

- 修士論文 -

# 電気自動車におけるドライバの意図に 沿ったリアルタイム速度パターンの生成

Realtime Speed Pattern Generation for EVs  
according to Driver's Intention of Traveling

平成19年2月2日提出

指導教員：堀 洋一 教授

東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

56418 趙 莉

## 内容梗概

エンジンより2ケタ近く速いトルク応答性を持つ電気モータを使用する電気自動車は優れた制御性を持ち、速度制御にふさわしい。すなわち、速度パターンを導入することによって通常時や非常時における乗り心地および安全性が向上できる。本研究では、ドライバ指令変更を考慮したSMARTリアルタイム速度パターン生成器(RSSPG)を提案する。RSSPGにおいて、加速度・ジャーク限界を超えない範囲で速やかな加減速が実現できる。さらに、ジャークの変化率に関連するパラメータ $C$ を調整することによって、もっと加速感を求める人やゆっくりとした加速がほしい人など、加速・減速に応じてドライバの異なった運転スタイルや乗客の好みの走行スタイルに合わせることができる。つづいて実際に研究室で保有している電気自動車実験車両“東大三月号II”に速度パターンを適用して運動制御を行い、提案手法の有効性を実証する。

# 目次

第1章	序論	3
1.1	研究背景	3
1.2	本論文の目的	5
1.3	本論文の構成	6
第2章	ドライバの意思推定に基づくドライバ支援システム	7
2.1	人間 自動車系の挙動解析の現状	7
2.2	代表的な人間の操舵制御動作モデル	8
2.2.1	クロスオーバモデル	9
2.2.2	予見・予測制御モデル	10
2.3	人間 自動車系の挙動解析の課題	13
第3章	電気自動車の運動制御における速度パターンの適用	15
3.1	速度パターンを用いた乗物の運動制御	15
3.2	電気自動車への速度パターン適用法の提案	16
3.3	速度パターンを実現するための制御システム	17
3.4	パワーアシスト車いすの走行制御分野の関連研究	19
3.4.1	速度パターン生成のアルゴリズム	19
3.4.2	走行制御実験	22
第4章	乗り心地を向上させる最適制御理論を用いた速度パターン生成法	23
4.1	乗物の乗り心地と定量的評価	23
4.2	最適制御理論を用いた従来の速度パターン生成法	24
第5章	ドライバ指令変更を考慮した速度パターン生成法の提案	27
5.1	SMART リアルタイム速度パターン生成器の制御指令生成アルゴリズム	27
5.2	SMART リアルタイム速度パターン生成器のパラメータの決め方	30
第6章	SMART リアルタイム速度パターンを適用した電気自動車の運動制御実験	32
6.1	実験車両“ 東大三月号 II ”について	32
6.2	“ 東大三月号 II ”による実験	33
6.2.1	実験手法	33
6.2.2	ケース1とケース3の実験結果および転がり抵抗の影響についての考察	34
6.2.3	ケース2とケース4の実験結果および風の影響についての考察	35

## 目 次

---

第 7 章	結言	38
7.1	本論文のまとめ . . . . .	38
7.2	今後の課題 . . . . .	38
7.2.1	ドライバの意図に沿ったパラメータなどの決め方 . . . . .	38
7.2.2	乗り心地の評価 . . . . .	38
7.2.3	二次元運動制御への拡張 . . . . .	39
参 考 文 献		40
発 表 文 献		43
謝 辞		44
付 録 A	RSSPG アルゴリズムのソースコード	45

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

自動車は出発地から目的地までのトータルで考えると大変便利な交通手段であり、社会生活の高度化に大きく貢献している。しかし台数の増加に伴い社会的課題が発生し、交通事故、交通渋滞、燃料消費、排気ガスなどの問題を生じた。自動車に高度な知能を持たせ、ドライバーの運転支援して、安全で円滑で環境に調和した自動車交通を実現できる可能性がある。この観点からインテリジェントな運転支援システムが活発に研究開発されている。

特に、ドライバ特性をふまえた車両システム作りの基本的な考え方としては、人間の適応性に強く依存する車両システムではなく、周りの機械系が、中心となる人間の特性に合わせるというものである。このような考え方には、次に二つの対応が考えられる。

(1) 機械系の基本特性自体を変更

(2) 人間が実施し難い操作を機械が代行

後者は運動支援システムであり、このようなシステム作りを考える場合、その内容によって次に示す6つの段階に分類することができる [1]。

レベル1：ドライバの操作補助に関わるシステム

直接ドライバが行う運転動作の負荷を軽減するためのものであり、古くはギアにおけるシンクロ、AT ( Automatic Transmission )、ブレーキ倍力装置、パワーステアリング ( PS ) がこれに分類され、近年ではクルーズコントロール、レーンキープなどがこれにあたる

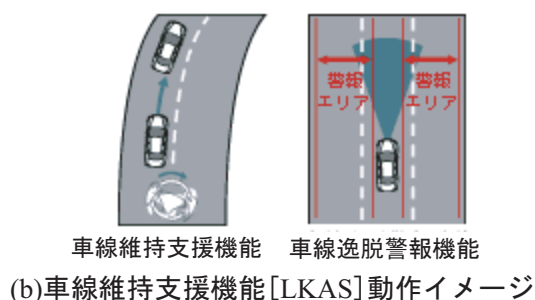
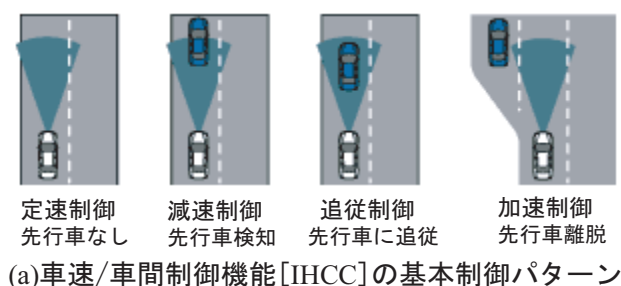


図 1.1: Honda Intelligent Driver Support ( HiDS ) システム

## 1.1 研究背景

図 1.1 に示されたのは HONDA のアコード等に搭載されている HiDS ( Honda Intelligent Driver Support ) システムである [2]。HiDS では、車速を制御して先行車との車間距離を適切に保つ「IHCC ( Intelligent Highway Cruise Control )」と、車線の維持をアシストする「LKAS ( Lane-Keep Assist System )」によって高速道路におけるドライバの運転負荷の軽減を行い、疲労による「うっかり・ぼんやり」といったミスを防ぎ、ひいては事故の防止に寄与する。

### レベル 2：ドライバの能力補助に関わるシステム

安全性向上や車両システムの高性能化を目的として、本来のドライバが持っている能力を向上させる方向で検討されたものである、古くは不整地の走破性向上の目的で計画されている 4WD があげられ、近年ではアンチロックブレーキシステム ( ABS )、トラクションコントロールシステム ( TCS )、後輪操舵 ( 4WS )、横滑り防止システム ( VSC )、ブレーキアシストシステム、暗視装置などがこの分類にあたる。

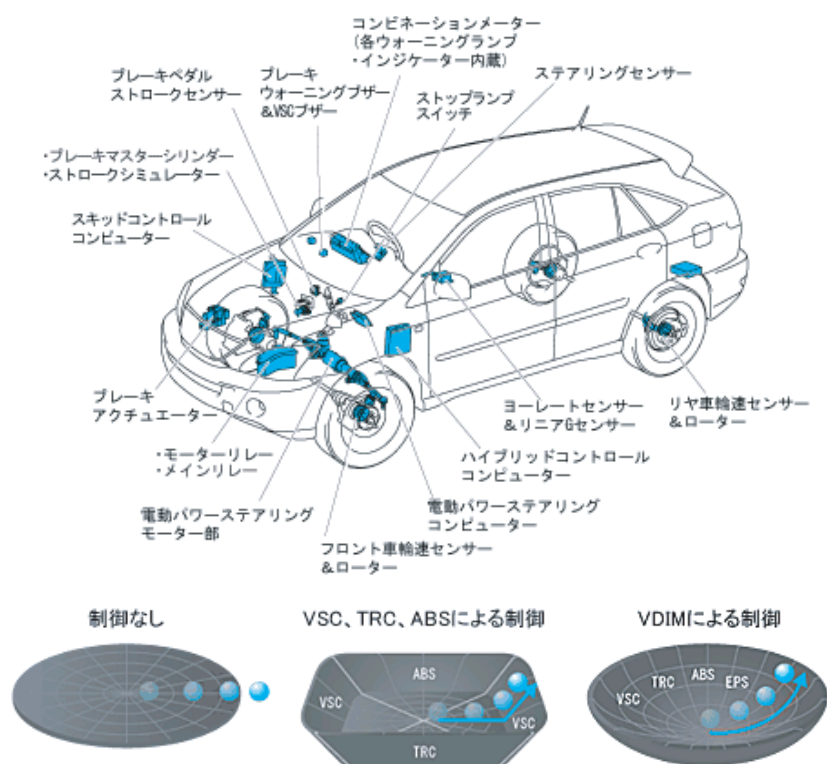


図 1.2: Vehicle Dynamics Integrated Management ( VDIM ) システム

図 1.2 に示されたのは TOYOTA のハリアーハイブリッド等に搭載されている VDIM ( Vehicle Dynamics Integrated Management ) システムである [3]。従来の VSC、TCS、ABS が車両の限界を検知してから制御を開始するのに比べ、VDIM は、アクセル、ステアリング、ブレーキの操作量から予測したドライバーのイメージする車両挙動と、「走る、曲がる、止まる」に関する各種センサーの情報から得られた車両挙動との差を算出し、その差を縮めるように、パワー・ステアリング・ブレーキを統合制御します。その結果、車両の前後左右全方向の運動状態が限界前からアクティブかつシームレスに制御可能となり、高い予防安全性と優れた車両運動性能を実現する。

### レベル 3：ドライバの情報提供に関わるシステム

ドライバに対し、現在の車両状況、種々の環境状況等を伝えるためのものであり、古く

は故障診断装置等があり、近年ではナビゲーションシステム、特定路における道路情報、VICS、側方車両情報、前方路面情報などがこの分類にあたる。

### レベル4：ドライバの状態監視に基づくシステム

現在のドライバの状態をモニタリングし、その情報に基づきサポートを考えるものであり、実際に搭載されるには至っていないが、近年 ITS の分野で種々のものが検討されている。例として、追突警報システム [4]、居眠り警報システム [5]、衝突速度低減システムなどがあげられる。

### レベル5：ドライバの意思推定に基づくシステム

現在ドライバがどのように行動を起こそうとしているのか、また何を望んでいるのかに応じてサポートを考えるものである。搭載されたシステムとしては、ヨーレートフィードバック 4WS で、ドライバが行った操舵に対するヨーレートを推定し、それ以外のヨーレート応答を押さえ安定化させるシステムがあげられる。また将来的には、ドライバの意思とは別に行われた誤動作の防止システムなどが考えられる。

### レベル6：ドライバの情報処理能力に基づくシステム

ドライバの情報処理の違い、能力の低下等に応じサポートの手法を変更するシステムである。例えば疲労・加齢等により操縦能力の低下があった場合、一般のドライバや通常時の動作の変化分に応じた操縦の補償を行うシステムである。

このような各種レベルの運転支援システムが考えられるが、より安全性を考える場合は高次のレベルまでの支援が必要と考えられる。現状ではレベル3までのシステムが導入されている状態であり、レベル4への基礎研究となるために、生体情報計測等の研究が展開されている。また、レベル5、6に対する基礎研究も多くはないものの検討が始まっている。

## 1.2 本論文の目的

近年、電気自動車は環境問題・エネルギー問題の有力な解決策の一つという観点から注目を集めている。今後十年以内に TOYOTA のプリウスのようなハイブリッド車が広く使用され、さらに、21 世紀の半ばで Honda の FCX のような燃料電池車が主流となる。

モータ技術とバッテリー技術の革新に伴い、二次電池のみ搭載する一部の純電気自動車はすでに十分な運動性能が得られるようになってきた。図 1.3 中のエリーカ [6] は、記録挑戦車と公道実験車の2種類があり、前者は最高速度 370km/h、約 7 秒で 160km/h まで加速可能な性能を有している。後者はすでにメンバー取得済で、公道走行が可能である。一方、コルト EV[7] と R1e[8] は近距離移動用のコムーター型電気自動車である。三菱自動車では 2010 年までに軽自動車ベースの電気自動車を発売することを目標としている。また、富士重工業では東京電力などと協力し、軽自動車である R1 を改造した二人乗り電気自動車「R1e」を開発している。東京電力は、軽自動車ベースとした業務用電気自動車を 3,000 台導入することを計画している。

電気自動車はエレベータや電車と同様に電気モータによって駆動される。電気工学および制御工学の観点からみた電気モータの利点は

- トルク応答が早く、正確に把握できる
- モデル化しやすい
- 分散配置が可能



図 1.3: 電気自動車

という3点が挙げられる。[9]したがって、電気自動車には、従来のガソリン自動車にはなかった大きな可能性を見いだすことができる。たとえば、電気モータの高度な制御性をいかした増粘着制御（トラクション制御）や複数輪独立駆動による車両姿勢制御など、電気自動車の利点を活かした様々な運動制御手法が試みられている。これらの可能性をもたらす新たな自由度は、人間操縦系として望ましい特性をもった車両、すなわちより操縦しやすい安全で快適な車の実現につながる。

電気自動車は電気モータを使用するため、速度制御に適している。速度パターンの生成法は、これらの電気モータのもつ制御面の優位性を生かした手法ともいえる。本研究では、従来電車やエレベータなどで用いられた速度パターンによる運動制御を電気自動車にあった形で実現することで、通常時や非常時における乗り心地および安全性の向上で内燃機関車と差別化を図る。具体的にドライバ指令変更を考慮した SMART リアルタイム速度パターン生成器（RSSPG）を提案し、さらに、実際に研究室で保有している電気自動車実験車両“東大三月号Ⅱ”に速度パターンを適用して運動制御を行い、提案手法の有効性を実証する。

### 1.3 本論文の構成

本章では、はじめにドライバ支援システム作りの6つの段階を説明し、そのあとで電気モータの制御面での利点をあげることで電気自動車の制御面での可能性を述べた。第2章では、ドライバの意思推定に基づくドライバ支援システムに関する基礎研究に着目し、代表的な人間の操舵制御動作モデルおよびドライバ支援システムへの応用などについて述べる。第3章では、電気自動車への速度パターン適用の方法について、電気自動車の走行特性に基づいて検討を行う。そして、電気自動車の車両運動モデルおよび速度パターンを実現するための制御システムを説明する。そのあとでパワーアシスト車いすの走行制御分野の関連研究を紹介する。第4章では、乗り心地を向上させる SMART リアルタイム速度パターン生成器（RSSPG）を設計するときに用いられた最適制御理論について紹介する。第5章では、ドライバ指令変更を考慮した RSSPG の生成アルゴリズムを提案し、RSSPG のパラメータの決め方とそれにより柔軟な速度パターン生成の可能性を具体的なシミュレーション例などを通じて示す。第6章では、第5章で提案した手法についての実車実験の結果および考察を述べる。最後に第7章では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。



## 第2章 ドライバの意思推定に基づくドライバ支援システム

### 2.1 人間 自動車系の挙動解析の現状

車両をとりまく環境への厳しい認識とともに、省エネルギーや軽量化に加え、車両の安全性や快適性の向上が望まれている。そして、最近の車両の高性能化に伴い、予防安全性や乗り心地、すなわち、運転のし易さとか乗り易さといったドライバや乗員の感性に訴える微妙な性能特性が特に重要となっている。このような背景のもとに、車両の基本運動や振動性能の設計および評価においては、操縦性、安定性をはじめとする車両運動性能とともに、車両応答に対応して操作するドライバの運転操作挙動をも考慮する必要性が生じている。<sup>[10]</sup>

一方、この分野における研究は、自動車発達のごく初期からそれぞれの時代の技術を背景にたゆまず続けられてきている。そして、ここでは、図 2.1 に示すように、車両走行時の人間の動的特性、いわゆるヒューマンダイナミクスを反映した評価の考え方が必要になる。

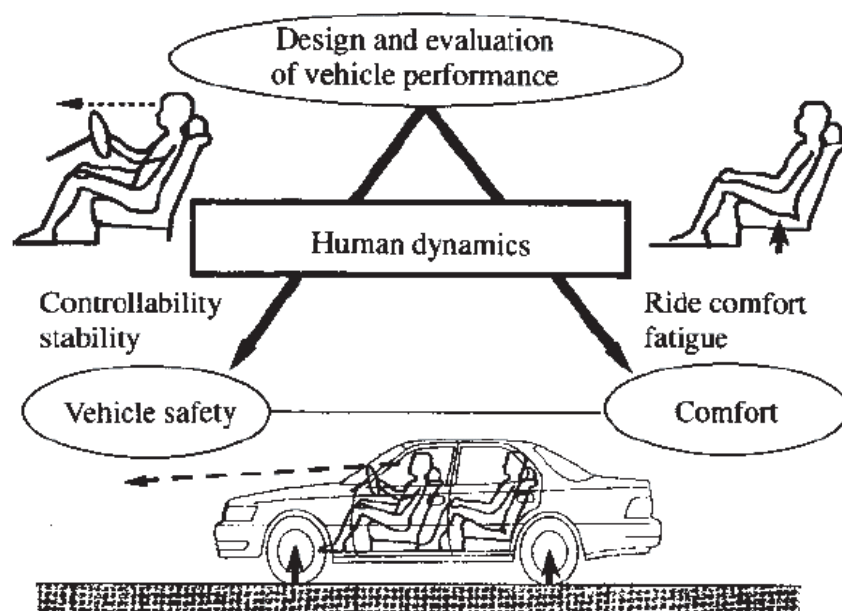


図 2.1: ヒューマンダイナミクス研究の背景

自動車は人間が操縦することにより初めて意味のある運動をする。したがって、自動車の運動性能を検討する場合には、自動車自身の特性を解明するだけでなく、自動車を操縦する人間の特性を知ることが重要である。第1章で述べたように、人間が操縦しやすい自

## 2.2 代表的な人間の操舵制御動作モデル

動車を開発するためにも、人間 自動車系としての特性解析が必要となる。また、ドライバ行動の成功したモデル化およびシミュレーションは、最近のコンピュータベースの車両開発のキーポイントである。たとえば、事故を未然に防ぐためのアクティブセーフティシステムや車両等の設計段階で、モデルのパラメータを調整することによって異なった運転スタイルを持ったドライバの操舵制御動作をシミュレーションできる最適横方向予見モデル [11] を使って、典型および非典型的なドライバの立場からシステムの評価を行うことができる。

ドライバの操縦動作に注目した人間 自動車系の挙動を解析する研究は、1960 年代より活発となり数多くのドライバの制御動作モデルが提案されてきている。そして、航空機や大規模プラントの運転制御といったいわゆるマンマシン系の解析と同様に、その後の制御理論の発達とともに車両のマンマシン系解析として発達してきた。また、各種の制御手法の導入により、種々のタスクにおけるドライバの認知判断および操縦動作のモデル化が進み、基礎的な PID モデルから状態フィードバックモデル、最適制御モデル、さらに、タスクの難易度合いへのドライバの適応性を含めた適応制御モデル、あるいは非線形解析によるモデル化等も近年著しく進展してきている。

## 2.2 代表的な人間の操舵制御動作モデル

この節では、ドライバが自動車の方向制御を行う場合の操縦動作に関する数種のモデルについて、基本となる考え方を紹介する。ただし、ここで人間が認知する信号は視覚によるものだけとしたが、実際には加速度、角加速度などによる運動感覚情報、操舵反力などによる筋肉感覚情報などにも影響される。

人間が目標走行コースの偏差を減少するように修正操舵をするクローズドループ制御モデルで、目標追従のサーボ動作と外乱に対するレギュレータ動作を基本とする。その代表は準線形モデル（線形フィードバック補償操舵モデル）である。

この「準」とは、本来は非線形・非定常である人間の動作の大部分について、その入力と出力の関係は線形であると仮定して、非線形部（個人差やばらつきなど）はレムナントと呼ばれるノイズとして処理を行う線形フィードバック系とみなしている点に起因する。図 2.2 にそのモデルブロック図を、表 2.1 に代表的な人間の伝達関数  $Y_p$  を示す [12]。

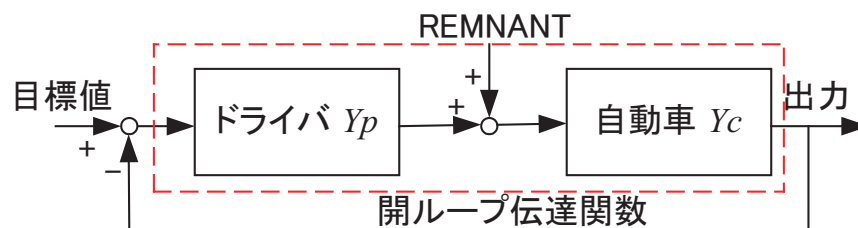


図 2.2: 準線形モデルを用いた操舵制御系のブロック図

図 2.2 中で  $Y_p$  は人間の伝達関数、 $Y_c$  は制御対象の伝達関数である。表 2.1 はいずれも類似機能をもつが、3 番目のモデルを例に人間の制御動作の意味を説明する。

人間の操舵制御の基本は、人間の反応遅れ（むだ時間： $\tau = 0.3s$ ）をもった比例操作である（比例定数： $K$ ）。この動作に、入力の変化を予測する微分動作（微分時間： $T_d$ ）と、定常的なずれの補正を行う積分動作（積分時間： $T_i$ ）が加わったものとする。一般に人間が

表 2.1: 代表的な人間の伝達関数

1	$K \frac{1+Ts}{s} e^{-\tau s}$	Tustin ほか
2	$K \frac{T_1 s + 1}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} e^{-\tau s}$	McRuer&Krendel , 宮島ほか
3	$K(T_d s + 1 + \frac{1}{T_i s}) e^{-\tau s}$	Ragazzini , 井口ほか
4	$K \frac{A_n s^n + \dots + A_0}{s^l (B_m s^m + \dots + B_0)} e^{-\tau s}$	Jackson ほか

大きな負担なしに長時間続けることができる制御動作はむだ時間を含む比例動作にごく弱い微分動作あるいは積分動作を加えた程度と考えられる。[13]

次に、準線形モデルの典型例として、クロスオーバモデル [14] と予見・予測制御モデルを紹介する [16][17][18][19][20][21][22][23]。

### 2.2.1 クロスオーバモデル

車両の特性や走行条件に応じて人間の特性が変化するクロスオーバモデルなどは数式表現としては準線形モデルに属する。

ドライバは通常走行において、図 2.3 に示したように、自動車の特性の違いを吸収してしまい、その応答を同一なものにする傾向がある。その代表が McRuer らによって実験的に見出されたクロスオーバモデルである。[14]

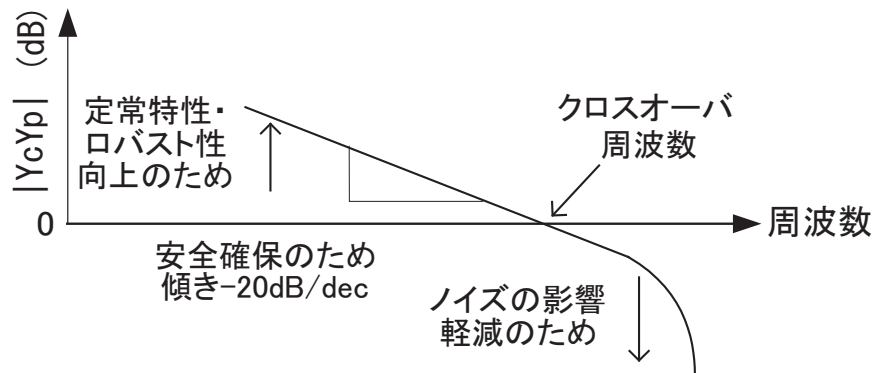


図 2.3: 望ましい開ループ特性

クロスオーバモデルでは、 $Y_c Y_p$  の特性は制御対象  $Y_c$  に依存せず、 $|Y_c(s)Y_p(s)| = 1$  となる周波数  $\omega_c$  (クロスオーバ周波数) 付近では

$$Y_c(s)Y_p(s) = \frac{\omega_c}{s} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

が近似的に成立する。すなわち車両の特性が変化したときに人間は

$$Y_p(s) = K \frac{\tau_l s + 1}{\tau_i s + 1} e^{-\tau s} \quad (2.2)$$

## 2.2 代表的な人間の操舵制御動作モデル

が成り立つようにその特性を調整する。ただし、 $\tau$ ,  $\tau_l$ ,  $\tau_i$  はそれぞれ人間の神経・筋肉系のむだ時間、進み時定数、遅れ時定数を表す。

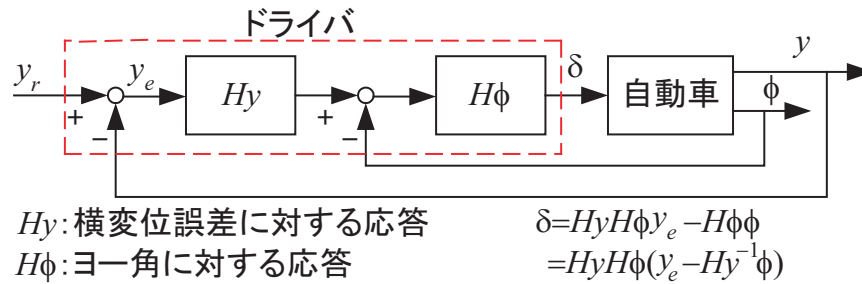


図 2.4: 多重ループモデルのブロック図

McRuer らは直線コースを追従するときの運動を図 2.4 に示したようなヨー角  $\phi$  と横変位  $y$  の二重フィードバック系と考え、それぞれにクロスオーバーモデルが成立するとして人間自動車系の外乱に対する補償制御の解析を行った。[15] その結果以下のことがわかった。

- (1) 車両の遅れが増加すると、人間の進み補償が増加する。
- (2) 車両の特性によらず、クロスオーバー周波数  $\omega_c$  はほぼ  $3.8\text{rad/s}$  である。
- (3) 車両のヨー時定数が減少すると、系の位相余裕が増加する。

### 2.2.2 予見・予測制御モデル

ドライバーは前方を注視すること（予見）によって得られる目標コースの前方の状況と、自動車が前方に到着した時に生ずるであろうと予測される横変位との差に基づいて操舵していると考えられる。このような考えに基づいたモデルが近藤により前方注視モデルとして初めて提案されたが [16]、その後種々の改良が加えられており [17][18][19]、現在ドライバーモデルとして最も広く用いられているものである。

#### 前方注視モデル

図 2.5 に示したように、ドライバーはまっすぐ前方  $L_m$  先を注視しているとする。これにより、 $L_m$  先における目標コース  $y_r$  を予見できる。また、自動車が現在の姿勢のまま  $L_m$  進むとしたときの横変位  $y + L\phi$  を予測できる。よって、両者の偏差  $\epsilon$  を検知できるので、これをゼロにするように操舵することが可能となる。直線に近い目標コースであれば、車体ヨー角  $\phi$  は小さいので、前方注視点での目標コースからの偏差  $\epsilon$  は次式のように求められる。

$$\epsilon = y_r - (y + L\phi) \quad (2.3)$$

さらに、このモデルでは偏差  $\epsilon$  に比例した修正操舵を行うので、操舵角は

$$\begin{aligned} \delta &= K\epsilon e^{-\tau s} \\ &= K(y_e - L\phi) e^{-\tau s} \end{aligned} \quad (2.4)$$

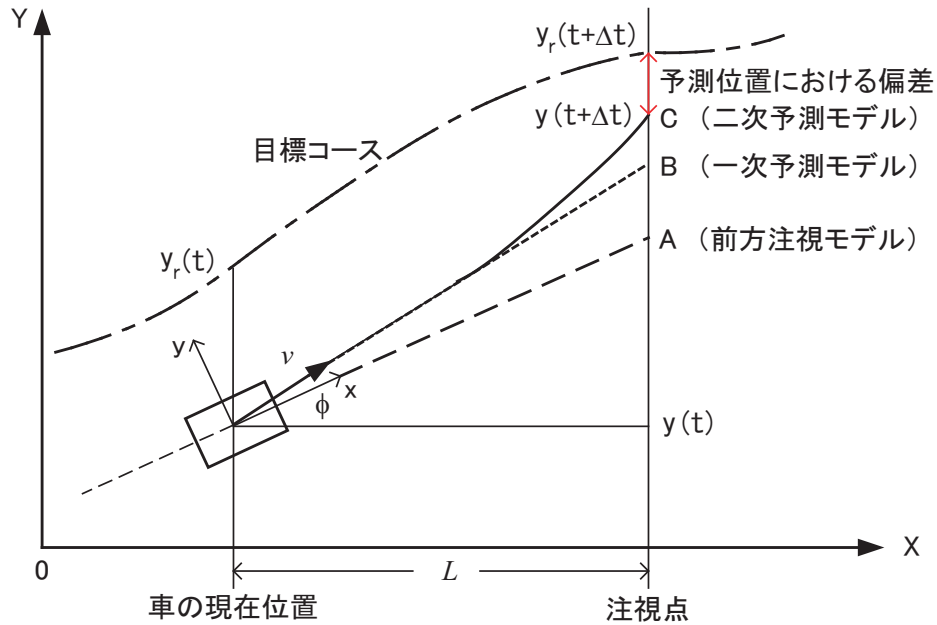


図 2.5: 予測・予見モデルの予測位置

と数式上図 2.4 の多重ループモデルと似たようなものになる。

さらに複雑な予測を行うと考えるモデルも検討されている。

### 一次、二次予測モデル

ある時間  $t$  における車両の状態量から  $\Delta t$  秒後の状態を推定する。現在の車両の横変位を  $y(t)$  とすると、 $\Delta t$  秒後の横変位はテイラー展開により次式のように求められる。

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \dot{y}(t)\Delta t + \frac{1}{2!}\ddot{y}(t)\Delta t^2 + \frac{1}{3!}y(t)^{(3)}\Delta t^3 + \dots \quad (2.5)$$

これは現在の横変位と予測項の横方向速度、横方向加速度、横方向ジャーク等を用いて将来の横変位を予測することを意味している。

式 (2.5) の右辺第 2 項までで将来予測するモデルを一次予測モデル、第 3 項までで予測するモデルを二次予測モデルと呼ぶ。

図 2.6 に示したように、前方注視モデル、一次予測モデルと二次予測モデルは基本的には同じで、将来位置の予測方式が違っている。いずれにしても、注視点における将来の目標コースと予測された横変位との偏差に応じて操舵を行う。

しかし、曲率の大きな曲線に沿って高速で走行する場合、二次予測モデルの方が実際のドライバによる操舵運動に近い挙動を示す。

### 最適横方向予見モデル

上述したように予見予測モデルでは、追従と補償作用を使いながら、フィードフォワードモデルを組み込むことによって人間の予見予測行為を真似する。今後の予見情報を使ったドライバモデルは近似の逆制御動作を生成でき、その結果、伝達関数モデルと比べて優れた

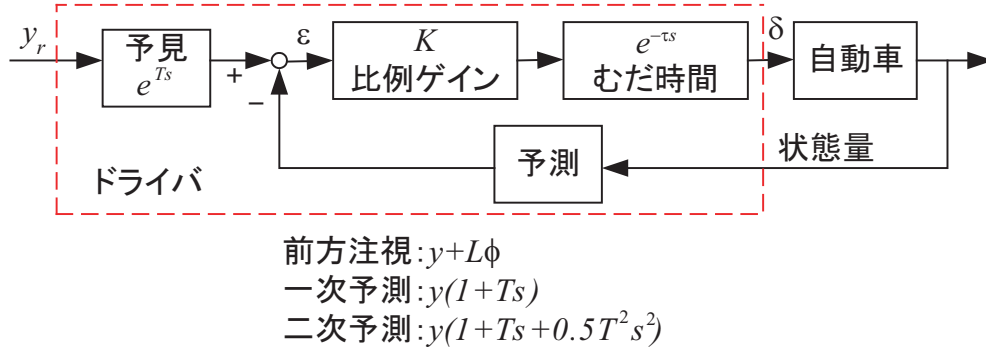


図 2.6: 予測・予見モデルのブロック図

制御性能が得られたことが多い。特に、高い横加速度が要求される経路追従タスク（例えば急なカーブあるいはダブルレーンチェンジ操作）によく当てはまる。その中、「ドライバが遅れを持っている最適予見コントローラのように行動する」と仮定した MacAdam により提案されたモデル [20] は最も実証されたモデルの一つでもあり、ここで簡単に紹介する。

MacAdam モデルは SISO 線形システムの最適予見制御に基づき導かれたのである。車両の状態方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.6}$$

以下の 2 次形式評価関数を最小化する制御（操舵）信号が解かれる。

$$u_{opt}(t) = \min_u \left\{ \int_t^{t+T_p} \{ [y_d(\eta) - y(\eta)]^2 \delta(\eta - t) \} d\eta \right\}\tag{2.7}$$

ただし、 $y_d(t)$ 、 $y(t)$ 、 $T_p$ 、 $\delta(t) > 0$  はそれぞれ目標横変位、横変位の実測値、予見時間帯と予見時間帯の重み関数である。簡単のため、 $u(t + \tau) = u_{opt}(t)$ 、 $\forall \tau \in [0, T_p]$  を仮定する。よって、式 (2.6) の線形ダイナミクス方程式の出力はゼロ入力応答とゼロ状態応答に分解され、

$$\begin{aligned}y(t + \tau) &= Ce^{A\tau}x(t) + C\left(\int_0^\tau e^{A\eta}d\eta\right)Bu(t) \\ &\equiv F(\tau)x(t) + G(\tau)u(t)\end{aligned}\tag{2.8}$$

式 (2.8) を式 (2.7) に代入し、 $u$  に関する評価関数  $J$  の偏導関数をゼロとおくと、式 (2.7) の最適解が得られる。

$$u_{opt}(t) = \frac{\int_t^{t+T_p} \{ [y_d(\eta) - F(\eta - t)x(t)]G(\eta)\delta(\eta - t) \} d\eta}{\int_t^{t+T_p} G(\eta)^2\delta(\eta - t)d\eta}\tag{2.9}$$

上で示された最適解  $u_{opt}(t)$  は、一つの時刻より  $[t, t + T_p]$  という予見時間帯において予測したゼロ入力出力と目標出力との差に基づいた比例フィードバックコントローラと見なされる。この「予見比例制御」は、平均的なドライバ行動をうまく近似できる制御法則に結びつけることができ、すでに商用のソフトに実装された。



### 加減速を含むドライバモデル

以上のように操向制御のみに関するドライバモデルでは、本来車両が有する自由度が制限されており、複雑な技術機構を備えた車両性能評価には、問題を単純化過ぎており適用には十分でなく、より多角的な方面から車両・ドライバ双方の特徴を抽出した新しいドライバモデルの構築がなされなければならない。そこで以下のような加減速を含むモデルが提案されている。[21][22][23]

#### 操向制御モデル

$$\delta T(k) = \delta T(k-1) + K_T e \quad (2.10)$$

ここに、 $\delta T()$ ：操舵トルク、 $K_T$ ：操舵トルクゲイン、 $e$ ： $\tau_g$  秒後の予測位置偏差。  
速度制御モデル

$$\begin{aligned} (\text{アクセル}) : U_a(k) &= U_a(k-1) + K_a(v_m - v_e) \\ (\text{ブレーキ}) : U_b(k) &= U_b(k-1) + K_b(v_e - v_m) \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここに、 $U_a()$ ：アクセル開度、 $K_a$ ：アクセル操作ゲイン、 $U_b()$ ：ブレーキ圧、 $K_b$ ：ブレーキ操作ゲイン、 $v_m$ ： $\tau_v$  秒後の予測車速、 $v_e$ ： $\tau_v$  秒後の目標車速。ただし、アクセルとブレーキは同時に操作しないものと仮定する。

さらに、[23]においては、テストコース上に設置したカーブ路での実車走行試験結果を用いて、上記のドライバモデルの実車検証を行った。旋回走行時における加減速操作モデルでは、カーブへの進入退出時に操向制御と車両速度制御にドライバの予測・体感依存行動とがどのように関与するかが問題となる。例えば、ドライバはハンドルトルクと角度の協調制御を行い、加減速操作は一定加速度で行おうとする傾向がある。特に、後者はドライビングシミュレータの実験結果に基づいて構築された従来のモデルでは触れられていない。これは、シミュレータが継続的な加速度を（違和感なく）生じさせることが難しいため、実走行に比べてドライバが加速度を十分に感じられていないためであると思われる。

## 2.3 人間 自動車系の挙動解析の課題

ドライバの制御動作のモデリングは、近年の事故予防への関心の高まりとともに、対象とする走行条件も緊急回避挙動等に向けられるようになってきている。緊急回避時のモデル化についての検討結果を紹介する研究例 [24] では、実車両の走行試験における操縦動作挙動の解析結果より、ドライバモデルをまさに図 2.6 に示すような構成とした。すなわち、ドライバは将来の車両位置・挙動を予測し、目標コースとの偏差を最小にするよう操縦するという仮定のもとに、予測機構、目標生成機構および制御機構を合わせ持つ形である。実験では、運転技能の異なるドライバによる走行を行い、技能差の操舵動作への影響を把握し、モデルによる模擬を試みた。実験と計算結果は図 2.7 に示すようにほぼ一致し、熟練者と一般のドライバの運転技能差も表現しうることが分かる。

一方、旋回走行時のみならず直進走行時の減速操作を含むモデル化に関する研究も、オートドライブや車間距離警報などの運転支援装置の開発に関連して重要な課題となっている。高速道路などの先行車追従走行時の後続車のドライバの減速動作モデルの例 [25] では、減速

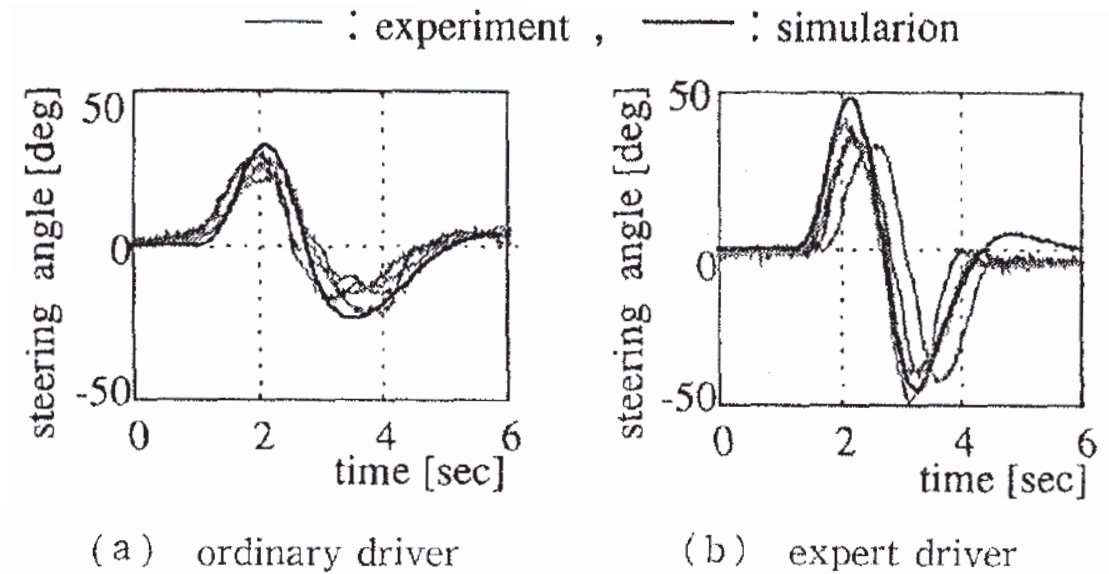


図 2.7: 実験と計算結果の比較 (時速 80km)

行動を詳細に調べドライバの操作タイミングを状態遷移形モデルとして解析している。これらの研究におけるドライバの認知・判断の解析は、ドライバと車両とのインターフェイスをどのように構築するかを示すために重要な課題の一つである。

ところが、ここで議論されたドライバモデルは人間認識・経路計画などを考慮していないため、全体の運転タスクにおいては比較的に下位の位置づけとなる。このように今後も、より統合的なドライバモデルをいかに構成するかということはドライバ支援システム開発における大きな課題である。すなわち、種々の走行条件および走行タスクによってさらに詳細なモデル化が必要となってくる。回避運転動作に加え、人間の認知判断に係わる複雑な行動モデルと人間の運転心理や生理の機構に根ざした明解なモデルが今後の展開に待たれる。車両開発においても、さらに安全な車両制御の在り方についての検討が、車両制御を含む人間 自動車系としてなされなければならない。



## 第3章 電気自動車の運動制御における速度パターンの適用

### 3.1 速度パターンを用いた乗物の運動制御

速度パターンとは加速度・速度・位置・時間・乗り心地・エネルギー効率などの要求や制限に基づいて乗物の速度を計画し、実現するものである。[26] 速度パターンを生成し制御を行う手法は主に電車やエレベータに用いられてきた。電車やエレベータは専用の線路上を走行し、発着地点があらかじめ決められている。また、線路は定期的に管理・補修され、状態をある程度保つことが可能である。消費エネルギー効率の面から考えた場合、電車やエレベータでは走行環境が管理されており、最適な走行パターンを得やすい。また、乗り心地に影響する加速度や発進・停止時のショック、振動などを考えても、タイヤや発着場所などが正確にわかっておりパターンの生成がやりやすい。[27]

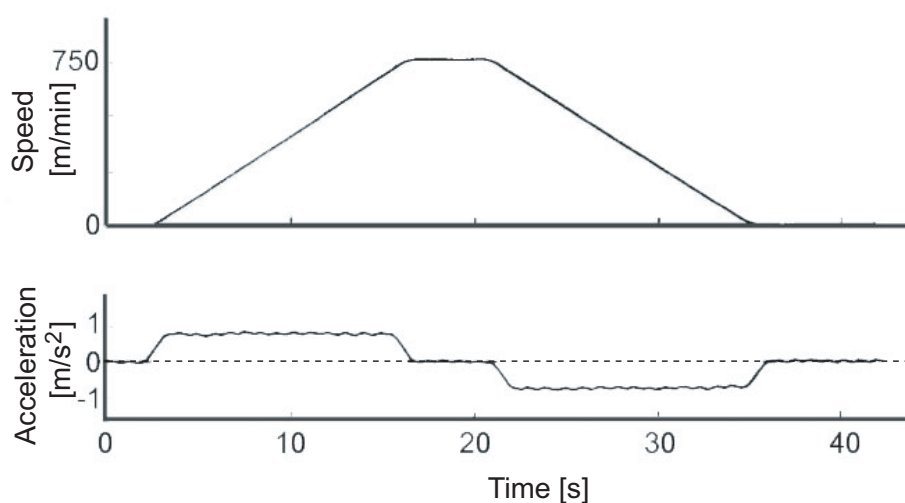


図 3.1: 横浜ランドマークタワーのエレベータ運転曲線

一方、電気自動車は電車やエレベータと同じく電気モータによって駆動されている。電気モータの特長としてトルク応答が早く、モデル化しやすいこと、分散配置が可能なことなどがあげられるが、速度パターンによる制御はこれら電気モータの特性を活かした手法であると言える。

しかし、自動車ではエレベータや鉄道と異なり軌道や目的地が定まっていないことが多く、一般道路走行時には頻繁に加減速が要求される。信号に伴う発進・停止や右左折、車線変更、周りの車に合わせた走行など、自動車の走行は加減速から成り立っているといっても過言ではない。よって、加減速に伴う振動は乗り心地に大きな影響を与える。[28] 自動

### 3.2 電気自動車への速度パターン適用法の提案

車の加減速時における乗り心地を向上することは、自動車走行全体での乗り心地を向上することと同義である。また、加減速時は電気自動車にとってもっとも出力が大きくなるときでもあるので、ここでの改善は性能を大きく上げることが期待される。そして、安全性を考えるとより速くて滑らかな減速が非常に望ましいことである。

さらに、鉄道では専門の技量を持つ運転者がいるが、自動車ではドライバーの技能も運転の好みも千差万別である。第2章で述べたように、環境と車両とが人間を介してはじめて有機的に統合され、予測しやすい安全なしかも快適な走行環境が実現することができる。よって、ドライバによる操作への支援を含めたドライバの意図に沿う走行の実現は自動車に速度パターンを適用するときの重要な課題となっている。

この章では、ドライバ支援システムの一例として、電気自動車への速度パターン適用の方法について、電気自動車の走行特性に基づいて検討を行う。そのあとでパワーアシスト車いすの走行制御分野の関連研究 [29] を紹介する。

### 3.2 電気自動車への速度パターン適用法の提案

図 3.2 のように電気自動車における速度パターンを適用した運動制御は、ブレーキ・アクセルの踏み具合によるドライバの意思推定、速度パターンの生成、生成された速度パターンを用いた車両運動制御、の3つの部分からなる。[26] これによりドライバの運動技能の差を埋め、次の2点を達成することで乗り心地だけでなく安全も向上させる。

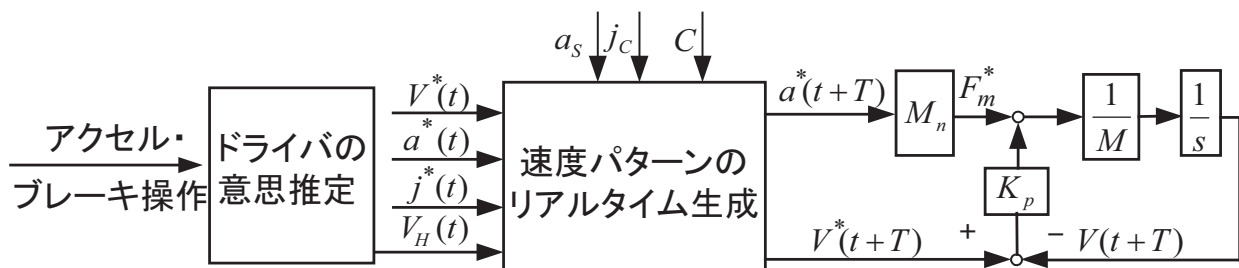


図 3.2: 速度パターンによる電気自動車の運動制御

#### (1) ドライバの意図に沿った速度パターンの生成と走行の実現

ドライバによる乗り心地の評価は、ドライバの走行イメージに沿った速度パターンが生成され、その通りの実行が実現されることで向上すると考える。通常走行時には、アクセル・ブレーキ操作によって車両の加速度が変えられる。しかし、実際ドライバ本当の目的は加速度自体ではなく、速度を変えることである。すなわち、ドライバはより速いスピードを出したいとき、もっと強くペダルを踏めばいい。したがって、ドライバの要求する最終速度  $V_H$  はアクセルの踏み量に関係してくると思われる。

RSSPG を用いることによって、ドライバは常に新しい最終速度の指令値を指定するだけで、よりいい加速・ブレーキの伝達ダイナミクスを得るためにペダルを注意深く調整する必要がなくなる。よって、RSSPG は将来電子制御方式による運転システムの革新的な操作方法になると考える。

ドライバの運転技能は人によって大きく異なり、アクセル・ブレーキ操作が必ずしもドライバの走行イメージに沿ったものであるとは限らない。たとえば、未熟なドライバのた

### 3.3 速度パターンを実現するための制御システム

めの運転支援システムや自動運転システムを考慮すると、乗り心地だけでなく、操作性と安全性も速度パターンの適用によって改善できる。それは、速度パターンを適用した運動制御によってドライバによる操作を支援することで、ステアリング操作や周囲状況により注意を傾けることができるからである。

#### (2) 滑らかかつ速やかな加減速

加減速の切り替え時に加速度・ジャークの変動を抑制することは非常に重要である。加速度・ジャークの連続性を持つ速度パターンの生成が滑らかな走行を実現させる。同時に、安全性と乗り心地を損なわない範囲で加速度・ジャークの値を大きくとることで、速やかな加減速が行える。

図 3.2 の残りの部分は、提案された速度パターンを実現させる制御システムを示している。加速度フィードフォワード制御により生成された速度パターンに対する追従性と速度フィードバック制御により外乱に対するロバスト性の双方を向上することで、ドライバにかかる運転負荷を軽減する。その詳細は次の節で述べる。

### 3.3 速度パターンを実現するための制御システム

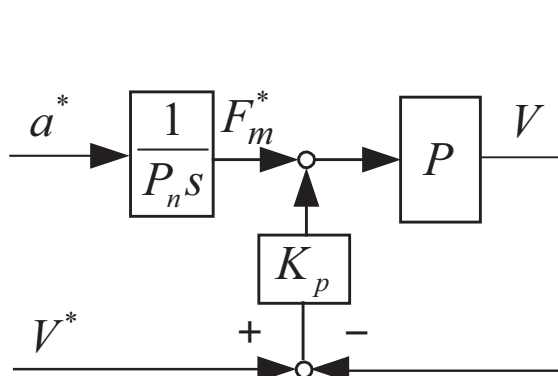


図 3.3: 制御システムのブロック図

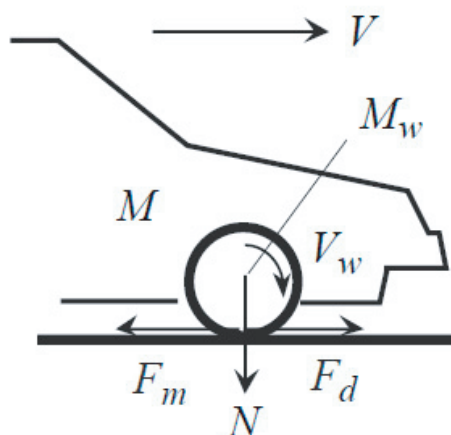


図 3.4: 車両の一輪モデル

提案した速度パターン生成法を用い、自動車の運動制御を行う際のブロック図を図 3.3 に示す。提案手法では速度パターンとともに加速度パターン・ジャークパターンが得られる。パターンに対する追従性と外乱に対するロバスト性の双方を向上するために、加速度フィードフォワードと速度フィードバックからなる制御系を使用する。

$P_n$  をノミナルプラントとおけば、

$$P_n = \frac{1}{(M_n + M_{\omega n})s} \quad (3.1)$$

と書くことができる。ただし、 $M_n$  は車両のノミナル質量であり、 $M_{\omega n}$  はタイヤと付随する回転部とを合わせた部分のノミナル慣性  $J_n$  の質量換算値である。

一方、図 3.3 中の制御対象プラント  $P$  は実際の実験車両で、シミュレーションで図 3.4 に示す前後方向の車両運動を取り扱う車両の一輪モデルとする。ただし、 $V$  は車体速度であ

### 3.3 速度パターンを実現するための制御システム

る。 $F_d$  はタイヤから路面に伝わる力であり、同時に路面からタイヤへの反力である。車両の運動方程式と、タイヤ回転の運動方程式は、それぞれ、

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) \quad (3.2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - F_d(\lambda)r \quad (3.3)$$

と書くことができる。但し、車両の質量を  $M$ 、タイヤと付随する回転部とを合わせた部分の慣性を  $J$ 、その回転角速度を  $\omega$ 、モータトルクのホイール軸における値（つまり、ギア比倍された値）を  $T_m$ 、タイヤ半径を  $r$  としている。ここではこの方程式の次元を揃えるために、式 (3.2) の次元を式 (3.3) に合わせておく。すなわち、ここでは  $J$  の質量換算値  $M_\omega$  と、 $\omega$  の速度換算値  $V_\omega$ 、モータトルク  $T_m$  の力換算値  $F_m$  をそれぞれ、

$$M_\omega \equiv \frac{J}{r^2}, \quad V_\omega \equiv \omega r, \quad F_m \equiv \frac{T_m}{r} \quad (3.4)$$

と定義する。これにより、一輪モデルの運動方程式は改めて、

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) \quad (3.5)$$

$$M_\omega \frac{dV_\omega}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \quad (3.6)$$

と書くことができる。ここで、車体の制駆動力は図 3.4 の中  $N = Mg$  で与えられる垂直抗力  $N$  と路面摩擦係数  $\mu(\lambda)$  の積で、

$$F_d = N\mu(\lambda) \quad (3.7)$$

のように与えられる。路面摩擦係数  $\mu(\lambda)$  のことを  $\mu - \lambda$  曲線と呼び、タイヤのスリップ率  $\lambda$  の非線形関数である。さらに、路面によって大きく変動する。

スリップ率は、

$$\lambda = \begin{cases} \frac{V_\omega - V}{V_\omega} & : \text{駆動時} \\ \frac{V_\omega - V}{V} & : \text{制動時} \end{cases} \quad (3.8)$$

という定義である。 $\mu - \lambda$  曲線としては、Magic Formula[30] と呼ばれるモデル式が知られている。図 3.5 は典型的な  $\mu - \lambda$  曲線の例である。

最後に、図 3.3 中の  $K_p$  は比例フィードバックコントローラである。本研究では、速度パターンの適用による運動制御の改善と乗り心地の向上が目的であるため、簡単な比例ゲインのみのフィードバックコントローラを用いる。このとき速度指令  $V^*$  から速度  $V$  までの伝達関数は

$$\frac{V}{V^*} = \frac{(M_n + M_{\omega n})s + K_p}{(M + M_\omega)s + K_p} \quad (3.9)$$

と表される。ノミナル値  $M_n$  と  $M_{\omega n}$  を実際の値に近く同定できれば、速度指令から速度までの伝達関数は 1 に近づく。

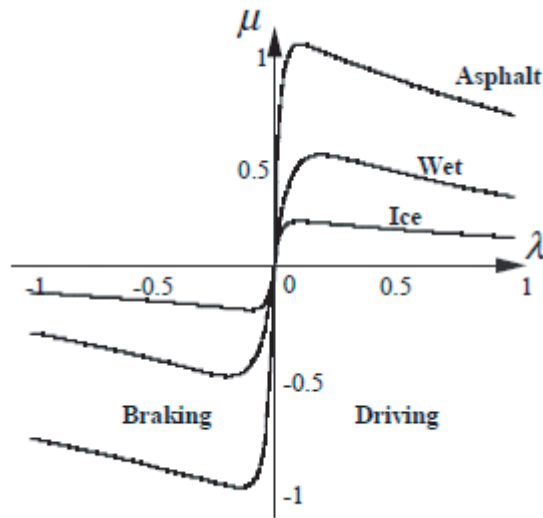


図 3.5: 典型的な  $\mu - \lambda$  曲線

### 3.4 パワーアシスト車いすの走行制御分野の関連研究

[29] では、図 3.6 に示すような電動パワーアシスト車いすの一走行制御法として、加速度と加加速度の瞬時値をリアルタイムに直接制限した速度パターンを柔軟に生成する手法を提案した。滑らかな加減速を伴う走行が実現されれば、乗り心地向上だけでなく、急加速等による危険な前輪浮上や後方転倒現象などを未然に防止することも期待できる。また、この速度パターンが人間の入力トルク情報を十分反映したものとして生成された。具体的には、トルク入力の時間を車いすの加速時間に、トルク入力の大きさを走行距離に反映させるようにして速度パターンを生成した。

#### 3.4.1 速度パターン生成のアルゴリズム

##### 加加速度生成法

人間のトルク入力  $T_h$  が増加している間は、操作者は加速する意志があると考えられ、加加速度  $\alpha$  を傾き  $A_0$  として直線的に増加させ、最大値  $\alpha_{lim}$  で制限する。

$$\alpha(t) = A_0 t + A_1 \quad (3.10)$$

その後、トルクが減少すると共に  $\alpha$  も減少させ加速を終了する。これらはともに一次関数として実現する。なお実際には、人間が漕ぐ動作を終えトルクを弱めていることを確実に判断するため、入力トルクが最大値からある値以上（たとえば、 $0.1[\text{Nm}]$ ）下がったら  $\alpha$  を減少させるようにする。これはノイズ対策にもなりうる。

$\alpha$  は制限値  $\alpha_{lim}$  まで減少させ再び 0 に戻すが、図 3.7 に示すように、 $\alpha$  が正と負で対称的な波形となり、加速度は 0 に戻る。一回の加速について、加加速度は増加、減少、増加と式が変化するが、式 (3.10) の  $A_1$  の値はそれぞれに応じて変わる事となる。このようにして加加速度信号を生成できれば、制御系への指令値として必要な加速度、速度の値は、例えば式 (3.10) に対して、次式に示すように単純な積分操作によって生成することができる。

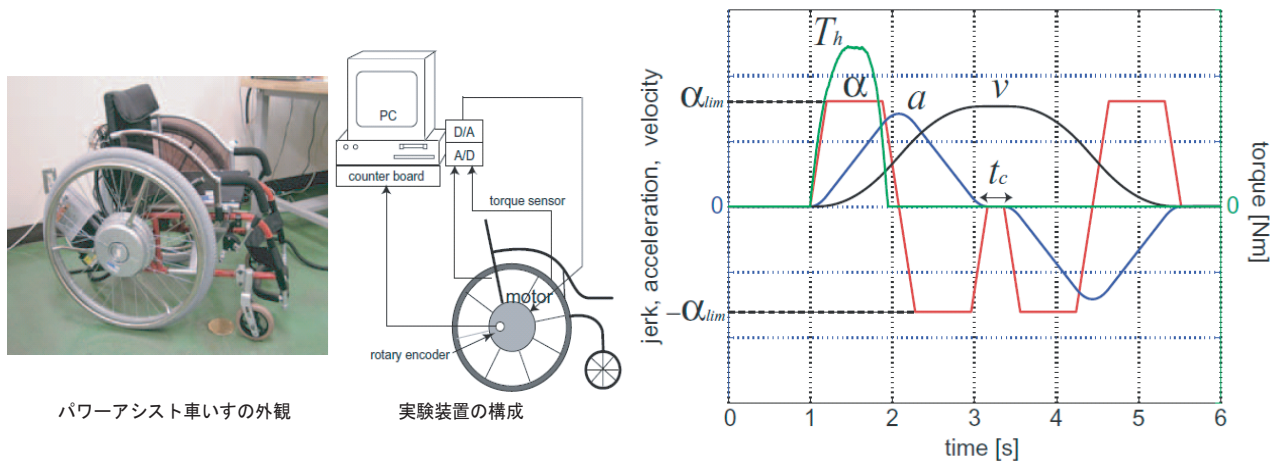


図 3.6: パワーアシスト車いすの実験装置

図 3.7: リアルタイム加加速度の生成

$$a(t) = \frac{A_0}{2}t^2 + A_1t + A_2 \quad v(t) = \frac{A_0}{6}t^3 + \frac{A_1}{2}t^2 + A_2t + A_3 \quad (3.11)$$

係数  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  は初期条件によって決まる。線形な加加速度を生成するために  $A_0$  の値は  $A$ ,  $-A$ ,  $0$  とする。

#### 加加速度制限の考慮

人間のトルクが増加している間は  $\alpha$  を増加させるが、加加速度制限値を設定すれば、たとえ人間のトルクがまだ増加していても  $\alpha$  を  $0$  に減少させる必要がある。そこで、図 3.8 に示すように、人間のトルクが増加していても時間  $t_a$  で  $\alpha$  を  $0$  に戻し、一定加速度走行を保つ。その後トルク減少を始めれば、 $\alpha$  を負の制限値まで減少させることで加速度を  $0$  に戻す。時間  $t_a$ 、加速時の加加速度制限値を  $a_{lim}^a$  として次式のように表現できる。

人間のトルク入力の仕方を走行に反映させる必要があるが、「加加速度生成法」と「加加速度制限の考慮」の手法では、人間がハンドリムを素早く漕ぐかゆっくり漕ぐかという動作を走行の加速時間に反映させているといえる。

$$t_a = \frac{a_{lim}^a}{\alpha_{lim}} + \frac{\alpha_{lim}}{A_0} \quad (3.12)$$

#### 等速走行時間の決定

トルク入力  $T_h$  の大きさは、操作者が長く遠くまで走行したいかどうかという、走行したい距離に反映させるべきであると考えられるため、ここでは、最高速度をもって等速で走行する時間  $t_c$  を入力トルクの最大値  $T_m$  により決定する。 $T_m$  は図 3.7 にも示すように、入力トルクが減少し  $\alpha$  を減少させ始めるまでの時点で決定されている。ここでは次式のように単純な比例関係によって決定することとする。

$$t_c = \beta \times T_m \quad (3.13)$$



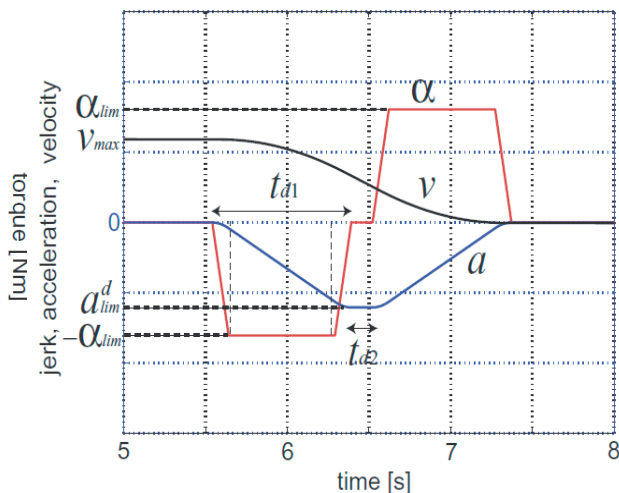


図 3.9: 減速パターン生成

加加速度を負、ゼロ、正の順に一次関数として次式のように生成することによって停止に向かう。

また、減速時の加速度の制限値を  $a_{lim}^d$  とすれば、 $\alpha$  を 0 にするまでの時間  $t_{d1}$  と一定減速時間  $t_{d2}$  は次式で計算される。

$a_{lim}^d$  の値は加速時の制限値  $a_{lim}^a$  と同じである必要はなく、柔軟に様々な速度パターンを生成することができる。

- 1) 人間がトルク入力を始めたら、式 (3.10) で  $\alpha$  増加
- 2)  $\alpha_{lim}$  に達したらその値で制限
- 3) 時間  $t_a$  で  $\alpha$  が 0 になるように減少
- 4) 人間の入力トルクが減少し始めるまで 0 に保つ
- 5) 人間の入力トルクが減少し始めたら  $\alpha$  を負のほうへ減少させ  
時間  $t_a$  で  $\alpha$  を再び 0 に戻す
- 6) 時間  $t_c$  の間、 $v_{max}$  で等速走行
- 7) 式 (3.14) で  $\alpha$  を減少し  $-\alpha_{lim}$  で制限

- 8) 時間  $t_{d1}$  で  $\alpha$  が 0 に戻るように増加
- 9) 時間  $t_{d2}$  の間、 $\alpha = 0$
- 10)  $\alpha$  を増加させ  $\alpha_{lim}$  で制限、時間  $t_{d1}$  で  $\alpha$  が 0 に戻るように減少

### 3.4.2 走行制御実験

提案手法による走行実験を図 3.6 に示すような実機を用いて行う。実験は屋内の平坦面上で行う。最初に、各パラメータを  $\alpha_{lim} = 1.0[m/s^3]$  ,  $a_{lim}^a = 0.75[m/s^2]$  ,  $a_{lim}^d = -0.4[m/s^2]$  ,  $A_0 = D_0 = 10$  ,  $\beta = 0.1$  とした時の走行実験結果について右輪の各データを図 3.10 に示す。図中の  $T_h^r$  ,  $v$  はそれぞれ右輪に関する人間の入力トルクと速度応答である。

時間  $t = 2.1[s]$  で加速度が制限値の  $0.75[m/s^2]$  に達したが、人間はまだトルクを入力して加速しようとしているため、トルクが減少し始める  $t = 2.7[s]$  までこの値が維持されている。最高速度  $1.1[m/s]$  まで上昇し、等速走行ののち減速している。全体のアシスト走行として滑らかで安定した走行が実現できていることもわかる。

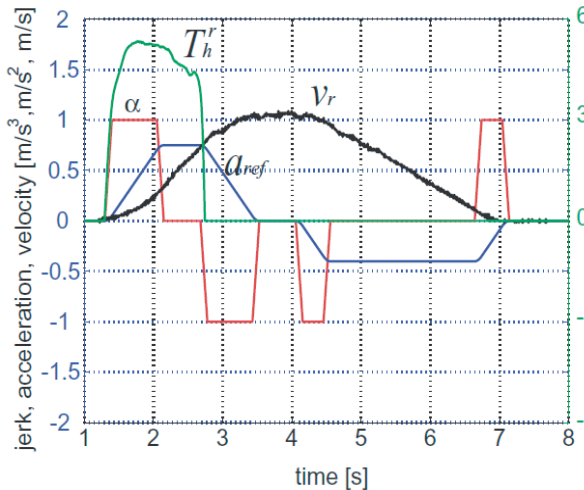


図 3.10: 実験結果 (I)

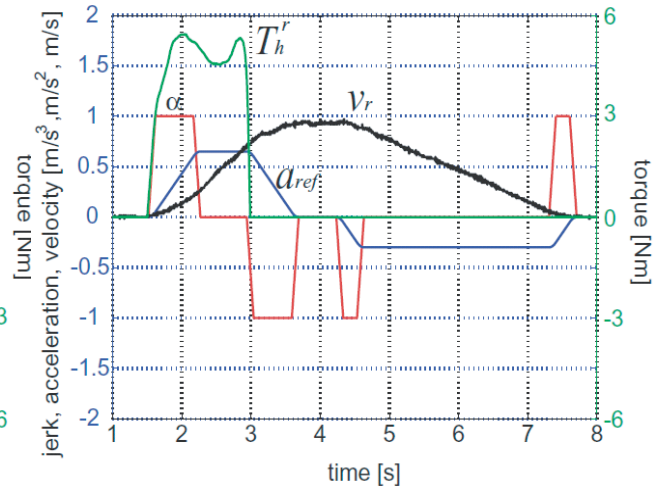


図 3.11: 実験結果 (II)

次に、先の実験からパラメータを  $a_{lim}^a = 0.65[m/s^2]$  ,  $a_{lim}^d = -0.3[m/s^2]$  に変えた場合の走行実験結果の右輪のデータについて図 3.11 に示す。先ほどの実験よりもゆっくり加速し、ゆっくり減速する速度パターンが生成され、同様に滑らかな走行が実現されている。このようにさまざまな速度パターンを柔軟に生成できることがこの手法の特徴の一つである。

実験でのパラメータは、 $\alpha_{lim}$  は過去の研究例に基づき、他のパラメータは繰り返し行った実験によって適切な値に設定した。特に全体の速度パターンとして、前半は速やかに加速をし、後半はハンドリムから手を離れた後の惰性走行を重視して、速度をゆっくり落としていく、つまり、加速の制限  $a_{lim}^a$  より減速の制限  $a_{lim}^d$  を小さめにすることを考えて設定した。



## 第4章 乗り心地を向上させる最適制御理論を用いた速度パターン生成法

### 4.1 乗物の乗り心地と定量的評価

現代社会において、自動車および電車、バス、飛行機、エレベータなどの公共交通システムは必要不可欠である。しかし、生活を快適に過ごす上で、これら乗物は単なる移動手段としてだけでなく、その安全性・快適性も求められる。特に自動車のユーザにおける利便性「楽に運転できる」、快適性「スムーズに走れる」など乗り心地への期待度が非常に高い。[31]

ところが、そもそも乗り心地という言葉は曖昧で多義的な概念でもあり、乗り心地に与える要因は数多く存在する。騒音や振動、温度、湿度も乗り心地に影響するほか、乗り心地の評価の基準が個人によって異なり、主観的な評価が避けられない。実際、電車の減速度の許容範囲は人によりまちまちで、普段の電車利用頻度などにも関係してくる。[32] 乗り心地とは車両の走行に伴って生じる振動や加速度に起因する感覚を指すのが普通であるが、人間の感覚をどのように定量化して評価するかという大きな問題もあり、以前から様々な試みがなされている。人間科学的観点からは、振動の値をもとに乗客の快・不快を推測する方法を「間接評価法」、体感乗り心地試験を「直接評価法」と呼んで区別することがある。

乗り心地の検討に際して振動・曲線通過時・加減速時の3つに分類している。路面の凹凸による上下方向の振動は乗り心地に強く影響するため、従来の乗り心地研究は車両の上下振動と乗り心地の関係を中心として行われてきた。また、自動車の振動特性は走行性能との関係もあることから、バネやダンパによる受動的な振動抑制に加え、振動の状況に応じて積極的に振動抑制を加えるアクティブサスペンションも採用されている。

車両全体の乗り心地については、従来重視してきた上下、ピッチ、ロールに加え前後、左右の加速度・ジャークに着目し、非運転者（通常の休憩姿勢に読書姿勢、仰臥位を追加）に与える影響を分析した結果、制動時の前後加速度、および左右加速度が乗り心地に影響が大きいと報告されている。本結果により、特定のしきい値を超えたときに警告音を鳴らす運転支援システムの構築に関する研究が報告されている。[33]

加速度とジャークを説明変数とする重回帰モデルにて、主観評価で得た不快指数を近似する。ある区間内の物理量の強さを定義する代表値としては、ピーク値、平均値、あるいは実効値が広く使用されている。[33] では、直線、曲線、直角カーブのある走行路で実施した実験結果を実効値を説明変数とするモデルで近似した。重回帰の乗り心地モデルを次式で表現する。

$$RS(t) = \beta_0 + \sum_n \beta_n x_n(t) \quad (4.1)$$

ここで、 $RS(t)$  は時刻  $t$  における不快指数を近似する連続関数、 $\beta_0$  は定数項、 $\beta_n$  は偏回帰係数、 $x_n(t)$  は時刻  $t$  における加速度やジャークの代表値で表される説明変数である。説明

## 4.2 最適制御理論を用いた従来の速度パターン生成法

変数  $x_n(t)$  は、評定時刻の2秒前から評定時刻までの加速度とジャークの実効値とする。ここで、加速度やジャークの方向について注意が必要である。左右方向 ( $y$  方向) に関して被験者の感覚はほぼ対称であるといえるが、前後方向 ( $z$  方向) に関して被験者の感覚は非対称である。したがって、前後方向については、方向によって説明変数を分割する必要がある。そこで、説明変数として以下の六つの変数を定義する。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} a_z^2(\tau) d\tau} & (\overline{a_z(T)} \geq 0) \\ 0 & (\overline{a_z(T)} < 0) \end{cases} & x_2(t) &= \begin{cases} 0 & (\overline{a_z(T)} \geq 0) \\ \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} a_z^2(\tau) d\tau} & (\overline{a_z(T)} < 0) \end{cases} \\ x_3(t) &= \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} j_z^2(\tau) d\tau} & (\overline{j_z(T)} \geq 0) \\ 0 & (\overline{j_z(T)} < 0) \end{cases} & x_4(t) &= \begin{cases} 0 & (\overline{j_z(T)} \geq 0) \\ \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} j_z^2(\tau) d\tau} & (\overline{j_z(T)} < 0) \end{cases} \\ x_5(t) &= \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} a_y^2(\tau) d\tau} & x_6(t) &= \sqrt{\frac{1}{2} \int_t^{t-2} j_y^2(\tau) d\tau} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで、 $T$  は平均値を計算する区間 ( $T \in (t-2, t]$ )、 $a_z$  は前後方向加速度、 $a_y$  は左右方向加速度、 $j_z$  は前後方向ジャーク、 $j_y$  は左右方向ジャークである。

さらに、本結果により加速度・ジャークの値をできるだけ小さく抑えることが滑らかな加減速を生み出し、より良い乗り心地につながると考えられている。実際、電車のブレーキ制御やエレベータの速度制御によく使われている。ところが、ジャークは主にブレーキのかけ始めに発生するが、かけ始めのジャークを小さくすると、所定のブレーキ力に達するまでに時間がかかり、ブレーキ距離の延伸につながる。このように、ブレーキの乗り心地向上は安全確保と相反する面を持っているため、慎重に検討することが必要である。

## 4.2 最適制御理論を用いた従来の速度パターン生成法

最適制御は現代制御理論の大きな成果であり、基本的に状態方程式の動的条件に沿ってある評価関数を最小にする手法で、速度パターン整形にとっても有効であると考えられる。たとえば、磁気ディスク装置のアクセス時間を短縮するために用いられる目標軌道生成法の一つとして、SMART 制御手法 [35] が広く知られている。

SMART 制御の設計の基本的な考え方は、振動を生じない DSP にとって扱いやすい滑らかなモーションを定式化することである。そのために、加速度の時間微分の二乗を積分した評価関数を最小化することに着目して理論を展開する。速度パターンを設計する場合もこれにならって、乗り心地に関係してくると考えられるジャーク (加速度  $a$  の微分値) を用いて評価関数  $J$  を式 (4.3) のように作る。

$$J = \int_0^{t_f} \left( \frac{da}{dt} \right)^2 dt \quad (4.3)$$

また、車速  $V$  と加速度  $a$  を状態変数とし、状態方程式  $\dot{x} = Ax + Bu$  を式 (4.4) のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{V} \\ \dot{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (4.4)$$

ここで、最適制御理論より、ハミルトニアン  $H$  を作ると、 $\lambda$  をラグランジュ乗数として、

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \quad (4.5)$$

オイラーの正準方程式  $\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = Ax + Bu$ ,  $\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -A^T \lambda$  と、停留条件  $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ 、この場合は、

$$u = -B^T \lambda \quad (4.6)$$

をまとめて書くと、評価関数を最小にする軌道の解は式 (4.7) を満たす。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -BB^T \\ 0 & -A^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \lambda \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

式 (4.4) より、ベクトル  $x$  および行列  $A$ ,  $B$  を式 (4.7) に代入すると、

$$\begin{pmatrix} \dot{V} \\ \dot{a} \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ a \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

が得られる。これにより、 $V$  と  $a$  の解は以下のような多項式で表させる。

$$V(t) = C_0 t^3 + C_1 t^2 + C_2 t + C_3 \quad (4.9)$$

$$a(t) = 3C_0 t^2 + 2C_1 t + C_2 \quad (4.10)$$

式 (4.10) を微分すれば、ジャーク  $j$  は次のようになる。

$$j(t) = \frac{da}{dt} = 6C_0 t + 2C_1 \quad (4.11)$$

ただし、 $C_i (i = 0, 1, 2, 3)$  は境界条件を定義することによって決められる任意の定数である。たとえば、パターン開始時 ( $t=0$ ) における初期条件を  $V(t) = V_0$ ,  $a(t) = a_0$ ,  $j(t) = j_0$  とおき、車両が図 4.1 に示したように、なるべく滑らかかつ速やかに最終速度  $V_H$  までに加速されるように決められる。

滑らかな加速はジャークと加速度を連続的に増減させることによって実現できる。また、速やかに加速させるためには加速度の限界  $a_S$  に速く到達し、これを維持すればよい。こういうプロセスの中で、

(1) 加速度とジャークの連続性を保つ

(2) 最終速度  $V_H$  に到達したとき、加速度とジャークがゼロ

以上の二点を絶対条件とする。[36]

それで速度パターンは以下のアルゴリズムによって生成される。

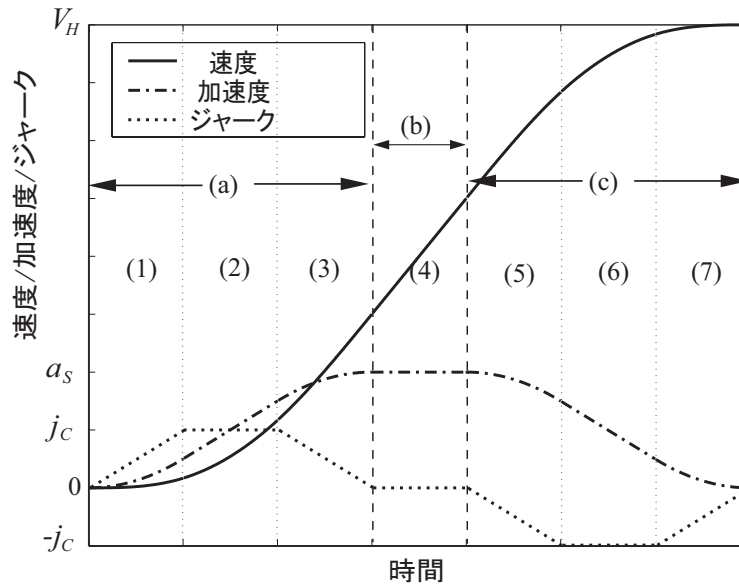


図 4.1: 加速パターン生成の典型例

図 4.1 中の (a) では、速やかな加速を実現するために加速度の限界  $a_s$  に迅速に到達させる。

スムーズな走行のためにジャークの連続性は絶対条件であるから、(1) ~ (3) のようにジャークを増減させる。とくに、(2) ではジャークの限界  $j_c$  を保つことにより、加速度を迅速に  $a_s$  まで増加させる。

(b) では、加速度の限界  $a_s$  を保ち、より速やかに目標速度  $V_H$  に到達することを目指す。

(c) では、 $V_H$  に達したとき加速度とジャークをゼロにするというもう一つの条件を満たすために、加速度を徐々に下げていく。

ここでも、よりスムーズかつ速やかに加速度を下げるために、(5) ~ (7) のようにジャークを増減させ、(6) では  $-j_c$  を保たせる。

これによって、定数  $C_i (i = 0, 1, 2, 3)$  は初期条件により以下のように決められる。

$$C_1 = \frac{j_0}{2}, \quad C_2 = a_0, \quad C_3 = V_0 \quad (4.12)$$

最後に、 $C_0$  については、式 (4.11) より、図 4.1 のようにジャークのパターンを生成するために、(1)(7) では  $+C$ 、(2)(4)(6) では  $0$ 、(3)(5) では  $-C$  の値を取ればよい。ただし、 $C = |C_0|$  とおく。つまり、 $C_0$  はジャークの傾きに関するパラメータである。

## 第5章 ドライバ指令変更を考慮した速度パターン生成法の提案

自動車の運転に際してドライバはアクセルやブレーキを頻繁に操作する。すなわち、周囲の状況に応じて、ドライバによる指令値は常に変化する。たとえば、図 5.1 に示すように、制動中に前方に割り込み車両があり、制動時間が短くなる場合、ドライバはブレーキを踏み増しし、逆に制動中に前方の停止車が移動し、制動時間が長くなる場合、ドライバはブレーキを踏み戻しする。このように、ドライバは車両前方状況を見ながら制動パターンを調整しなければならない。

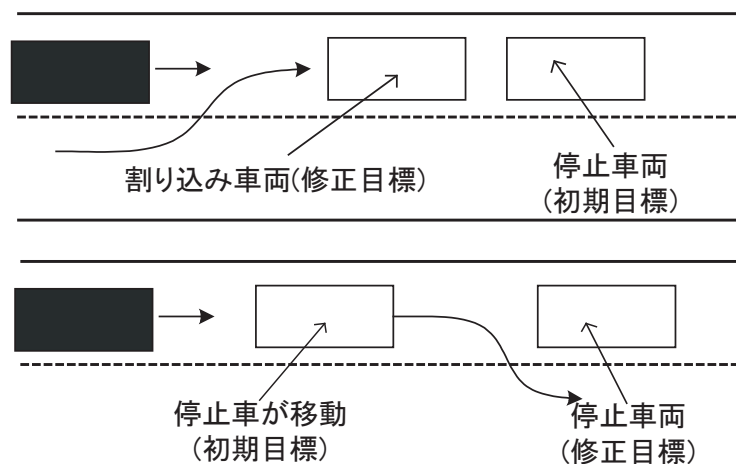


図 5.1: 制動パターンの調整

よって、速度パターンが実行されている最中にドライバによる指令値が変更された場合、新たな速度パターンをリアルタイムで生成しなければならない。これは速度パターンを電気自動車に適用するときのきわめて重要なファクターと考えられるが、提案した SMART リアルタイム速度パターン生成器 (RSSPG) によって実現できる。

### 5.1 SMART リアルタイム速度パターン生成器の制御指令生成アルゴリズム

図 5.2 は RSSPG のフローチャートを示している。

RSSPG では、リアルタイム変更できる最終速度の指令値  $V_H(t)$ 、現在のジャーク指令値  $j(t)$ 、加速度指令値  $a(t)$ 、速度指令値  $V(t)$  を用いて、現在のジャークの傾き  $6C_0$  を決め、次の時刻のジャーク指令値  $j(t+T)$ 、加速度指令値  $a(t+T)$ 、速度指令値  $V(t+T)$  を計算する。ただし、 $T$  はサンプリングタイムである。パラメータとして使われているのは、個人

の運転の好みで調整できるジャークの傾きの絶対値  $6C$ 、路面状況に応じた安全を確保できる最大の加速度の絶対値  $a_s$  と乗り心地の許容できる最大のジャークの絶対値  $j_c$  である。

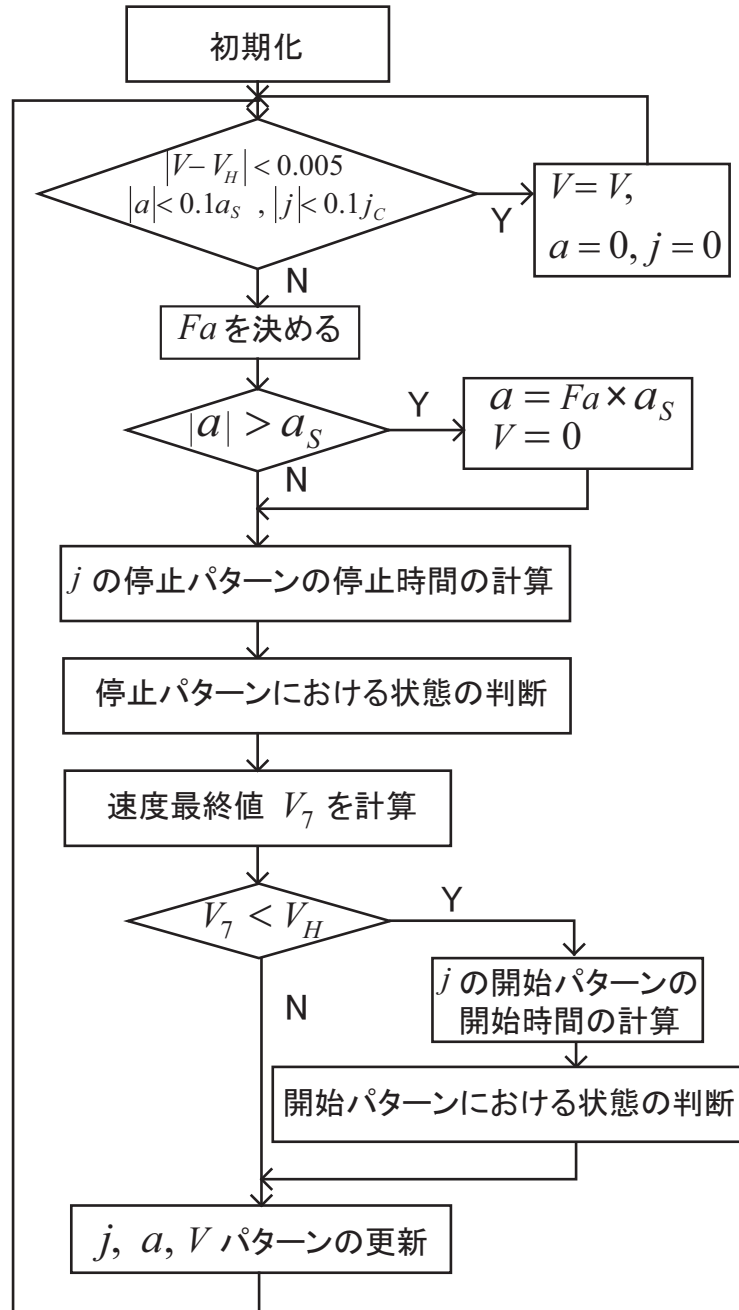


図 5.2: RSSPG のフローチャート

ここで RSSPG の制御指令値生成の手順を簡単に説明する。その詳細について付録 A に示した。

#### (1) 最終速度の収束判断

離散的な計算のため、RSSPG で計算された最終速度は必ずしも最速で最終速度の指令値  $V_H(t)$  に収束するわけではないから、 $V_H(t)$  にある程度 ( $\pm 0.005[\text{m/s}]$ ) 収束し、かつ現時点  $t$  の加速度指令値  $a(t)$  とジャーク指令値  $j(t)$  の絶対値がそれぞれたとえば  $a_s$  と  $j_c$  の一割以内にある場合、それ以降は現時点の速度指令値  $V(t)$  で等速運動するとする。

### (2) $F_a$ の決め方と安全性判断

$F_a$  は、プログラム上加速 ( $a(t) > 0 \rightarrow F_a = 1$ ) と減速 ( $a(t) < 0 \rightarrow F_a = -1$ ) 両方の場合同じ計算式で統一するために設けた変数である。また、 $a(t) = 0$  の場合、速度指令値  $V(t)$  と最終速度の指令値  $V_H(t)$  の大小関係によって、 $F_a$  (つまり、加速するか減速するか) を決める。ここで、 $F_a = 1$  すなわち加速の場合について説明する。

もし加速度指令値の絶対値は安全を確保できる最大の加速度の絶対値  $a_S$  よりも大きい時、 $a(t) = F_a \times a_S$ ,  $V(t) = 0$  に切り替える。

### (3) ジャーク停止パターンの停止時間の計算と状態判断

現時点  $t$  からジャークの停止パターンがスタートするとする。ジャークパターンの傾きの絶対値を  $6C$  とおくと、最終速度  $V_H$  に到達したとき、加速度がゼロになるためには、図 5.3 に示すように、現時点の加速度指令値  $a(t)$ 、ジャーク指令値  $j(t)$  の値を用いて、ジャーク絶対値の最大値

$$j_h = \sqrt{6Ca(t) + \frac{1}{2}j(t)^2} \quad (5.1)$$

となる。

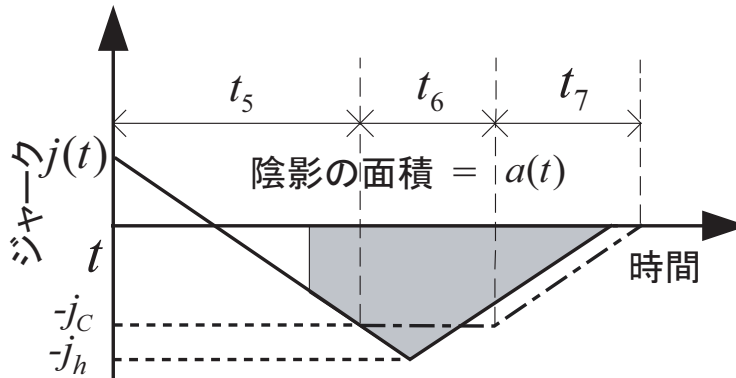


図 5.3: ジャークの停止パターン

もし  $j_h \leq j_C$  ならば、停止時間は

$$t_5 = \frac{1}{6C}(j(t) + j_h), \quad t_6 = 0, \quad t_7 = \frac{1}{6C}j_h \quad (5.2)$$

となる。

そして、 $t_5 > 0$  の場合は状態 (5) にあり、 $t_5 = 0$  の場合は状態 (7) にある。

もし  $j_h > j_C$  ならば、図 5.3 に示すように時刻  $t + t_5$  から破線に沿ってジャークパターンを生成する。そのとき、停止時間は

$$t_5 = \frac{1}{6C}(j(t) + j_C), \quad t_6 = \frac{1}{j_C}\left(a(t) - \frac{1}{6C}(j_C^2 - \frac{1}{2}j(t)^2)\right), \quad t_7 = \frac{1}{6C}j_C \quad (5.3)$$

となる。

そして、 $t_5 > 0$  の場合は状態 (5) にあり、 $t_5 = 0$  の場合は状態 (6) にある。

#### (4) 速度最終値の計算とパターンの更新

式 (4.10) に基づき、最終速度  $V_f$  が求められる。もし  $V_f < V_H(t)$  ならば、現時点で採用すべきなのは図 5.4 に示したジャークの開始パターンだと判断できる。その他の場合は、ジャークの停止パターンが妥当である。ループの最後に、得られたジャークの状態に関連する  $6C_0(t)$  を用いて、次の時刻の指令値  $j(t+T)$ 、 $a(t+T)$ 、 $V(t+T)$  が計算される。

#### (5) ジャーク開始パターンの開始時間の計算と状態判断

ジャークの開始パターンについても、図 5.4 に示されるように、基本的にジャークの停止パターンと同じ考え方で生成すればよい。この陰影面積を  $a_s - a(t)$  とするのは、安全な加速度範囲内で、できるだけ速く最終速度の指令値に達した方がいいからである。

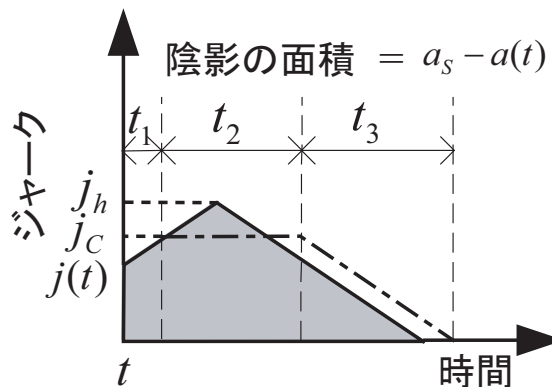


図 5.4: ジャークの開始パターン

## 5.2 SMARTリアルタイム速度パターン生成器のパラメータの決め方

提案手法のもう一つの特長は、 $C$ 、 $a_s$ 、 $j_c$  という3つのパラメータを自由かつ別々に決定できることである。 $C$ 、 $a_s$ 、 $j_c$  の値を変えることで、様々な変化率を持った速度・加速度・ジャークパターンが得られる。この利点は次のような柔軟な速度パターン生成を可能にする。

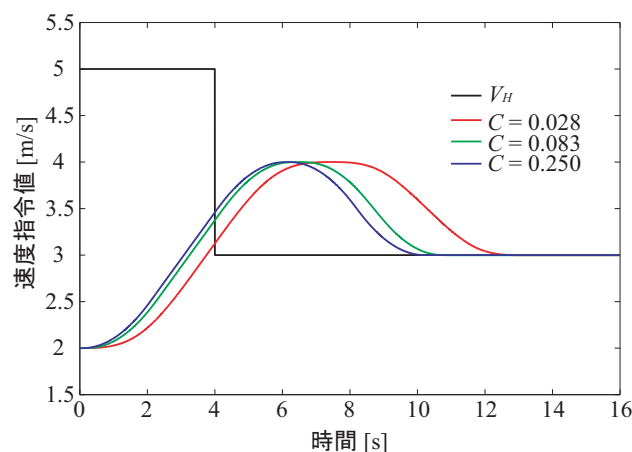


図 5.5: 速度の出力パターン

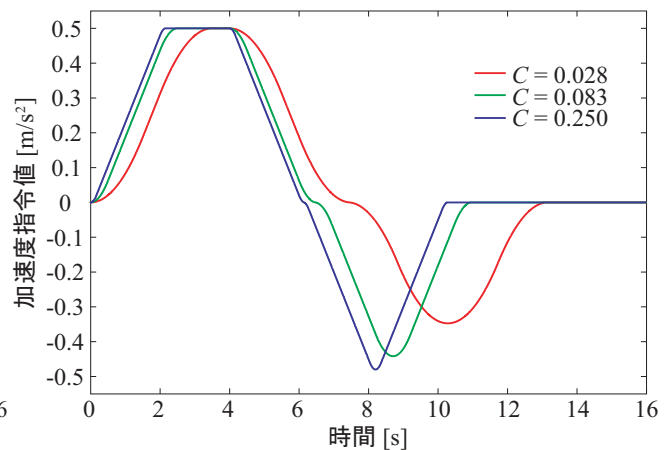


図 5.6: 加速度の出力パターン



(1) ドライバや乗客の好みの走行スタイルに対応できる。

図 5.5, 5.6, 5.7 に示すように、ジャークの変化率に関連するパラメータ  $C$  を調整することによって、もっと加速感を求める人やゆっくりとした加速がほしい人など、加速・減速に応じてドライバの異なった運転スタイルや乗客の好みの走行スタイルに合わせることができる。そして、図 5.5, 5.6, 5.7 に示したように、パターン生成途中でドライバの制御入力  $V_H(t)$  が変化するときにも、確実にリアルタイムで新しいパターンが生成されている。さらに、加速度とジャークの連続性を保つために、いったん最終速度の指令値  $V_H(t)$  を超過してから、 $V_H(t)$  に収束する場合もある。これはパターン生成途中で減速したくなったときにドライバが取る操作を忠実に再現していると思われる。

また、一般的には減速時のほうが加速時よりも加減速度の乗り心地の影響は強いといわれている。[37][38] このため減速時の減速パターン生成の際には特にパラメータの決定を注意する必要がある。図 5.8 に示すように、運転のうまいドライバは、踏み戻し側の制動パターンがゆっくりしており、それは提案手法 RSSPG のパラメータ  $j_C$  を踏み込み側と踏み戻し側で別々の値に設定することにより実現できる。

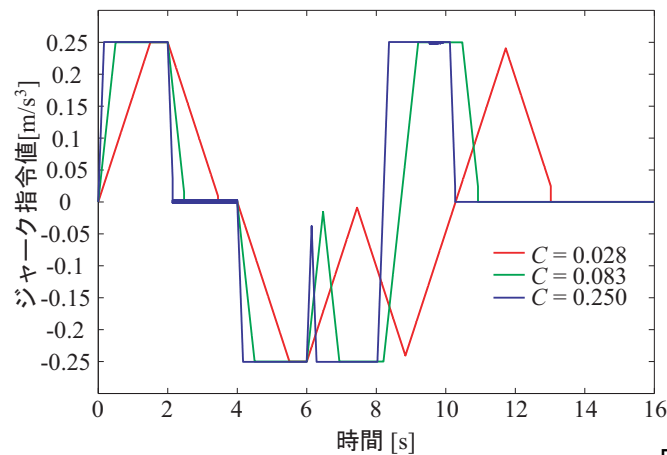


図 5.7: ジャークの出力パターン

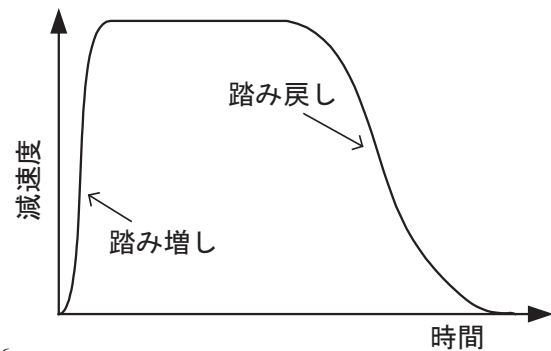


図 5.8: 熟練ドライバによる制動パターン

(2) 路面状態の変化にすばやく対応できる

車両が乾燥する路面から滑りやすい路面に進入すると、車輪と路面の間の摩擦力が急激に減少する。すなわち、この場合最大路面摩擦係数  $\mu_{max}$  が小さくなる。したがって、 $a_S$  の値を滑りやすい路面におけるより小さい値  $\mu_{max}g$  にリセットすることによって、車輪の空転を防ぎ安定領域で運動を制御することができる。

(3) 緊急ブレーキや急な環境の変化に対応できる

こういった非常時に、パラメータ  $C$  を大きくすることだけでなく、必要に応じて乗り心地を損なっても安全を確保するために  $j_C$  を大きくしなければならない。

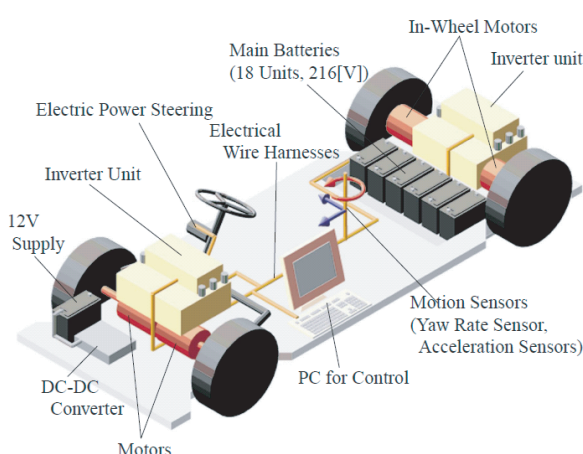
もっとも緊急の場合には、現時点走行している路面における最大制動加速度  $-\mu_{max}g$  を用いて最短距離で停止しなければならない。一方、この最短停車距離  $d_{min} = \frac{V^2(t)}{2a_S}$  が車速を制御して先行車との車間距離を適切に保つシステムに役立てる。

## 第6章 SMARTリアルタイム速度パターンを適用した電気自動車の運動制御実験

### 6.1 実験車両“ 東大三月号 II ”について



外観



制御システムの概要

図 6.1: 東大三月号 II

図 6.1 に示すのは研究室で保有している純電気自動車実験車両“ 東大三月号 II ”で、日産マーチ（平成 9 年式、E-K11）をベースとした改造車である。その最大の特徴は、4 基のインホイールモータを採用した点にある。

表 6.1: 計装系諸元

制御用 CPU	Pentium MMX 233[MHz] AMD K6-233[MHz]
OS	Slackware Linux 3.5 に RTLinux rel.9K を取り込んだリアルタイム OS
エンコーダパルス数	3600[ppr]（車速度測定用）
加速度センサ	ANALOG DEVICES ADXL202

そして、制御用のセンサ系であるが、インホイールモータが既にエンコーダを内蔵して

いるので、この信号を車両運動制御用にも用いる。また、車両運動検出用として 2 軸（前後左右）の加速度計を備えている。これらの計装系の仕様を表 6.1 に示す。

## 6.2 “ 東大三月号 II ”による実験

### 6.2.1 実験手法

図 3.3 中のアクセル・ブレーキ操作からドライバの意思を推定する部分については、さらなる検討が必要なので、今回の実験では、ドライバの要求する最終速度  $V_H(t)$  をドライバのアクセル・ブレーキの踏み量から推定するのではなく、あらかじめ決まったパターンを与えとしたうえで、提案した SMART リアルタイム速度パターンを適用した運動制御実験を行うことにする。 $V_H(t)$  の値が変わったとき、リアルタイムでドライバの意図に沿った新たな速度パターンの生成を実現することを目指す。

静止摩擦力があるため、停止状態からある程度加速し終えたらアクセルを離し、速度  $1.5[\text{m/s}]$  ぐらいまで惰行走行する区間を設けてある。さらに、比較実験をするとき、毎回パターン生成開始時の初速をできるだけそろえるために、制御を開始した直後の 2 秒間  $2[\text{m/s}]$  の指令値まで加速してから、4 秒までに一定速度走行するパターンを用いている。パラメータとしては、ジャークの変化率に関連するパラメータ  $C$  とフィードバックゲイン  $K_p$  を変化させた。実験の状態を表 6.2 にまとめた。

表 6.2: 実験の状態

ケース	実験日	ドライバ	$V_H(t)$ $[\text{m/s}]$	走行抵抗補償分のトルク $[\text{Nm}]$	風の影響
1	一日目	G	5 3	240	なし
2	二日目	Z	3 5	300	あり
3	三日目	Y	5 3	300	なし
4	三日目	Y	3 5	300	なし

ここでは加速のみ ( $V_H(t = 8.0[\text{s}]) : 3[\text{m/s}] \rightarrow 5[\text{m/s}]$ ) と加減速の両方 ( $V_H(t = 8.0[\text{s}]) : 5[\text{m/s}] \rightarrow 3[\text{m/s}]$ ) を含めた代表的な実験結果を示す。なお、エンコーダからの車輪速度の情報が直接速度フィードバック制御に使われているが、測定した車輪速度信号にはノイズが含まれており、速度パターン生成に影響を与えることが考えられる。そのため、実験においては、車輪速度信号に時定数  $100[\text{ms}]$  のローパスフィルタを施すことで、ノイズ等の影響をある程度抑制している。

グラフを描くとき、遮断周波数  $50[\text{Hz}]$  と  $20[\text{Hz}]$  の LPF によりエンコーダおよび加速度計のそれぞれの測定値の高周波数成分を除去する。また、非駆動輪の前の二輪の車輪速度の平均値を車速としている。さらに、加速度センサにはオフセットが存在し、毎回止まった状態でオフセットを計算してから実験を行うべきであるが、今回の実験では、惰行走行する区間の後制御を開始するため、オフセットがオンラインで計算できなかった。ところが、その情報が直接制御に使われていないので、オフラインで一定速走行する区間においてオフセットを計算し、加速度のグラフを描くときその値を用いてオフセット調整を行えばよい。

### 6.2.2 ケース1とケース3の実験結果および転がり抵抗の影響についての考察

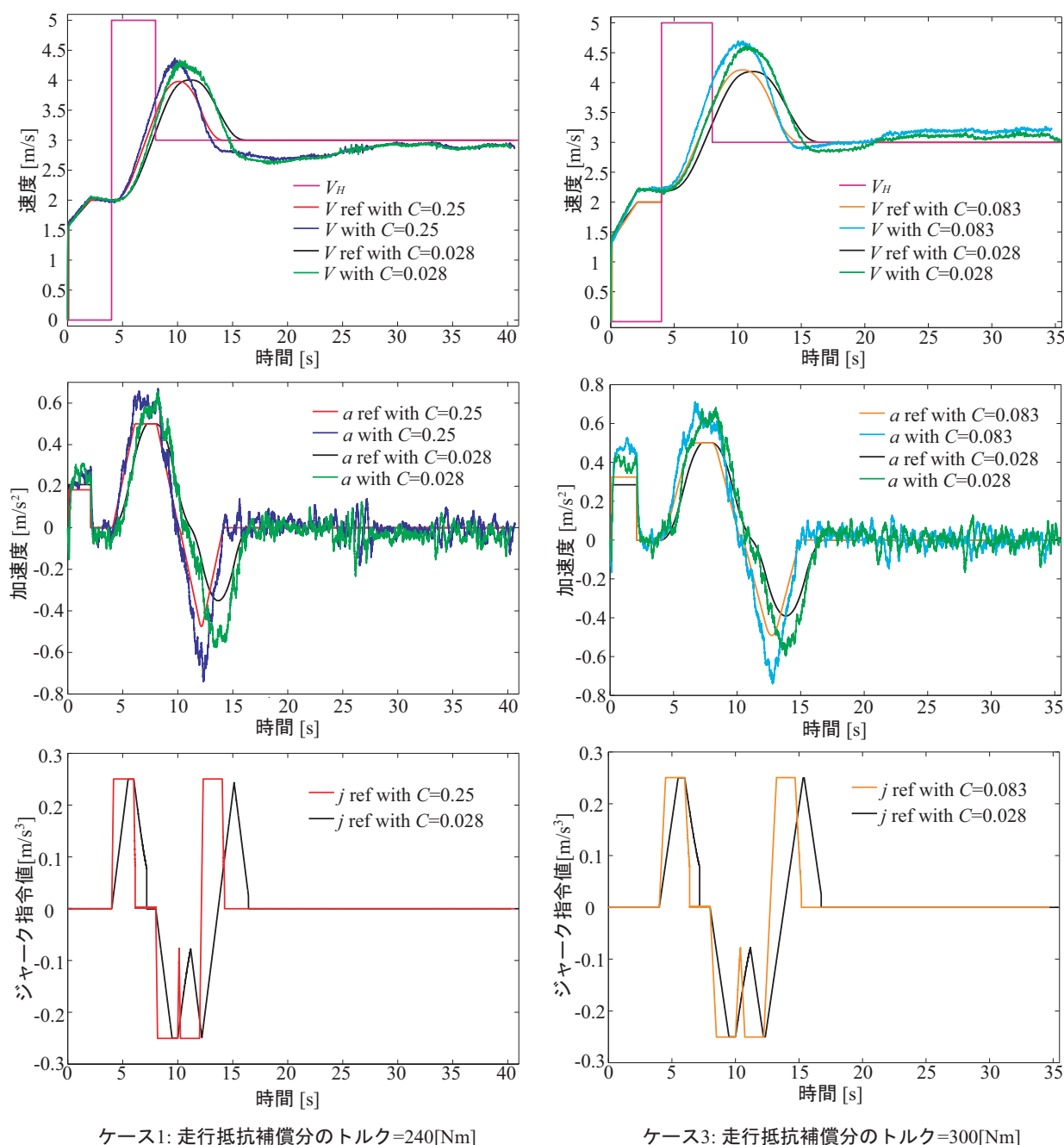


図 6.2: 東大三月号 II を用いた実験結果 (I)

実験の結果、図 6.2 にあるようにケース1もケース3もパターン生成途中の  $t = 8.0[s]$  でドライバの制御入力  $V_H(t)$  が  $5[m/s]$  から  $3[m/s]$  に変化するとき、確実にリアルタイムでドライバの意図に沿った新しいパターンが生成されている。さらに、5.2 節のシミュレーション結果と同様に、もっとも緊急の場合を想定していないから、加速度とジャークの連続性を保つために、いったん最終速度の指令値  $V_H(t)$  を超過してから、目標の速度に収束している。

また、ケース1もケース3もパラメータの変動によって異なる速度パターンを生成し乗り心地の評価も変化させ得ることを示す。それぞれ二つの加減速パターンでは路面状況に応じた安全を確保できる最大の加速度の絶対値  $a_S$  と乗り心地の許容できる最大のジャークの絶対値  $j_C$  は同じ値 ( $a_S = 0.5[m/s^2]$ ,  $j_C = 0.25[m/s^3]$  いずれも繰り返し行った実験によって適切に設定した値である。)を用い、ジャークの変化率に関連するパラメータ  $C$  の値のみを変化させて実験を行った。この結果、速度・加速度の立ちあがりには明らかな差が生じている。パラメータの決定によって様々なパターンの生成が可能になり、乗り心地や人それぞれの嗜好、周囲状況、緊急性などにあわせて速度パターンを生成・適用できることが示された。

問題点として、ケース1もケース3もパターン追従は達成できなかったことがあげられる。加速時・減速時ともにオーバーシュートおよび追従エラーが生じ、目標速度に達することができなかった。その原因は簡単な比例ゲインのみのフィードバックコントローラを用いることにあると考えられる。今後は追従性およびロバスト性をさらに向上する制御システムの設計が必要となる。ところが、ケース1とケース3の追従エラーを比較してみると、加速時、加速開始前・減速終了後の一定速時ともにケース3の追従エラーがより大きい、減速時にケース3の追従エラーがより小さいことがわかる。その原因はまさにケース1とケース3の走行抵抗補償分のトルクの差にあると考えられる。すなわち、走行抵抗をいかにして正確に求めるかは、制御により補償しパターンの追従性を上げるための大きな問題となる。

走行抵抗には主に転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗がある。ここでは、平坦な路面で走行実験を行っているため、勾配抵抗は0として考える。さらに、ケース1とケース3の実験ではそれほど速度を上げていないし、風の影響も小さいので、空気抵抗分も考慮しないことにする。転がり抵抗  $R_r$  は次式で表される。

$$R_r = \mu_r W \quad (6.1)$$

ここで、 $\mu_r$  は転がり抵抗係数、 $W$  は自動車総重量 [N] ( $W = \text{自動車総質量 [kg]} \times \text{重力加速度 [m/s}^2]$ ) である。

しかし、 $\mu_r$  の値は路面状態やタイヤの状態などの車の走行環境により大きく異なってくる。一般に理論値として使用した値 (0.010 ~ 0.015) は同様な条件下での平均的な値であり、実際の値とどのくらい異なるかはわからない。

さらに、惰行試験による測定も試みた。確かにひたすら長い直線路で同様の実験を行えば速度は収束するはずであるが、実験コースに凹凸が存在し、考えていたよりも収束するまでの時間が長く、距離も足りず安全のため速度収束前に制御を停止せざるを得なかった。その測定値を使って補償を試みた結果、図 6.2 に示すように、ある程度追従性を上げることができたが、正確にパターンを追従させることができなかった。

### 6.2.3 ケース2とケース4の実験結果および風の影響についての考察

実験の結果、図 6.3 にあるようにケース2もケース4も、パターン生成途中の  $t = 8.0[s]$  でドライバの制御入力  $V_H(t)$  が  $3[m/s]$  から  $5[m/s]$  に変化するとき、ケース1とケース3と同様に、確実にリアルタイムでドライバの意図に沿った新しいパターンが生成されている。

さらに、ケース2もケース4もパラメータ  $C$  の変動によって異なる速度パターンの生成を実現することができた。

また、ケース2のところどころでケース4より強い速度の振動が生じている。これはケース2のドライバ  $Z$  はケース4のドライバ  $Y$  のようにハンドリング操作で実験コース上にあるいくつかのマンホールの回避を行っていなかったためであり、制御手法によるものではないと考えられる。

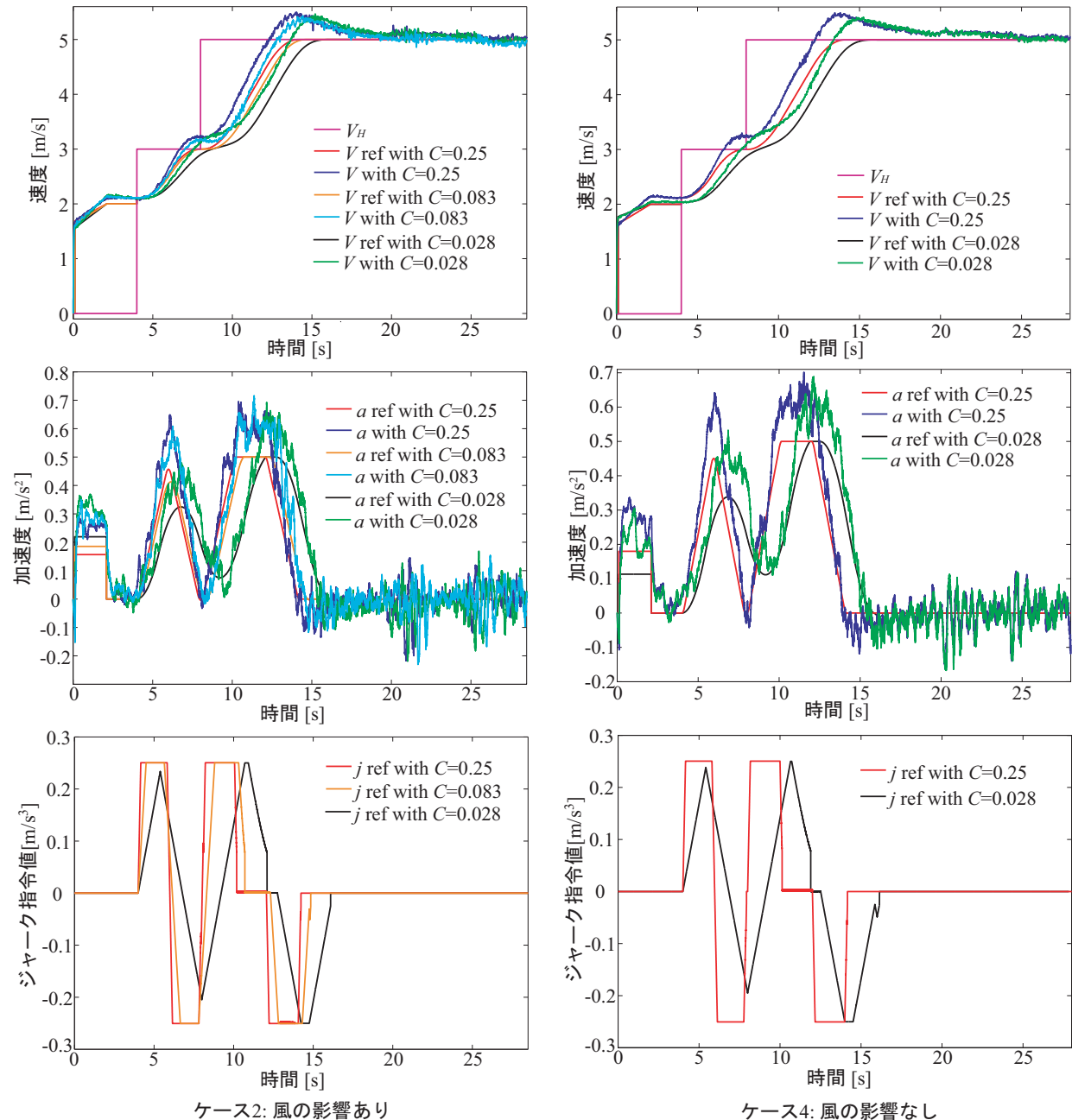


図 6.3: 東大三月号 II を用いた実験結果 (II)

ケース2においては、パラメータ  $C$  を三回変化させて、異なる運転スタイルに対応できる速度パターンの生成を確認できた。実は他のケースの比較実験においても、同じく三回パラメータ  $C$  を変化させたが、ときどきパターン生成開始時の初速か初期位置が不揃えになることがあり、議論の対象にはならないので、ここで示していないのである。今後比



較実験のために初期状態をそろえる実験手法の改善が必要となる。

ケース 2 もケース 4 も同じ大きさの走行抵抗補償分のトルクを与えているのに、ケース 2 の場合多少定常誤差が小さい原因は当日のやや強めの風にあると考えられる。風が強いとき、一定値をとる転がり抵抗のほか、速度の二乗に比例する空気抵抗分の走行抵抗も無視できなくなる。空気抵抗  $R_a$  は次式のように表される。

$$R_a = \frac{\rho S C_d}{2} V^2 \quad (6.2)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度 [ $kg/m^3$ ]、 $C_d$  は空気抵抗係数、 $S$  は前面投影面積 [ $m^2$ ]、 $V$  は車速 [ $m/s$ ] である。

しかし、空気密度  $\rho$  は気温気圧などにより変化する。しかも、 $C_d$  の値は一般的に風洞実験などで計測して求められるもので、ボディ形状やバランス、車体と地面との距離など様々な要因によって決る。実験車両の場合、車体底面もモータなどで様々な凹凸があり、空気の流れは普通乗用車より悪くなっていることが予想されるので、普通の  $C_d$  の値 (0.3 ぐらい) より大きくなることが考えられる。

空気抵抗を含めた走行抵抗は同じく惰行試験によって測定できると考えられるが、JIS の惰行試験などを用いるためにはかなり長い直線路や温度・湿度・風速の正確なデータ、正確な速度・加速度の測定が必要であり、実際に実験に使用できたかどうかは不明である。

追従性の向上を達成するために、ケース 4 の実験状態の下で、パラメータ  $C$  を同じ値 ( $C = 0.083$ ) にして、比例フィードバックゲイン  $K_p$  の増加を試みた結果、図 6.4 に示すように、ある程度追従性を上げることができたが、ある程度からは振動が生じ、追従性の向上には限界がある。より正確にパターンを追従させるためには、ノミナルプラントの同定をより正確にする必要があると考えられる。

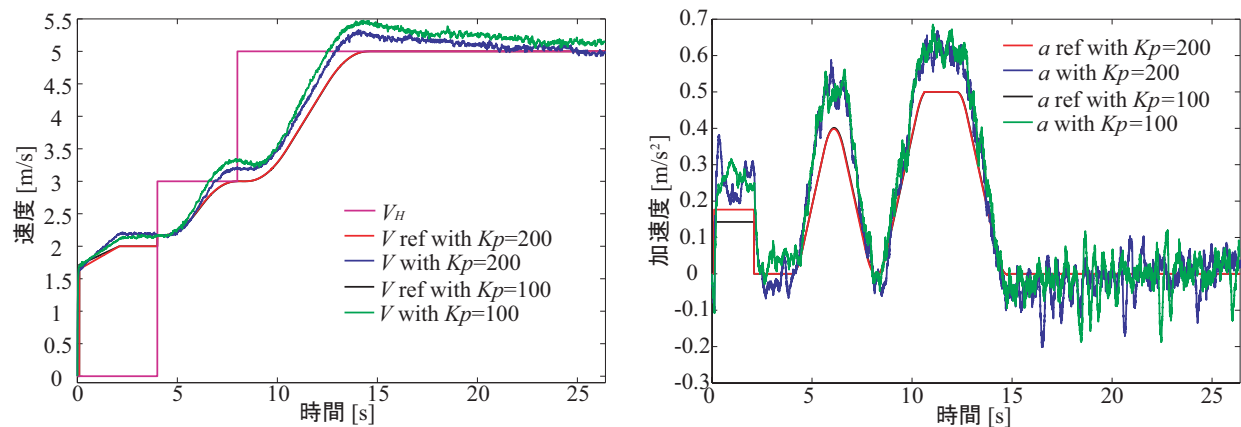


図 6.4: 東大三月号 II を用いた実験結果 (III)

## 第7章 結言

### 7.1 本論文のまとめ

電気自動車では正確な速度制御が可能になることから、本論文ではドライバ指令変更を考慮したリアルタイム速度パターン生成法を提案した。自動車に高度な知能を持たせ、ドライバーの運転を支援して、安全で円滑で環境に調和した自動車交通を実現できるインテリジェントな運転支援・安全技術の一例でもある。加速度とジャークの限界を与えると、その範囲で速やかかつなめらかな加減速が得られる。また、提案手法の3つのパラメータを自由かつ別々に決定することにより、通常時や非常時における乗り心地と安全性を向上しドライバの意図に沿った自由度の高いパターン生成が可能になることが示された。さらに、加速度フィードフォワードと速度フィードバックからなる制御系を用いて電気自動車の運動を制御することで、速度パターンの適用によって滑らかな乗り心地のよい走行が可能になり、さらに、ジャークの変化率に関するパラメータの調整によって、ドライバ好みの走行スタイルを実現できることが示された。

### 7.2 今後の課題

#### 7.2.1 ドライバの意図に沿ったパラメータなどの決め方

ドライバのアクセル・ブレーキの操作からいかにしてドライバの走行イメージ（たとえば、ドライバの要求する最終速度  $V_H(t)$ ）を推定し、さらに、速度パターン生成に用いるパラメータを決定するかという点が速度パターンによる運動制御を行う際の最大の問題となる。

ドライバによる指令をもとにした  $C$ ,  $a_S$ ,  $j_C$  の決定法によって様々な状況に対応できるようにする必要があると考えられる。また、これらのパラメータの組み合わせをどのようにしたら乗り心地が向上するかについてはまだ調査していない。様々な初期条件とパラメータの組み合わせを用い、乗客の感じた乗り心地をアンケート調査することで、通常走行時に最も効果的に乗り心地を向上できるパラメータの決定法について調べる必要がある。

ドライバの意図に沿い、かつ乗り心地や自動車の運動状況を考慮した  $V_H(t)$ ,  $C$ ,  $a_S$ ,  $j_C$  の決定法が今後の課題である。

#### 7.2.2 乗り心地の評価

乗り心地や安心感などは人間の主観的感覚に依存して変わるものであり、定式化することは難しいが、本手法のような滑らかな加減速を伴う走行パターンは、それらを向上させる一つの手段と考えられ、実験の結果からも有効性がうかがえる。提案手法では、速度



パターンの適用によりスムーズな走行を達成することで受動的に乗客の乗り心地への悪影響を防ぎ、同時にドライバの意図を推定しパターンによって実現することで積極的にドライバの乗り心地評価向上を図っている。よって乗り心地の評価をする上で、前後方向の速度変化による振動抑制の効果だけではなく、ドライバの思い通りの走行の実現性や運転のしやすさ、容易さなども調べる必要がある。これらは定量的な評価をするのは非常に難しいが、速度パターン適用による運動制御を現実化する際に非常に重要な要素であり、アンケート調査などで評価してよりよいドライバの意思推定を模索していく必要があると思われる。実際の被験者評価による解析を重ねることで、搭乗者に応じた各パラメータのよりよい設計指針も見えてくると考えられ、今後の重要な課題となる。

ドライバは走行環境やタスクに応じて、前方路面情報を認知、判断し、かつ自車両の応答を視野の変化や体感を参照して適切に車両を操縦する。図 7.1 に示したように、ドライバの運転行動すなわち操縦動作は、車両の走行に係わるスロットルペダルやミッションレバーの操作、旋回や緊急回避のためのステアリング操作および注意走行や車両停止のためのブレーキペダル操作に分けられる。これらの一連の操作動作は、認知・判断・操作のシーケンスに従う場合とあらかじめプログラムされている場合、またとっさの反応として生じる場合とがあり、これは運転の経験度合いをはじめ、走り慣れた道路あるいは初めての道路によってもその発現の仕方が異なる。したがって、一般ユーザーの車両性能の評価には、ドライバの操作と車両応答との適応性を含めた運転負担や制御負担の評価を踏まえて考えなければならない。

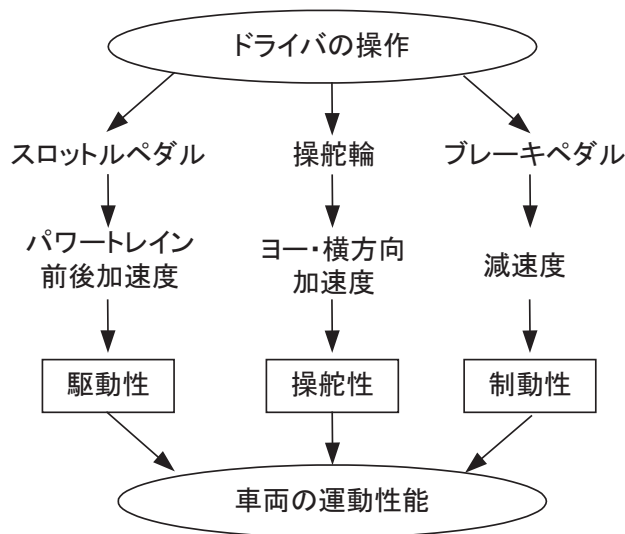


図 7.1: 車両操縦性および運動性能

### 7.2.3 二次元運動制御への拡張

旋回を考慮した二次元の車両運動では、ドライバの意思を推定するために、ハンドル切り角の情報も必要となる。また、直進走行時の速度パターンに対応して、今度はリアルタイムでヨーレートパターンの生成が必要と思われる。[40]においては乗り心地を考慮したヨーレート指示値の自動生成法を提案した。本論文の提案手法の二次元運動制御への拡張が[40]のリアルタイム生成を実現する一つの手段である考えられる

## 参考文献

- [1] 景山一郎：“ドライバ特性をふまえた車両システムづくりをめざして”，自動車技術会シンポジウム「ドライバ評価手法の基礎と実践」，2005
- [2] <http://www.honda.co.jp/tech/auto/Information/hids/index.html>
- [3] [http://www.toyota.co.jp/jp/tech/new\\_cars/harrier\\_hybrid/parformance/](http://www.toyota.co.jp/jp/tech/new_cars/harrier_hybrid/parformance/)
- [4] 車間側方コントロールシステムワーキンググループ：“ITS,AHS（自動運転道路システム）研究開発実験の概要”，pp.5, 1995
- [5] H.Ueno et al.：“1994 Development of Drowsiness detection System”，*Vehicle Navigation & Information System Conference Proc.*, pp.15-20, 1994
- [6] <http://www.eliica.com/>
- [7] <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/corporate/technology/environment/miev.html>
- [8] [http://www.fhi.co.jp/news/05\\_07\\_09/05\\_09\\_02.pdf](http://www.fhi.co.jp/news/05_07_09/05_09_02.pdf)
- [9] 鶴岡慶雅，豊田靖，堀洋一：“電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究”，電気学会論文誌 D, Vol.118-D, No.1, pp.45-50, 1998
- [10] 土居俊一：“ヒューマンダイナミックスを考慮した車両評価”，豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.3, pp3-15, 1995
- [11] A.Y.UNGOREN and H.PENG：“An Adaptive Lateral Preview Driver Model”，*Vehicle System Dynamics*, Vol.43, No.4, pp.245-259, 2005
- [12] 井口雅一：“人間 - 機械系 人による機械の制御”，情報科学講座, B.9.2, 共立出版
- [13] 安部正人：“自動車の運動と制御”，共立出版, 1979
- [14] D.T.McRuer and H.R.Jex：“A Review of Quasi-Linear Pilot Models”，*IEEE Transaction on Human Factors in Electronics*, Vol.HFE-8, No.3, pp.231-249, 1967
- [15] Weir,D.H. and McRuer,D.T.：“Dynamics of Driver Vehicle Steering Control”，*Automatica*, Vol.6, pp.87-98, 1970
- [16] 近藤政市：“基礎自動車工学”，養賢堂, 1965
- [17] 大野俊一：“曲線路における操舵”，自動車技術, Vol.20, No.5, 1966

- [18] 山川新二:“ 人間 - 自動車系の力学 ”, 自動車技術会講習会教材, 1966
- [19] 吉本堅一:“ 予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション ”, 日本機械学会誌, Vol.71, No.596, 1968
- [20] C.C.MacAdam:“ An Optimal Preview Control for Linear Systems ” , *Trans. of ASME*, Vol.102, pp.188-190, 1980
- [21] 吉本堅一:“ 自動車運転者の操縦動作のモデリング ”, 人間工学, Vol.18, No.6, pp.301-306, 1982
- [22] 末富隆雅, 吉本堅一, 坂田晴彦, 後藤功一:“ 曲線路走行中の運転者の車速制御のモデル ”, 自動車技術会論文集, No.38, pp.78-84, 1988
- [23] 天野也寸志, 水野雅, 彦原田宏, 下村裕:“ 加減速を含むドライバモデルの研究 - 旋回走行時の実車検証 - ”, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.924, No.1, pp.185-188, 1992.10
- [24] 天野也寸志, 名切末晴, 羽田昌敏, 土居俊一:“ 緊急時におけるドライバの運転動作モデル(モデルの基本構造について) ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.633, pp.1966-1972, 1999
- [25] 服部義和, 浅野勝宏, 岩間紀男, 重松崇:“ 追従走行時の減速ドライバモデル ”, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.936, pp.157-160, 1993.10
- [26] 戴建華, 坂井真一郎, 堀洋一:“ 速度パターン整形を導入した電気自動車の新しい運動制御法の提案 ”, *Proc. JIASC* 2002, Vol.3, pp.1289-1292, 2002
- [27] 齊藤知行:“ 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タイム速度パターン生成法 ”, 東京大学卒業論文, 2003
- [28] 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
- [29] 関弘和, 南方英明, 多田隈進:“ 加速度と加加速度制限を考慮したパワーアシスト車いすの速度パターン生成法 ”, ライフサポート, Vol.18, No.3, pp.19-25, 2006
- [30] H. B. Pecejka, E. Bakker:“ The Magic Formula tyre model ”, In *Proc. 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, Delft, Netherlands, 1991
- [31] 矢作悟, 谷内陽子:“ 車間自動制御システムの市場反響 ”, 自動車技術, Vol.57, No.12, pp.81-84, 2003
- [32] 白戸宏明, 藤浪浩平, 小美濃幸司:“ 列車減速度の適正レベルに関する検討 ”, 鉄道総研報告, Vol.8, No.12, pp.43-46, 1994
- [33] 山岸義忠, 猪岡光:“ 乗り心地改善を目指した運転支援システム ”, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.1, pp.241-246, 2005

## 参考文献

---

- [34] 木村彰：“電気車のための加速度変化率を制限したロバスト非線形速度制御”，電気学会論文誌 D, Vol.122, No.8, pp.807-815, 2002
- [35] Mizoshita Y., Hasegawa S., Takaishi K.:“ Vibration Minimized Access Control for Disk Drive ”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.3, pp.1793-1798, 1996
- [36] T.Saito, Yoichi Hori:“ Realtime Generation of Smart Speed Pattern for EVs taking Driver ’s Command Change into account ”, *Proc. of AMC – 2004*, pp.81-85, 2004
- [37] 高井秀之:“ 乗り心地評価方法の変遷 ”, 鉄道総研報告, Vol.9, No.8, pp.61-66, 1995
- [38] 南京政信:“ 乗り心地向上を目指すブレーキ制御 ”, *Railway Research Review*, Vol.57, No.9, pp16-19, 2000
- [39] 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 ”, 東京大学修士論文, 2003
- [40] 中邨勉:“ ヨーレートの微分値まで考慮した車両の運動制御 ”, 東京大学卒業論文, 2006

# 発 表 文 献

## 国際学会

Li Zhao, Yoichi Hori :“ Realtime Smart Speed Pattern Generator for EVs taking account of Driver’s Command Change ”, *Proc. of EVS – 22*, 2006.10, Yokohama

## 国内研究会

趙莉，堀洋一：“安全と乗り心地の向上を目指し加速度・ジャーク限界とドライバ指令変更を考慮したリアルタイム速度パターン生成”，電気学会産業計測制御研究会, IIC-06-17, 2006.3.8-9

# 謝 辞

My heartfelt thanks to everyone, who in countless ways (recounting of which will take up a volume far larger than this) has made my school life in Japan and Hori laboratory an unforgettable experience.

*Feb. 2, 2007     Li Zhao*

# 付 録 A    RSSPG アルゴリズムのソース コード

---

```
function sys=mdlUpdate(t,x,u)

vH = u; j = x(1); a = x(2); v = x(3);

C = 1/36; aS = 0.75; jC = 0.25; T = 0.001;

if abs((u - x(3))) < 0.005 & abs(x(1)) < 0.1*jC & abs(x(2)) < 0.1*aS
    x(3) = x(3); x(2) = 0; x(1) = 0;
else
    if x(2) > 0
        Fa = 1;
    elseif x(2) < 0
        Fa = -1;
    else
        if (u - x(3)) > 0
            Fa = 1;
        else
            Fa = -1;
        end
    end
end

if (Fa*x(2) > aS)
    x(2) = Fa*aS; x(1) = 0;
end

jh = sqrt(Fa*x(2)*6*C+x(1)*x(1)/2);
if (jh > jC)
    time5 = (jC+Fa*x(1))/(6*C); time7 = jC/(6*C); time6 = (Fa*x(2)-(jC*jC-x(1)*x(1)/2)/(6*C))/jC;
    jh = jC;
    if (time5 > 0)
        C0 = -Fa*C;
    else
        C0 = 0;
    end
else
    time5 = (jh+Fa*x(1))/(6*C); time6 = 0; time7 = jh/(6*C);
    if (time5 > 0)
        C0 = -Fa*C;
    else
        C0 = Fa*C;
    end
end

C00 = -Fa*C; C1 = x(1)/2; C2 = x(2); C3 = x(3);
at5 = 3*C00*time5^2+2*C1*time5+C2;
vt5 = C00*time5^3+C1*time5^2+C2*time5+C3;
C00 = 0; C1 = -Fa*jh/2; C2 = at5; C3 = vt5;
at6 = 3*C00*time6^2+2*C1*time6+C2;
vt6 = C00*time6^3+C1*time6^2+C2*time6+C3;
C00 = Fa*C; C1 = -Fa*jh/2; C2 = at6; C3 = vt6;
at7 = 3*C00*time7^2+2*C1*time7+C2;
vt7 = C00*time7^3+C1*time7^2+C2*time7+C3;
```



## RSSPG アルゴリズムのソースコード

---

```
if ((Fa*vt7) < (Fa*u))
    jh = sqrt((aS-Fa*x(2))*6*C+x(1)*x(1)/2);
    if (jh > jC)
        time1 = (jC-Fa*x(1))/(6*C); time3 = jC/(6*C); time2 = ((aS-Fa*x(2))-(jC*jC-x(1)*x(1)/2)/(6*C))/jC;
        jh = jC;
        if (time1 > 0)
            C0 = Fa*C;
        else
            C0 = 0;
        end
    else
        time1 = (jh-Fa*x(1))/(6*C); time2 = 0; time3 = jh/(6*C);
        if (time1 > 0)
            C0 = Fa*C;
        else
            C0 = -Fa*C;
        end
    end
end

x(3) = x(3)+x(2)*T; x(2) = x(2)+x(1)*T; x(1) = x(1)+6*C0*T;
end

sys=[x(1),x(2),x(3)];
```

---

図 A.1: RSSPG アルゴリズムのソースコード (M-ファイル S-Function から抜粋)