \frac{t_2}{2}\right)k\delta \quad (4.17)$$

$$t_1 = \frac{S}{k\delta} - \frac{t_2}{2} \quad (4.18)$$

$$= \frac{P(0)}{k} - \frac{k\delta}{2P_2} \quad (4.19)$$

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必要がある

$$t_3 = \frac{k\delta - P_1}{P_2} \quad (4.20)$$

$$S' = \left(t_1 + \frac{t_3}{2}\right)(k\delta - P_1) \quad (4.21)$$

$$t_4 = \frac{S'}{P_1} \quad (4.22)$$

のように計算可能である。

MATLAB 上でこの台形を作るブロックは図 4.6 のようになる。

図 4.6 において速度  $V$  と前輪操舵角  $\delta$  より作るべき台形の面積  $S$  が決定される。それを行っているのが height ブロックで  $-P_2$  の傾きの  $y$  切片を表している。この  $y$  切片によって台形の面積を調整しているのである。 $y$  切片が height、傾きが  $-P_2$  の直線と  $P_1$  で小さいほうをとり、台形の形を作っている。

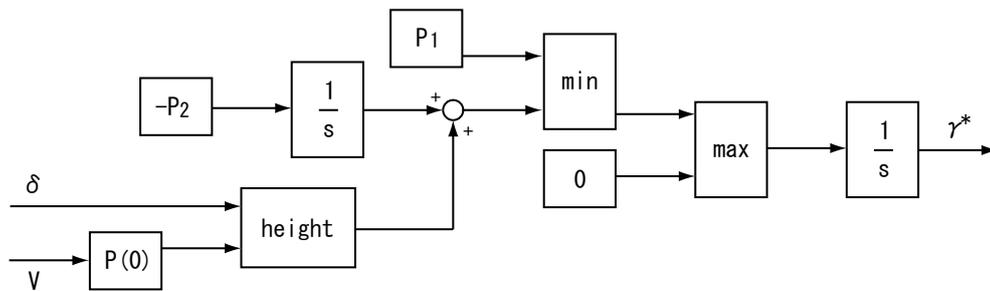


図 4.6: ヨーレート指示値作成ブロック 1

### 4.3.1 シミュレーションの概要

先のシミュレーションと同様に  $5.56[\text{m/s}] = 20[\text{km/h}]$  で直進走行中、 $t=1[\text{s}]$  の時に前輪操舵角  $\delta$  を  $10^\circ$  切ったものと  $\delta$  を  $20^\circ$  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。パラメータはコムのものである。

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  $1.5[\text{rad}/\text{sec}^2]$ 、 $10[\text{rad}/\text{sec}^3]$  とした。

### 4.3.2 シミュレーションの結果および考察

前輪操舵角  $\delta$  を  $10^\circ$  切ったもののシミュレーション結果を図 4.7、図 4.8 に示す。

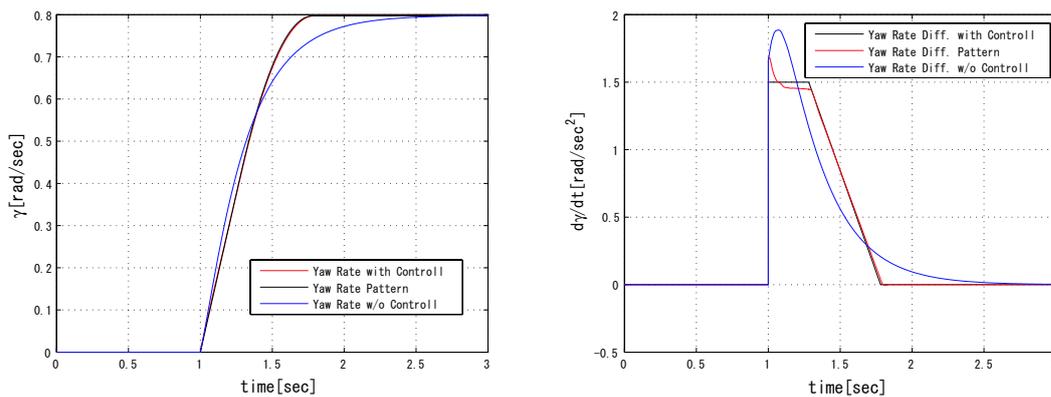


図 4.7: 前輪操舵角  $\delta=10^\circ$  のステップを切った時のヨーレート

図 4.8: 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

また、同じパラメータで前輪操舵角  $20^\circ$  切ったもののシミュレーション結果を図 4.9、図 4.10 に示す。

図 4.8、図 4.10 よりヨーレート一次微分値の値を制御して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 4.2 節で考えたパターン (図 4.4) 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。

#### 4.4 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

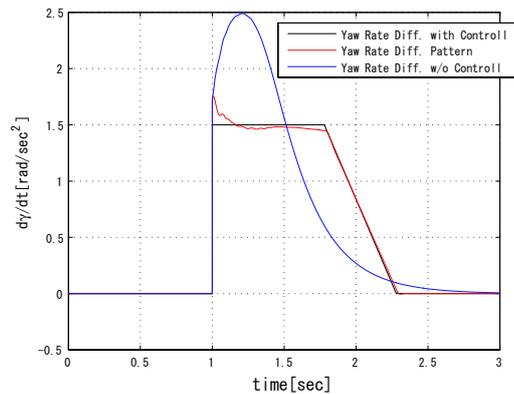
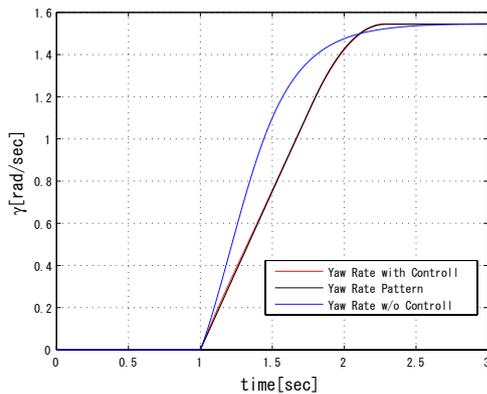


図 4.9: 前輪操舵角  $\delta=20^\circ$  のステップを切った時のヨーレート

図 4.10: 前輪操舵角  $\delta=20^\circ$  のステップを切った時のヨーレート微分値

#### 4.4 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  $\delta$  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 4.11 のようなものを想定する。

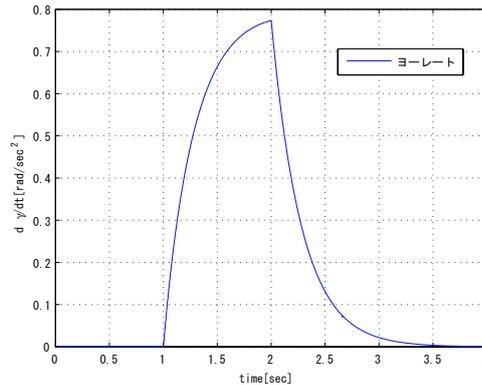
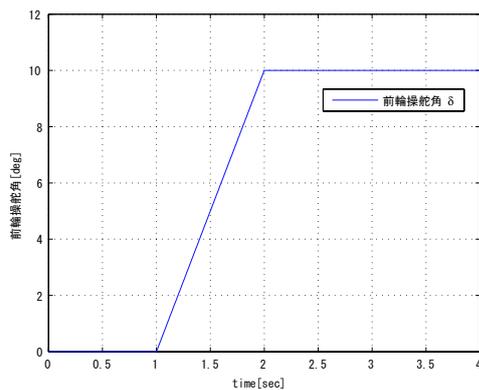


図 4.11: ランプ状の前輪操舵角  $\delta$

図 4.12: ランプ状の  $\delta$  を入力した場合のヨーの値

図 4.11 のような前輪操舵角  $\delta$  を入力した時のヨーレートの値（制御なし）は図 4.12 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 4.13 に示す。

ランプ状の前輪操舵角  $\delta$  を想定すると、 $\delta$  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  $\delta$  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。

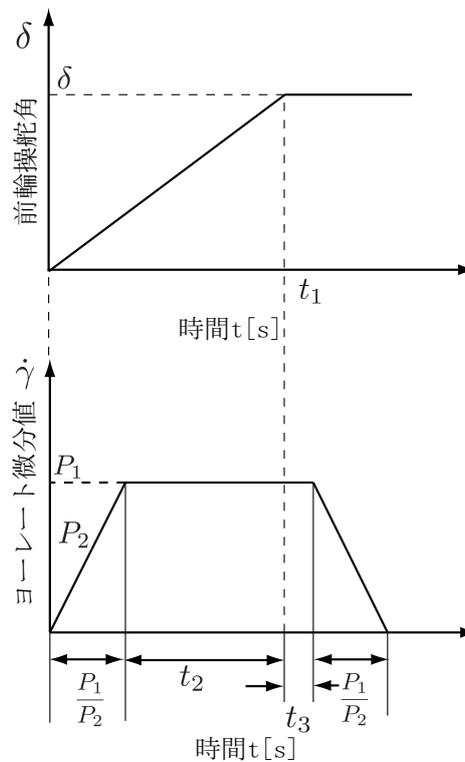


図 4.13: ランプ状の  $\delta$  を入力した場合のヨーレート指示値作成方法

$t_3$  を求める式は図 4.13 より

$$\left(\frac{P_1}{P_2} + t_2 + t_3\right)P_1 = \delta P(0) \quad (4.23)$$

$$t_2 + t_3 = \frac{\delta P(0)}{P_1} - \frac{P_1}{P_2} \quad (4.24)$$

よって

$$t_3 = \frac{\delta P(0)}{P_1} - \frac{P_1}{P_2} - t_2 \quad (4.25)$$

により、 $\delta$  の最終値が決定してから求められる。

MATLAB 上でこの台形を作るブロックは図 4.14 のようになる。

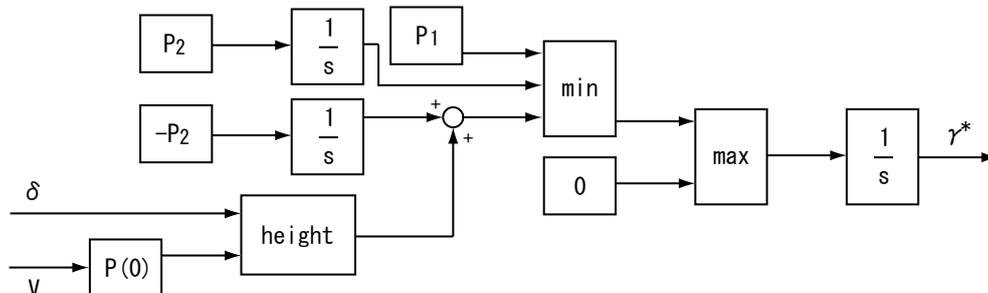


図 4.14: ヨーレート指示値作成ブロック 2

図 4.6 との相違点は、等脚台形の最初の傾き  $P_1$  を作るブロックが加わった点である。後は図 4.6 と同じで height ブロックにより面積  $S$  を計算し、 $y$  切片としている。

### 4.4.1 シミュレーションの概要

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 4.11 のようにランプ状に  $10^\circ$  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  $0.8[\text{rad}/\text{sec}^2]$ 、 $2[\text{rad}/\text{sec}^3]$  とした。

### 4.4.2 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 4.15 から図 4.17 に示す。

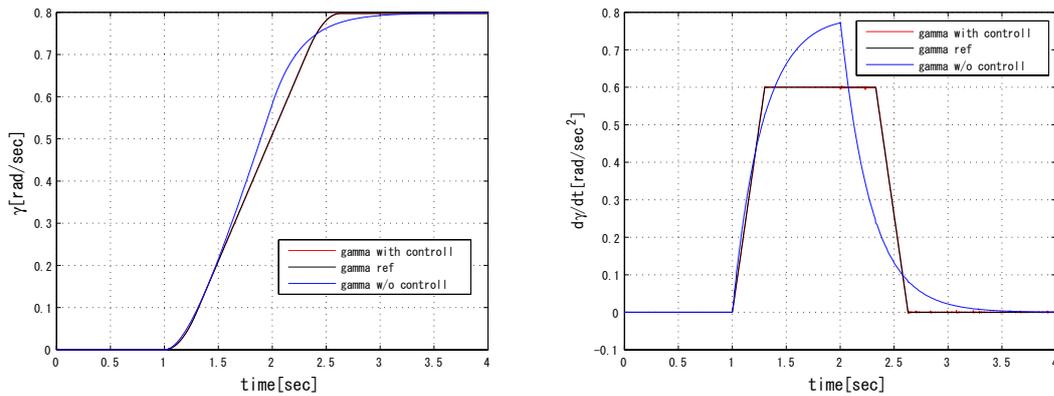


図 4.15: ランプ状の  $\delta$  を入力した場合のヨーレート  
 図 4.16: ランプ状の  $\delta$  を入力した場合のヨーレート微分値

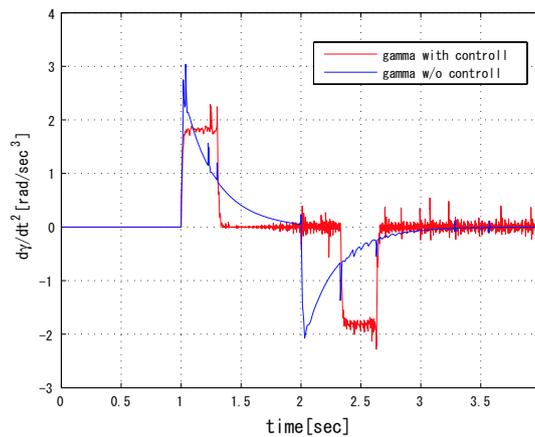


図 4.17: ランプ状の  $\delta$  を入力した場合のヨーレート二次微分値

図 4.16 よりヨーレート微分値の絶対値が低減されていることが分かる。また図 4.17 よりヨーレート二次微分値の絶対値の値においても、提案手法によって小さくすることができる。

# 第5章 提案したヨーレート指示値による電気自動車の制御実験

## 5.1 コムスによる実験

実験車両を用いて、先のシミュレーション結果を検証する。実験車両に用いたのはスーパーキャパシターを搭載したコムスである。この車両はトヨタのコムスという小型電気自動車を改造したものである。改造した部分は

- バッテリーを鉛蓄電池からスーパーキャパシターに変えた  
これにより、東大 III 月号等に比べ充電が速く、実験車両として簡単に実験を行えるようになった。充電にかかる時間は一番使い切った状態から満充電にいたるまで約2分である。
- 加速度センサ、ジャイロセンサ、ステアリングセンサを搭載させた  
これにより車両の情報を得て、制御を行う準備段階ができた。
- 上位 PC を搭載した上位 PC にはカウンタボードが搭載されており、速度情報や先に述べた加速度、ヨーレート、ステアリングアングルの値を得ることが可能である。またその値を制御に使うことができる。

の3点が挙げられる。

## 5.2 実験概要

実験の概要としては  $3[\text{m/s}]$  の速度制御を行い、一定速で直進中に右にステップ状にハンドルを入力する。ハンドル切り角は  $90$  度とした。ヨーレート微分値の台形を作るパラメータ  $P_1$ 、 $P_2$  の値はそれぞれ  $0.25[\text{rad/sec}^2]$ 、 $3[\text{rad/sec}^3]$  とした。実験は制御時と非制御時に分けて行った。また、ジャイロセンサから得られるヨーレートの値は  $10\text{Hz}$  の LPF をかけて制御することとした。

## 5.3 実験結果

ステアリングアングルがほぼ同一であったことを図 5.1 に、速度が同一であったことを図 5.2 に示す。

次にヨーレートに LPF をかけたものと、提案手法によって作り出したヨーレート指示値の値をそれぞれ制御をかけていない場合と、制御した場合について示す。

## 5.4 実験結果の検討

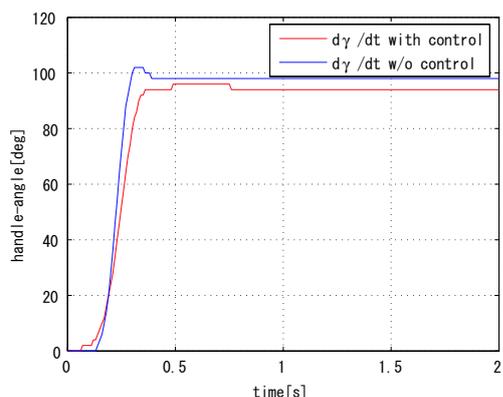


図 5.1: ステアリングアングルの同一性

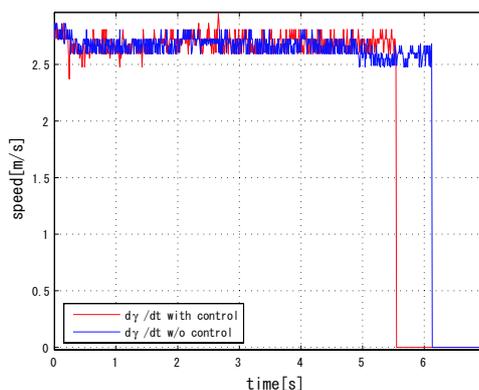


図 5.2: 速度の同一性

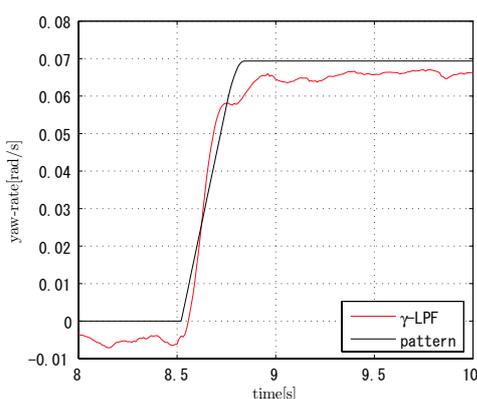


図 5.3: ヨーレートの値 (制御なし)

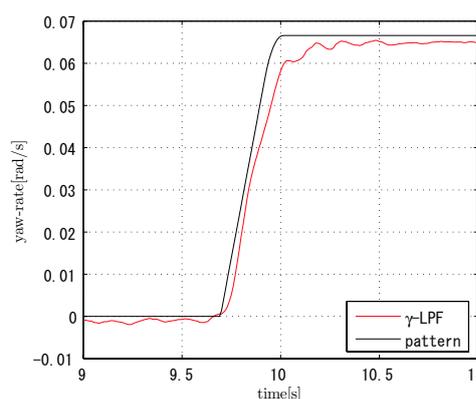


図 5.4: ヨーレートの値 (制御あり)

制御していないヨーレートの値は指示値に近いが、勝手に振舞っているのに対して、制御しているヨーレートの値はヨーレート指示値にほぼ追従しているのが分かる。

最後にヨーレート微分値の値を図 5.5 に示す。

ヨーレート微分値において完全な追従はできなかったが、制御をかけていない場合に比較して制御をかけている場合はヨーレート微分値のピーク値が小さくなっていることが分かる。

## 5.4 実験結果の検討

図 5.5 を見ると、ヨーレート微分値において作成した指示値に追従できずにいることが分かる。パターンを作成した時間以外のノイズの大きさをみると、パターン生成時にノイズがのっているため完全な追従ができなかった、と考えることができる。

ヨーレートの指示値への完全な追従は不可能であった。そのためシミュレーションのようにヨーレート微分値の値で追従させることも不可能であった。今回の実験ではコントローラーのゲインをヨーレートのノイズで発振する値の 0.75 倍程度としたが、それでもヨーレートは指示値には追従しなかった。また、ヨーレートの LPF のカットオフ周波数を下げることとも考えたが、今回の実験で考えているのは前輪操舵角をステップ状に入力したときの過渡応答において、どれだけ乗り心地を良く出来るか、つまりヨーレート微分値のピーク値

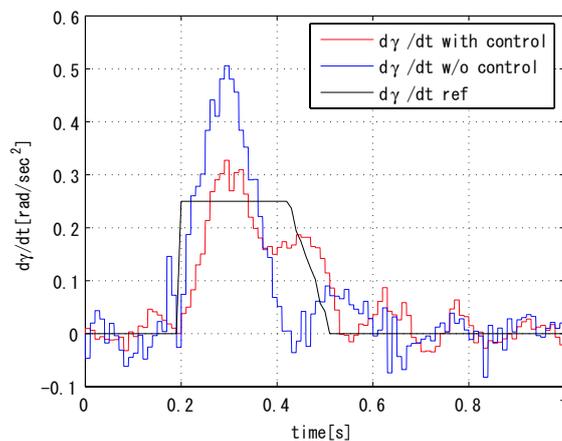


図 5.5: ヨーレート微分値の値

を下げる事が出来るかということであり、LPFのカットオフ周波数をむやみに下げて過渡応答をなまらせ過ぎるのは実験の趣旨に反すると考えた。

ヨーレートの微分値において完全な追従は不可能であったが、確かにヨーレート微分値のピーク値を下げる事ができたのは事実である。これは乗り心地の向上につながると考えられる。実験においても乗り心地の向上が示された、と考えている。

# 第6章 結論

## 6.1 まとめ

まず前輪操舵角  $\delta$  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  $\delta$  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を下げるるとともに、ヨーレート二次微分値の絶対値の値も下げることができた。これも  $\delta$  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。

前輪操舵角をステップ入力する実験においては作成したヨーレート指示値への完全な追従はできなかったものの、ヨーレート微分値の値においてその絶対値のピーク値を下げる事ができた。この点で乗り心地の向上が図られていると考えることができる。

## 6.2 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  $\delta$  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 4.11 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性がある。

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 章において、車両の横滑り角  $\beta$  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  $\beta$  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][5] 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。

## 6.2 今後の課題

---

実験については時間的な制約によりステップ入力のものしか行えなかった。また、ステップ入力の実験ではヨーレートの指示値に対する完璧な追従は行えなかった。今回、ヨーレートの指示値への追従としてFB制御のみを考えていたが、今後はFF項を入れることで追従特性を良く出来る可能性がある。今後の課題としてFF項を入れて実験することを考えたい。

## 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: ”電気自動車のためのドライバ指令変更を考慮したリアルパターン速度生成法”, 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] 王鋒, 佐川貢一, 石原正, 猪岡光: ”乗り心地向上を目的とする自動車運転支援システム”, 電気学会論文誌 D, Vol.122, No.7, pp.730-735, 2002.
- [5] 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.
- [6] 安部正人: ”自動車の運動と制御”, 山海堂, 1992.
- [7] 景山一郎, 阿部正人他: ”「自動車の運動力学」資料集”, 2005.
- [8] 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.
- [9] 堀洋一, 大西公平: ”制御工学の基礎”, 丸善株式会社, 1997.
- [10] 堀洋一, 大西公平: ”応用制御工学”, 丸善株式会社, 1998.

# 謝辞

本論文を書き上げることができたのは、指導教員である堀洋一教授に多忙な身であるにもかかわらず、熱心な指導を頂いたおかげです。先生には専門的な指導はもとより、人間としての在り方・考え方など一生の財産となる信念を教わりました。ここに感謝の意を表したいと思います。

内田利之技官にはコムスの製作を通じて電気の基礎的な技術を身につけさせてもらいました。また研究テーマについて話し相手になってもらったり自動車の構造、モータを壊さない様な実験Cプログラムの書き方などについて、いろいろと指導してもらいました。ここに深く感謝いたします。

越智由里子秘書には事務的な用務で面倒を見てもらい、研究室に明るい雰囲気くれました。ありがとうございます。

研究員の畠直輝さん、呉世訓さんには制御に関してほとんど知識のない私に分かりやすく指導してくれました。畠直輝さんにはLinuxのプログラムの使い方を、呉世訓さんには制御について多くの指導してくれました。ほんとうにありがとうございます。

D2の賀鵬さん、M2の青木良文さん、河島清貴さん、劉小星さん、M1の趙莉さん、研究生の耿聡さんにはEVチームの先輩として自動車工学に関することや研究テーマのことなどいろいろと相談に乗ってくれました。特に青木さんには研究テーマや自動車工学について、河島さんにはコムスの製作から電気の知識を教わりました。また河島さんにはコムスでの実験について、つきそって行ってくれました。深く感謝いたします。

M2の李微さん、呉魯さん、M1の吉田憲吾さん、中村則仁さんは福祉サーボチームでチームが違いましたが、制御についてや、Linuxのことについて教えてもらい、また楽しい話相手になってもらいました。ありがとうございます。

卒論生として同じ一年を過ごした鈴木武海くん、小池卓志くん、金間泰樹くんには楽しい時間を共有できたこと、ほんとうに感謝しています。特に小池くんはテーマが同じ電気自動車の制御のことだったので、実験を一緒に行ったりして、楽しい時間が過ごせました。ありがとうございます。

最後に、この一年間は私にとってこれ以上ない有意義なものとなりました。堀先生をはじめ、研究室の皆さんに感謝したいと思います。ありがとうございました。