



# 熟練過程をもつ人間の運転行動モデルと制御システムとしての実現

梶井, 一英

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-03-25

(Date of Publication)

2013-05-07

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5791

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005791>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

熟練過程をもつ人間の運転行動モデル  
と制御システムとしての実現法

平成25年1月

神戸大学大学院システム情報学研究科

梶井 一英

# 目次

第1章 序論.....	7
1.1 研究の背景.....	7
1.2 これまでの研究と本研究の位置づけ.....	9
1.3 論文の構成と概要.....	11
第2章 運転者を含む車両システムの応答特性と 伝達関数モデル表現.....	12
2.1 はじめに.....	12
2.2 車両系における運転者の応答.....	13
2.2.1 車両系の時間領域および周波数領域における応答性.....	13
2.3 パワートレイン出力の生成と伝達過程および周波数特性.....	14
2.3.1 操作から出力への過程.....	14
2.3.2 システムの線形表現と周波数特性.....	18
2.3.2.1 内燃機関での空気質量の搬送過程とトルク発生遅れ.....	18
2.3.2.2 クラッチ系.....	19
2.3.2.3 トルクコンバータ付トランスミッション.....	19
2.3.3.4 車両応答.....	20
2.3.3.5 車両システムの応答.....	20
2.4 低次元パワートレインモデルと運転者系への適用.....	21
2.4.1 運転者-車両相互作用システムへの適用.....	21
2.4.2 振幅変調モデルによるエンジン始動中の車両挙動と振動騒音評価.....	23
2.5 まとめ.....	23
第3章 運転技能学習過程の概念とモデル設計.....	25
3.1 はじめに.....	25
3.2 運転者の能力と習熟.....	25
3.2.1 熟練過程.....	25
3.2.2 習熟過程の概念モデル.....	26
3.2.3 運転者の能力との対応.....	28
3.3 運転者モデルの構成.....	28
3.3.1 速度追従運転の目標と環境.....	28
3.3.2 モデルの要件.....	29
3.3.2.1 運転者モデル.....	29
3.3.2.2 車両モデル.....	29

---

3.3.3 運転者モデルの枠組み .....	29
3.3.3.1 認識系 .....	30
3.3.3.2 判断系 .....	31
3.3.3.3 操作系 .....	32
3.3.3.4 目標速度修正モデル .....	32
3.3.3.5 車両応答特性モデル .....	33
3.3.4 熟練度を表す要因とパラメータ .....	34
3.4 運転者モデルの挙動と評価 .....	34
3.4.1 モデルとシミュレーション設定 .....	34
3.4.2 評価指標 .....	35
3.4.3 結果と考察 .....	35
3.5 まとめ .....	37
第4章 操作量学習と制御システムとしての実現 .....	38
4.1 はじめに .....	38
4.2 排ガス試験サイクルにおける速度追従運転問題 .....	38
4.3 運転者の挙動と可能な制御 .....	39
4.3.1 熟練者と初心者の運転挙動の比較 .....	39
4.3.2 人間特性の制約のもとで可能な制御 .....	40
4.3.3 予見による先行操作と遅れ補正 .....	41
4.4 運転者内部での習熟過程 .....	42
4.4.1 制御対象の脳内モデル .....	43
4.4.2 学習の初期/制御対象の特徴抽出 .....	43
4.4.3 規則の発見, 車両の知識を用いた学習 .....	45
4.4.4 応答遅れの学習 .....	48
4.4.5 目標に対して直接体が動く熟練状態 (習熟段階) .....	49
4.5 対象の特性変化への対応能力と学習のしやすさ .....	50
4.5.1 負荷/出力の変化 .....	50
4.5.2 応答性と非線形性 .....	50
4.6 まとめ .....	51
第5章 結論 .....	52
5.1 結論 .....	52
5.1.1 運転者を含む車両系モデル .....	52
5.1.2 習熟する運転者モデルの枠組み .....	52
5.2.3 習熟のための特徴の発見とパラメータ学習アルゴリズム .....	53

5.1.4 本研究の期待される適用分野 .....	53
5.2 今後の研究課題 .....	54
5.2.1 サンプルングによる認識と判断.....	54
5.2.2 パターン処理による反応時間の短縮とその表現.....	54
5.2.3 操舵を含む運転者の習熟過程モデル .....	54
謝辞.....	55
参考文献 .....	56
本研究に関する発表 .....	59
学術誌掲載論文.....	59
招待講演.....	59
国際会議.....	60
国内会議/研究会.....	61

## 目次

Fig. 2.1 Emission test cycle driving behavior.....	12
Fig. 2.2 Controller & vehicle System for emission test cycle.....	13
Fig. 2.3 Space - time structure of IC engine behavior.....	14
Fig. 2.4 Amplitude modulation, Force: Combustion pressure profile during consecutive 100 ignitions.....	15
Fig. 2.5 Amplitude modulation, Geometry: Combustion force is converted to torque.	16
Fig. 2.6 Combustion force derived torque profile is depending on load.....	16
Fig. 2.7 Frequency property of combustion torque (1 cylinder) .....	17
Fig. 2.8 Torque generation and transfer process with basis function.....	17
Fig. 2.9 Power transfer path frequency property with clutch .....	18
Fig. 2.10 Frequency response of the test vehicle at engine speed 1500rpm.....	20
Fig. 2.11 A driver model with leaning capability – vehicle interactive environment ..	22
Fig. 2.12 Adapted driving behavior in an emission test cycle with the model.....	22
Fig. 2.13 Operation timing learning.....	22
Fig. 2.14 Engine speed & torque during starting.....	23
Fig. 3.1 Skill acquirement process.....	26
Fig. 3.2 Skill acquirement process with environment change .....	27
Fig. 3.3 Emission test cycle driving.....	28
Fig. 3.4 Target speed in 10·15 mode emission test cycle.....	29
Fig. 3.5 Framework of the driver model.....	30
Fig. 3.6 Modification of acceleration change.....	33
Fig. 3.7 Modification of the target speed.....	33
Fig. 3.8 Case study 1: With optimal operation profile (Searched) .....	36
Fig. 3.9 Case study 2: Potential ability maximized.....	36
Fig. 3.10 Case study 3: Unskilled driver (delay with errors) .....	36
Fig. 4.1 Speed tolerance in the Japanese emission test cycle .....	38
Fig. 4.2 Target speed tracking system .....	39
Fig. 4.3 Target speed tracking performance in a emission test cycle driving .....	40
Fig. 4.4 Accelerator operation difference between an expert driver and a beginner...	40
Fig. 4.5 Dead time dependent stability margin.....	41
Fig. 4.6 Prediction control for feedback compensation .....	42
Fig. 4.7 Information transfer process for a driving agent .....	42
Fig. 4.8 A reverse system for generating input to a target plant.....	43

Fig. 4.9 Iterative learning control .....	44
Fig. 4.10 Initial condition for learning .....	44
Fig. 4.11 Speed tracking performance after 10 times learning .....	45
Fig. 4.12 Operation features to track the target speed.....	46
Fig. 4.13 Driving behavior with a initial value set for the learning .....	47
Fig. 4.14 Driving behavior with a initial acceleration gain learned .....	47
Fig. 4.15 Driving behavior with a speed dependent acceleration gain learned .....	48
Fig. 4.16 Driving behavior with the running resistance learned.....	48
Fig. 4.17 Learning for response delays .....	49
Fig. 4.18 Beginner's driving behavior represented with the driving agent .....	49
Fig. 4.19 Expert's driving behavior represented with the driving agent.....	50

## 表目次

Table 3.1 Parameters for latent potential .....	34
Table 3.2 Ability for actualization generalization .....	34
Table 3.3 Model & Simulation Parameters .....	35
Table 3.4 Driving performance by indices .....	35

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

人間は道具を自分のパワーで制御することから文明を発展させた。その手道具から始まり、牛馬などの動物を使うことでより大きなパワーが得られるようになり、ついには内燃機関などの機械的なパワーを機械的制御で扱い現在に至る。そして今や制御装置の主流は電気-機械系になっている。しかし、もっとも現代的で日常的な自動車の運転操作、駆動/制動/操舵、は人による。昨年に至り、機械制御の領域から公道を走ることのできる無人運転車（グーグル）が出現した。自動車の走行は運転者がだれであれ、衝突せず道路内を走行するなどの最低限の制約だけでなく、滑らかな交通流を維持するため他の車と同様な走行をする必要がある。走行挙動が同じであれば制御構造は同じであるとは限らない。環境認識から判断過程まで全く異なる場合もありえる。

筆者は以前乗用車用パワートレイン（エンジンとトランスミッション）の制御システムの研究開発をしていた。制御設計のためには対象プラントの特性が必要であり、そのために対象の数学モデルを作成し、それをを用いた自動車挙動の計算機シミュレーションも研究していた。その延長で、モデル自動車を運転するシミュレータを構成して燃費予測をしていた。ある時、その燃費排ガス試験サイクル運転（アクセルとブレーキ操作）のために作成した運転者モデル（フィードバックを主とした従来の制御装置の延長上のものである）と熟練した運転者の操作挙動がかなり異なることに気づいた。どのようにモデルを構成すればこうした運転者の挙動を再現できるかということがこの研究の発端であった。さらに、制御装置であるその運転者モデルは何度繰り返しても同じ運転挙動であるが、運転者は経験とともに運転技能が向上することも気にかかっていた。

自動車は1世紀以上の歴史をもち、その開発と生産活動が基幹産業のひとつであるため、研究開発に多大の費用が使われており、大学から企業にいたるまで多くの研究者がいる。これまでの研究開発は主にハードウェアを対象とし、人間がかかわる領域のHMI(Human machine interface)でも視認性や操作感覚の対象物に研究の重点が置かれている。そして乗用車は何十個ものマイクロコンピュータが搭載されている高性能な機械である。しかし機能は人のある地点から別な地点に道路にそって運ぶことであり、人が運転しなければ全く機能しない道具である。衣類を入れれば乾燥までできる洗濯機の方が自動機器としては高度である。道具であれば使う人の身体特性と合わせて初めて機能が生きる。道具と人の関係では、はさみや包丁では利き手に合わせたものがある。指で音階を作らなければならないバイオリンでは子ども用にいくつかの大きさがある。近代になって発達し、音程が保証されているピアノでは鍵盤の大きさは一定で、身体特性が演奏技術に影響する。自動車の運転についても道具を使う観点から見る必要があるが、実時間制御システムの視点で人間特性からその運転挙動を解明する研究は多くなく、さらに運転操作の本質である学習や熟練についてはほとんど研究されていない。

現在の自動車は電子装置と制御理論が前提となって設計されているが、それらが世の中に出るはるか前の18世紀に自動車は実用化された。点火や燃焼噴射などは電子制御になっていても、その起源より現在に至るまで、走る、止まる、曲がるという基本運動制御は人間の操作による。列車や航空機では自動操縦が広く取り入れられていて、自動車も特定の目的に対して自動運転が適用されることがある。

ここ数年、車両の電動化が急速に進んでおり、内燃機関に加えた開発工数が増大している。モデルに基づく車両開発手法が広く採用されてきていて、そこには運転者の動的特性を考慮した設計やシミュレータによる検証のために動的な運転挙動モデルが必要となる。

運転者モデルは操舵系を中心に1960年代より発表されており、2003年までの動向は Charles C. Macadam により詳細に調査されており[1]、概念的には運転者の反応（認知-操作）遅れと予見（先読み）や内部モデルが紹介されている。その中で操舵の運転者モデルでは運転者の反応遅れと安定制御のための予見（先読み）時間（期間）の関係を示している。景山らはフィードフォワードとフィードバックからなる操舵の運転者モデルを提案し[2]、反応時間の計測や運転環境の違いによる挙動を多くの論文で記述している。

最近ではモデルの運転操作挙動に注目した車両特性の評価に用いることが提案されている。単なるPIDフィードバック装置でも運転者モデルと称されることがあるが、目標追従ができて人間と異なる場合も多い。目標および現在の状態を見て、運転装置を操作することは、入出力の意味で運転者でも電子-機械的制御装置でも同じである。しかし、内部での処理(情報処理原理)は違ふし、また習熟していくということは人間のみのものである。人間の習熟には精度の向上だけでなく認知・判断の効率化や操作が滑らかになる（エネルギーの最小化）ことも含まれる。

本研究では電子装置による運転と人間の運転との違いを明らかにし、それを数式モデルとして表現することを目的とする。そのために、目標が明確に定義でき、運転挙動が容易に評価できる排ガス試験サイクルにおける目標値追従運転を対象にする。まず、制御対象である車両の運転操作に対する応答性を現象解析に必要な周波数特性の範囲でパワートレインと車両の動的モデルから求める。次に、初心者と熟練者の運転挙動を計測しその違いを調べる、そして、人間の制御応答から許容される制御方法を特定する。そこから人間の運転行動ではフィードフォワード操作が主であり、その精度を上げるためには学習/習熟が必要であることが予想される。

学習方法の手がかりをつかむため、まず制御対象の知見がない場合でも出力誤差だけを見て操作を変更する繰り返し学習を試みる。その過程で制御対象の特徴を得られれば、その知識に基づいて、少ない特徴パラメータを規則的に学習でき、それによりロバストなフィードフォワード則が得られることを示す。

人間は電子制御に比べて応答性や多変数の処理には劣るが、学習/習熟ができる。学習過程とそのモデルが得られれば、運転しやすい自動車の設計と評価、低次元でパラメータの少ない制御装置の設計や自律分散型制御の設計に利用することが期待される。

## 1.2 これまでの研究と本研究の位置づけ

運転の基本となる人間の認知や反応は医学と生理学の分野で古くから定量的に計測されており、前出の Charles C. Macadam によれば関係するデータは 1930 年代の論文に現れている[1]. たとえば単純な視覚への応答は 180ms であり、問題が複雑になるに従い遅くなるのが様々な実験により報告されている. そこから運転者モデルになるには時間が必要で、1960 年代より操舵系を中心とした運転者モデルが発表されてきた. その頃 Ornstein により目標追従を目的とした運転者の 2 次遅れと無駄時間からなる伝達関数が提案されている[3].

人間の応答特性に関連した操舵の運転者モデルでは運転者の反応遅れと安定制御のための予見 (先読み) 時間 (期間) の関係が示されている[1]. また運転者の操舵操作は道路形状に基づくフィードフォワード量と道路形状にともなう横偏差情報とヨー各偏差情報に基づくフィードバック量からなることを示した[2]. そして運転環境の違いによる挙動[4], 運転者モデルを基に反応時間など運転挙動の計測と車両データからドライバ特性解析をしている[5]. また従来から提案している操舵系の運転者モデルについて検証して、運転者は状況に応じて運転者特性 (フィードバック制御部) を変化させて応答性と安定性を改善していると判断した[6]. 他にも多くの論文で運転者モデルについて記述している[7], [8]. 木村はモデルそのものについて、人間が体得できる車両特性をモデルにすることがそれほど容易でないことを述べている[9].

一方ロボットの研究開発の進展にともない自動車組み立て工程にロボットが多用されるようになり、開発試験においてもロボットが運転者の代理として導入されている. 丸木らは自動運転用のロボットの機能が改良されていることを紹介している[10]. これらはあらかじめ決められた運転をするためのもので、グーグルの自律走行車とは設計思想が異なる. 人間の運転挙動のモデルではないが、自立走行車両に既存の経路追従制御を適用してドライバモデルと呼ばれている[11].

運転者個人の特徴を表現する研究もあり、Miyajima らにより個々のアクセル操作パターンをガウス混合モデル(GMM)として表す試みが提案されている[12]. 穏やかな運転者、普通の運転者と強引な運転者のモデルを構成し、それぞれのモデルについて排ガス試験サイクルでの速度追従挙動が報告されている[13]. J. Christian Gerdes は卓越した運転技術をもつレーシングドライバーの運転について、まず走行経路を選択しそれから逸脱しない速度に車両を制御すると説明している[14]. 運転技量について山口らは高い技量もつ運転者の操作の特徴をドライビングシミュレータによる連続カーブでの運転実験結果から抽出しているが、モデル作成よりもデータ解析法に重点が置かれている[15]. さらに、人間の運転による車両特性評価を運転者モデルを用いて行う試みがタイヤ特性の評価用に Monsma らにより提案されている[16].

この論文では運転操作とその対象であるアクセル、ブレーキとハンドルとの間には相互作用があることを考慮していないが、操作にこれらの触感や操作反力の影響がないわけではない. HMI の分野ではこれらを研究対象にしているが、多くの場合は定性的である. 佐野はシフトフイールに関するダイナミクスに関して、脳機能解析も踏まえて定量的に検討した[17]. 操舵

操作についても同様な分析をしている[18]. 人間は体をセンサー・アクチュエータとして目標軌道(道路, 速度)に追従するようアクセル/ブレーキを操作しているが, アクセルペダルやブレーキペダルの配置が操作精度に影響することが報告されている[19].

鈴木は自動車の挙動は人間が含まれる追従系において検討しなければならないと記述している[20]. 運転者内部の情報処理については, 和田が自動車運転のための予防安全の枠組みのなかで人間行動(認知-判断-操作)と機械系の相互作用の枠組みを提案している[21]. 予測を含むモデルとして車両走行シミュレーション用に与えられた走行経路において基準軌跡列と目標速度時系列を決定する予測階層とその目標に車両を制御する階層からなる運転者モデルが提案されている[22]. EUで2006年から2009年に実施されたDrivSco Projectでは運転者の習熟過程の解明のため, 適応学習と従来制御との組み合わせを実現することを目的とされたが, 予測のための画像処理が主な成果となっている[23].

運転支援に関してのモデルとして寺澤らは運転者の車線追従操舵特性をフィードフォワード成分とフィードバック成分に分けて同定し, 最適な操舵アシスト制御を提案している[24].

運転者を含めた車両の動的挙動の定量的な評価のためには車両モデルが必要となる. 特にアクセル/ブレーキから車両速度までの伝達特性は主にエンジンとトランスミッションからなるパワートレインにより決まる. 集中定数系としてエンジン燃焼室への空気流入, トルク発生および燃焼ガス排出のモデルの研究が盛んになるのは, 1970年代に米国でマスキー法が成立しそのための装置として三元触媒が導入されてからである. この触媒は燃料質量と対応する空気質量が一定の割合でないと効率よく働かない. そのために空気量を計測し燃料を計量する必要が出てきた[25]. 自動車への電子制御装置がその時より導入され, その制御の研究開発の中でモデルが研究されてきた. しかし, 運転全範囲と対象とすると, モデルは非線形にならざるを得ず, そのために時系列解析のためのモデルが主流となっている. 制御設計のためには線形モデルが使いよくまた周波数応答が欲しいところであるが, この方面の研究は製品に結びつかないこともあり, 多くない. さらに計算時間を短縮してかつ1回転の間のエンジンのトルク脈動を表す研究はほとんどないと言っていい.

単なるPIDフィードバック装置でも運転者モデルと称されることがある. また目標速度列から駆動パワーを求めてトランスミッションの伝達効率を考慮してアクセルとエンジン(モータ)駆動力の逆数からアクセル操作量を求める方法でも運転者モデルと言われることがある. こうして目標追従ができて人間と異なる場合も多い.

人間の運転行動の本質は学習による技能の習熟である. この点について定性的に言及されることはあっても定量的なモデルの提案は少なく(景山らの研究[26]があるが), さらに学習過程のモデル化の公開論文はほとんどない. 本研究は習熟する運転者モデルを定量的に構築し, 制御システムとして実現することを目的とするものである.

### 1.3 論文の構成と概要

第2章では制御装置である運転者を含む車両系の数式モデルを導出する。入出力応答が解析的に求められるよう、必要な周波数帯域で人間-車両系の低次元モデルを構成する。自動車の動力源はエンジンと CVT を選んだ。アクセル操作に対するエンジンの出力応答は燃焼室への空気流入による一次遅れ系で表現していい。CVT はギヤ比をゲインとして扱えばいい。車両は本研究では質点として扱う。人間の応答は、フィードバック系ではゲインとむだ時間として評価できる。これら車両系の低次元数式モデルを用いることで、人間の運転挙動が解析解として得られ、安定性や目的追従性能が制御理論の枠組みのなかで議論できるようになる。

第3章では習熟する運転者モデルの枠組みを検討する。人間の運転行動は、一般に環境からの情報処理とそれによる操作からなっている。それは目標や現在の状態を取り込む認知過程、そこで選択された情報からアクセルやブレーキといった操作装置とその量を決める判断過程そして手足を用いて実際に運転装置を操作する操作過程で構成される。さらに環境条件を取り込み、運転操作に反映する過程を運転者モデルに含める。具体的には目標を解釈し運転操作に適した目標に再構成すること、運転のフィードフォワード操作量を決めるための車両の応答性の知識獲得である。こうした概念あるいは運転行動要素に習熟度を表せるパラメータを付与する。これらを用いて、目標速度追従運転の計算機シミュレーションをする。その結果を熟練者と初心者の実際の運転と比較し、習熟過程のパラメータ表現ができることを示し、どの能力を習熟するとどれくらいの技能水準に到達できるかが定量的に評価できるようになった。

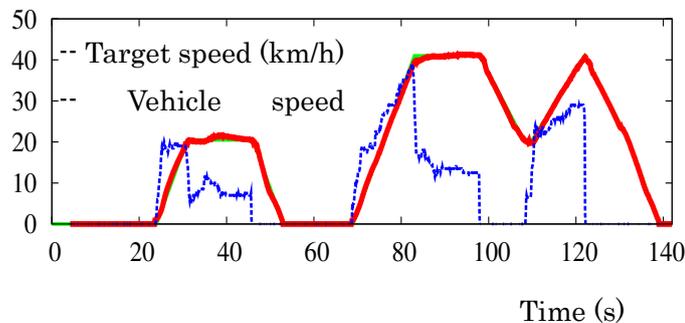
第4章では習熟のために目標に対する操作特徴の発見と特徴パラメータ学習アルゴリズムについて提案する。2章のモデルを用いて解析的に操作に対する速度追従応答を求める。応答性の制約から人間の運転ではフィードバック制御は安定性と速度追従が両立しにくく、学習によるフィードフォワード操作が運転の本質であることを示す。そのためには操作のこつをまず習得する必要がある。どのようにすれば安定的に学習できるかを繰り返し学習制御の理論により説明する。運転者はこの学習制御法を、操作パターンの発見に用いていると考えられる。そして特定パターンを表す少数パラメータを学習する。操作則を学習するアルゴリズムを運転者モデルに実装した。計算機実験で数回の試行で学習されることを示し、運転行動の学習による習熟過程の一面が制御システムとして実現および電子システムに実装できることが分かった。

第5章で本論文をまとめと今後の研究課題について述べる。人間の運転行動は習熟を含むため、それをパラメータとして含むこと運転者モデルを提案した。所定の目標速度に追従するためには、人間の情報処理と操作の応答遅れにより誤差フィードバックがそれほど有効でなく、フィードフォワードが主となることを人間-車両系の安定性から解析的に示した。人間の運転の本質は学習によりフィードフォワード操作がよりの確になることである。それを制御系として表現するため、認識-情報処理系と環境知識の枠組みでパラメータモデルに構成した。そして操作列が得られることを繰り返し学習制御から示し、パラメータ学習アルゴリズムを示した。

## 第2章 運転者を含む車両システムの応答特性と伝達関数モデル表現

### 2.1 はじめに

モデルに基づく開発 (MBD: Model Based Development) 過程が広く使われるようになり, 様々なパワートレイン (内燃機関: エンジンと変速機: トランスミッション) モデルが利用されている. たとえば内燃機関の出力を求めるには3次元の空気-燃料流動モデルからアクセル-回転数マップでトルクを求めるものまである. そして複数の駆動源をもつ車両が増えるにともない, 複合領域 (電気系-油圧系-機械系) のモデルを組み合わせた車両シミュレータも実用化されている. より運転者の近い操作による制御系の挙動解析のために習熟過程をもつ運転者モデルが提案されている. そしてそれをシステム挙動の評価に使おうとした試みがある. 今後 MBD 過程においてもこのような運転者モデルの利用が広がっていく. 人の運転は操作に対する車両の応答により変化する. 排ガス試験サイクルを運転する挙動が Fig. 2.1 に示されている. アクセル操作に注目すると, 発進開始時に一定量踏み込み, 一定速度に維持する時には踏み込み量が減少している. フィードフォワードとフィードバックにより目標値に追従していることが見て取れる. 運転は操作対象車両系との相互作用であるため, その動的挙動, 特に応答性およびゲインが重要である.



**Fig. 2.1 Emission test cycle driving behavior**

どのような基準でモデルを選定するのかについては統一的な基準はない. HILS (Hardware in the loop simulation)のような実時間適用ではモデルは簡素なもの (低次元) が好ましい. また設計用にはさらに線形性が望ましい. そのために目的から必要な応答特性 (時間領域あるいは周波数領域) を決め, それを満たす低次元のモデルを選択する手法を提案する

まず人間の認識-操作応答性から遮断周波数を決め, それを基準とする. そして制御器からの入力とそれに対する応答も必要に応じて加える.

内燃機関は吸気排気弁により出力が行程ごとに離散化されるため, 行程平均モデルを基準と

する。この基本モデルはガソリンエンジンとディーゼルエンジンに共通である。そしてその吸気量より出力トルク指標を求める。ディーゼルエンジンの場合は噴射燃料量である。そしてその吸気量／燃料量より出力トルク指標を求め、トルク波形の基底関数を用いて一行程のトルクを生成する。また行程平均モデルは基準出力に対して、出力トリミング（点火時期あるいは空気過剰率 $\lambda$ による）ができるものとする。

トランスミッションについても同様に、入力トルクに対する出力トルク応答とゲインのモデル構成とする。駆動軸から車両の応答モデルは振動伝達特性を含める。典型的なガソリンエンジンと CVT をもつ車両のモデルを構築する。そしてそれを運転者を含むモデルによる排ガス試験サイクルシミュレーションに適用して評価する。

## 2.2 車両系における運転者の応答

### 2.2.1 車両系の時間領域および周波数領域における応答性

運転の枠組みは、Fig. 2.2 に示すように、ある環境のもとで目標が与えられ、制御器が目標の先読みと車両の挙動を検知しながら運転装置を操作する。ここで制御器が人である場合を検討する。運転者は運転操作（パワートレインでいうとアクセルとブレーキ）に対して車両系の応答、加速度（広義には振動騒音を含む）、速度、位置を感知する。この操作速度は楽器の演奏をみると指による操作はかなり速いが、手または足による操作は比較的遅く、カットオフ周波数は最大でも約 5Hz である。アイドルから全開(WOT)までアクセル操作をする時間は個人差があるが 0.05 秒から 0.1 秒であるが、電子スロットルを含むとさらに応答が遅れる。操舵系においては運転操作が 3.5Hz で車両系は 10Hz 以上と報告されている[27]。神経における伝達速度は 0.05s/m とされている。

そして判断を含む場合フィードバックの応答時間は 0.3S から 0.5S とされている[26]。この時間から操作に要する時間(およそ 0.1 秒)を引いた時間が認知に必要な時間であり、これを遮断周波数で言うと約 1.0Hz になる。一方振動はさらに高周波まで感知できるが、ローパスフィルタの特性をもつ。このあたりに低次元化モデルとしての要求基準がありそうである。

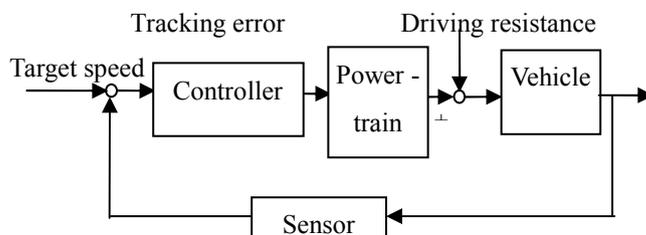


Fig. 2.2 Controller & vehicle System for emission test cycle

さらに運転は車両の応答をみて操作をするというフィードバック系となっている。フィードバック系の性能を決める上で重要なのは、応答時間とゲインである。ゲインは、アクセル操作量に対して発生する駆動力として定義できる。運転者は操作に対する車両の応答から車両特性を学習する。それを考慮すると WOT 出力（ゲイン）の正確さだけでなく、中間出力（ゲイン）のなめらかさが適切な時間応答とともに要求される。これもモデル特性に要求されることのひとつである。

## 2.3 パワートレイン出力の生成と伝達過程および周波数特性

### 2.3.1 操作から出力への過程

内燃機関における出力の発生は燃焼室内に入った燃料と空気による燃焼（圧力上昇）による。吸気弁が閉じ、いったん燃料量/空気量が決めれば最大出力可能性（トルク）と排ガス質量は決まってしまう（低次元化の鍵）。人間の運転系として操作(制御)から駆動力つまりパワートレイン出力までの伝達過程を見てみる。ここからは断らない限り日本や米国市場で最も多いガソリンエンジン + CVT (AT)を対象とする。

発熱により力は発生し、発熱量は燃料量に比例する。ディーゼルエンジンでは燃料は吸入空気量にかかわらずスモーク限界（約 $\lambda=1.3$ ）まで噴射できるが[28]、ガソリンエンジンの場合希薄燃焼でなければ、吸入空気量に応じた燃料量しか噴射できない。そこで操作量は空気量となる。空気量はスロットルバルブで制御され、スロットル通過空気量と燃焼室内への吸入空気量は質量保存則で支配され、吸入機構はポンプモデルによる[29]。スロットル通過から燃焼室吸入までの空気流量挙動は3次元であるため、厳密な刻々の運動は3次元問題として解く必要があり、この目的には商用ソフトウェアツールが多く用いられる。ここでは集中定数系としてモデルを作成し解くことにする。

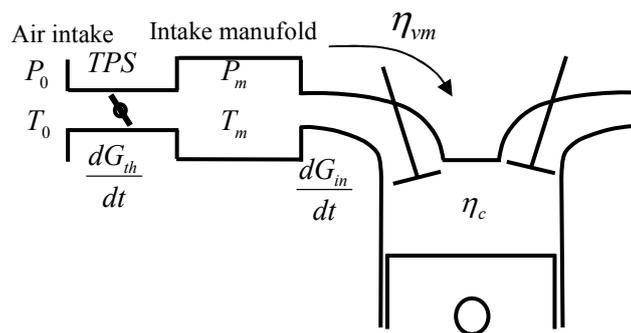


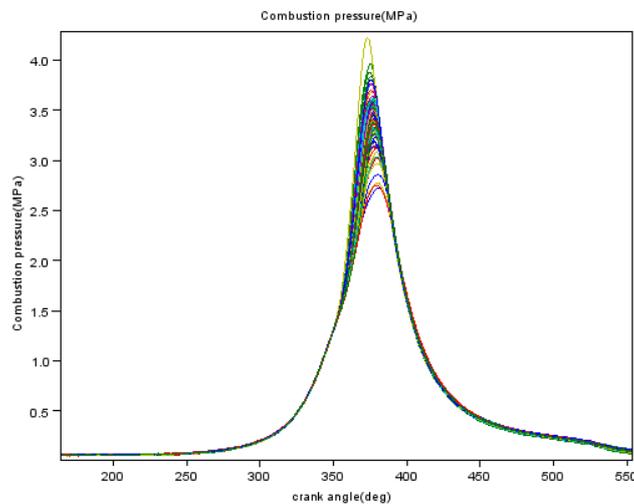
Fig. 2.3 Space - time structure of IC engine behavior

Fig. 2.3 にスロットルを通過から燃焼室吸入までの空気質量の搬送を示す。吸気マニフォールド内の空気質量増加は燃焼室内吸入空気量とスロットル通過空気量の差であり、式 (2-1) に示される。

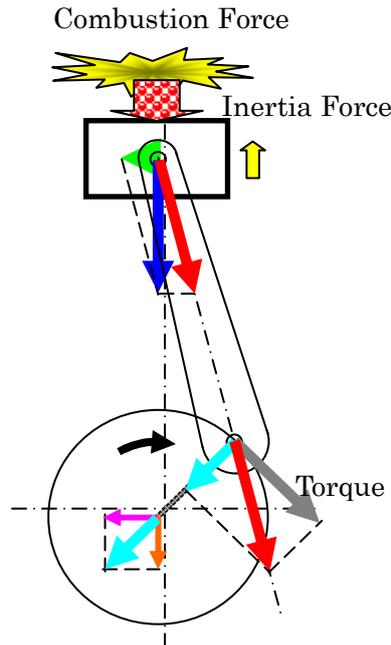
$$\begin{aligned}
 \dot{P}_m &= \dot{G}_{th} - \dot{G}_{in} \\
 \dot{G}_{in} &= k\eta_{vm}P_m \\
 k &= \frac{V_c}{V_c + V_m} \frac{\omega}{2\pi}
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

ここで  $P_m$ : 吸気マニフォールド中の空気質量(Kg),  $G_{th}$ : スロットルを通過する空気質量 (Kg/s),  $G_{in}$ : 燃焼室へ吸入される空気質量 (Kg/s),  $V_c$ : 燃焼室容積 ( $m^3$ ),  $V_m$ : 吸気マニフォールド容積 ( $m^3$ ),  $\omega$ : エンジン速度 (rad/s),  $\eta_{vm}$ : 吸気効率

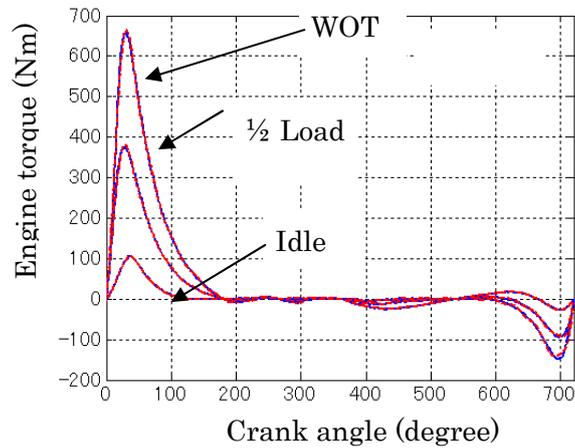
しかし、前述のように出力は燃焼室内空気量で決まるため、吸気弁が開いて閉じる期間の総量が質量保存則から分かればよい。そこで出力（および排ガス）のためには行程ごとに離散化された量でいいことになる。これには行程平均モデルを用いることができる。この量は  $180^\circ$  CA 間保持されるので、モデルとしては 0 次サンプル+ホルダとなる。エンジントルクは、よく知られているように、Fig. 2.4 に示される燃焼圧によるトルクとピストンとコンロッドからなる往復慣性質量によるトルクが合成されたものである。前者は Fig. 2.6 に示されるように出力により変化し、後者は回転数だけに依存する。発熱量を計算すると燃焼圧が得られる。Fig. 2.5 にトルク発生機構を示す。この機構により振幅変調がかかり高調波が発生する。



**Fig. 2.4 Amplitude modulation, Force: Combustion pressure profile during consecutive 100 ignitions**



**Fig. 2.5 Amplitude modulation, Geometry: Combustion force is converted to torque**



**Fig. 2.6 Combustion force derived torque profile is depending on load**

低次元モデルを構成するために、燃焼圧波形(Fig. 2.4)やトルク波形でなく前述の出力指標(空気量または燃料量)のみを使う。燃焼圧トルク(Fig. 2.6)は回転数次数の高調波により構成されている。この振幅を平均トルク出力指標で正規化すると Fig. 2.7 に示すように、回転速度や負荷が変わっても正規化振幅はほぼ一定になる。そこで式(2-2)のフーリエ逆変換により、トルク波形が生成できることが分かる。式(2-2)を用いると8次までの成分のみで十分なトルク再現精

度をもつ．式(2-2)は行程平均トルク [30]を用いた脈動トルク波形生成のモデル表現である．

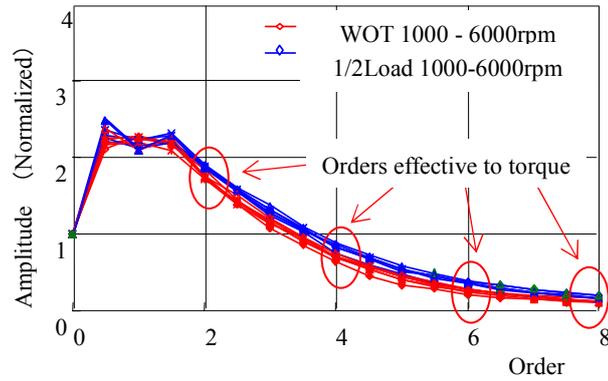


Fig. 2.7 Frequency property of combustion torque (1 cylinder)

$$T_e = T_{e0} + T_f + T_{e0} \sum_1^n \{ (a_{cn} \cos(n\omega t) + b_{cn} \sin(n\omega t)) \} + b_{i2} \sin(2\omega t) \quad (2-2)$$

ここで,  $T_e$ : エンジントルク (Nm),  $T_{e0}$ : 行程平均トルク (Nm),  $T_f$ : 摩擦トルク (Nm),  $b_{i2}$ : 慣性トルク係数,  $a_{cn}$ : n 次の燃焼トルク係数,  $b_{cn}$ : n 次の燃焼トルク係数,  $\omega$ : エンジン速度 (rad/s),  $t$ : 時間 (s)

実時間シミュレーションへの適用のためには, 基本トルク波形を振幅変調する演算が適している. 低次元モデルを構成するために, 前述の出力指標 (空気量または燃料量) のみを使う. 筒内吸入空気量は吸気管絶対圧(MAP: Manifold absolute pressure)に比例する. この MAP はスロットルの動作に対して一次遅れの関係になる.

Fig. 2.8 に離散化過程を含む質量保存則と振幅変調を加えたエンジンモデルを示す.

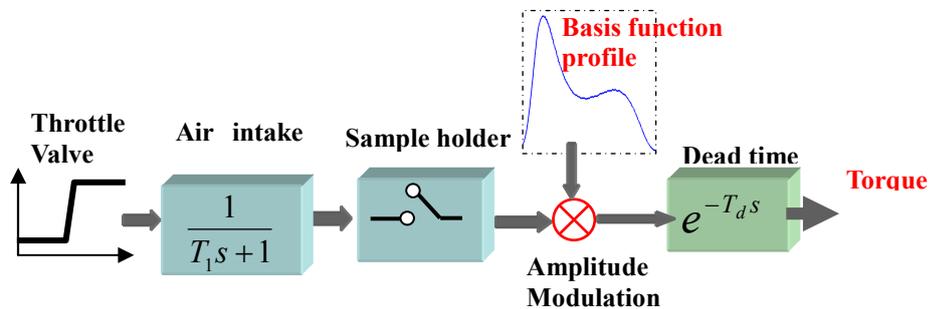


Fig. 2.8 Torque generation and transfer process with basis function

実際の出力は Fig. 2.4 に示すような変動をとまなう燃焼によることから, 目的によっては確

率的な扱いをしたほうがよく、その場合は出力指標に確率関数をかける。

最近では電子スロットルが主流になってきたため、運転者が直接操作するアクセルペダルからスロットル動作までにも電気モータのサーボ系の応答遅れがある。

吸気弁が閉じて出力指標（空気質量）が決まってから実際に出力となるには圧縮行程をはさんで膨張行程を待たねばならず、排ガスはさらに排気行程をへて、計測点までの輸送過程を経て、ようやく計測可能になる。さらに入センサなどの計測器の応答を経て信号となる。

燃焼行程で発生した力はコンロッドとクランク軸を通じてトルク（脈動）となり、クラッチを経てトランスミッションに入る。トランスミッションはパワー変換器でギヤ比がゲインとなるが、トルクコンバータを持つ場合はその応答性、特に CVT では変速応答（過程）の考慮が必要となる。ここには油圧系が加わることになる。そしてこの駆動力と走行抵抗の差で車両質量が駆動され、速度が発生する。

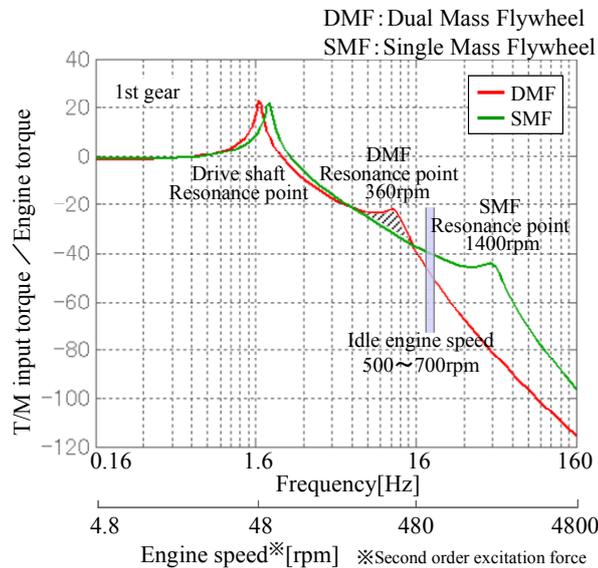


Fig. 2.9 Power transfer path frequency property with clutch

### 2.3.2 システムの線形表現と周波数特性

周波数特性が分かれば、挙動が容易に推定できる。多くの内燃機関(IC: Internal combustion engine, エンジン)の現象は非線形である。非線形システムでは摂動入力とその応答により周波数応答が求められるが、ある平衡点のまわりの伝達関数を用いた方が見通しが良くなる。内燃機関でのパワー伝達はエンジン速度と同期しているため、ある回転数と負荷の近傍で線形化でき、それから伝達関数が得られる。

#### 2.3.2.1 内燃機関での空気質量の搬送過程とトルク発生遅れ

スロットルから燃焼室への空気質量輸送は式(2-1)より一次遅れの伝達関数が導出される。エ

エンジンサイクルのなかの行程遅れは伝達関数では無駄時間として表される。これらは(2-3)式のように結合した伝達関数として表される[31]。この時定数と無駄時間は速度依存であり、4気筒2.0Lエンジンで吸気管容積が4.0Lの場合、典型的なエンジン速度1500rpmの時に、時定数0.18秒、無駄時間0.06秒となる。

$$G_e(s) = \frac{K_e}{(T_{ea}s + 1)} e^{-L_e s} \quad (2-3)$$

ここで、 $K_e$ : 単位質量あたりのトルクゲイン(Nm/Kg),  $T_{ea}$ : 吸気系の時定数(s),  $L_e$ : 行程遅れ(むだ時間)(s)

### 2.3.2.2 クラッチ系

クラッチ系は質量、剛性と減衰要素で構成される。Fig. 2.9に示されるような典型的なトルク伝達特性は式(2-4)のような伝達関数で表される。この伝達関数は周波数が高い方の共振部を無視して2次遅れ系で近似できる。

$$G_{cl}(s) = \frac{\omega_{n1}^2}{(s^2 + 2\xi\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2)} \frac{\omega_{n2}^2}{(s^2 + 2\xi\omega_{n2}s + \omega_{n2}^2)} \quad (2-4)$$

ここで、 $\omega_{n1}$ : 共振周波数1(rad/s),  $\xi$ : 減衰係数,  $\omega_{n2}$ : 共振周波数2(rad/s)

### 2.3.2.3 トルクコンバータ付トランスミッション

停止からの発進ではトルクコンバータの応答性を考慮すべきである。ここでのトルク伝達は入力速度の二乗に比例する[32]。線形近似により伝達関数は一次遅れ系となるが、式(3-5)に示されるように、時定数は慣性モーメント、容量係数と入力速度に依存する。この時定数は発進時に約1.0秒である。

$$G_{tc}(s) = \frac{\tau(e)}{\frac{I_e}{2C(e)\omega_{eo}} s + 1} \quad (2-5)$$

ここで、 $e$ : 入力速度に対する出力速度比,  $\tau$ : トルク係数,  $I_e$ : 入力軸とその上流の慣性モーメント(Kgm<sup>2</sup>),  $C$ : 容量係数,  $\omega_{eo}$ : 平衡点のエンジン速度(rad/s)

過渡的な車両挙動を評価する場合はCVTの変速過程を考慮すべきである。CVTの入力軸とその上流の慣性モーメントは他の形式のトランスミッションより大きい。変速速度が高い時にはこの慣性の加速減速による逆のトルク流入があり、アクセル操作とは逆の応答を示すことになる。排ガス試験サイクルではアクセルの踏み込みや戻しを急激にする必要はないので、こうした速い変速は起こりそうにない。そのため直結クラッチが契合したあとは、トランスミッションの伝達関数はゲインのみとしてもいい。

### 2.3.3.4 車両応答

トランスミッション出力から車両速度までの伝達関数を導出する。車両速度が十分低くないときには走行抵抗のなかで空気抵抗は無視できない。この空気抵抗は車両速度の二乗に比例する。走行抵抗は平衡速度の近傍で線形化されているので時定数は車両速度に依存する。

$$Gv(s) = \frac{K_{def}}{Ms + \alpha v_0} \quad (2-6)$$

ここで、 $M$ ：車両質量 (Kg),  $\alpha$ ：空気抵抗係数,  $v_0$ ：平衡点の車両速度 (m/s),  $K_{def}$ ：トランスミッション出力から駆動力までのゲイン

この伝達関数の周波数特性は主に車両質量と最終減速比に依存する。振幅は  $K_{def}/M\omega$  以下であり、周波数  $K_{def}/M$  で1となる。

### 2.3.3.5 車両システムの応答

上記の吸気、行程遅れ、クラッチ、トランスミッション、車両の伝達関数を結合して、運転操作から車両速度までの伝達関数は式(2-7)のように表される。回転に同期した脈動は振幅変調の搬送波でクラッチにより復調される時に減衰するものであるから、ここに含めていない。負荷頻度の多い回転数 1500rpm の近傍での典型的な周波数応答を Fig. 2.10 にしめす[33]。

$$G_v(s) = \frac{K_e}{1+T_{ea}s} e^{-T_a s} \frac{\omega_{n1}^2}{(s^2 + 2\xi\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2)} \frac{K_{tm}}{1+T_{tm}s} \frac{K_{def}}{Ms + \alpha v_0} \quad (2-7)$$

ここで、 $K_{tm}$ ：トランスミッションのトルクゲイン,  $T_{tm}$ ：トランスミッションの時定数 (s)

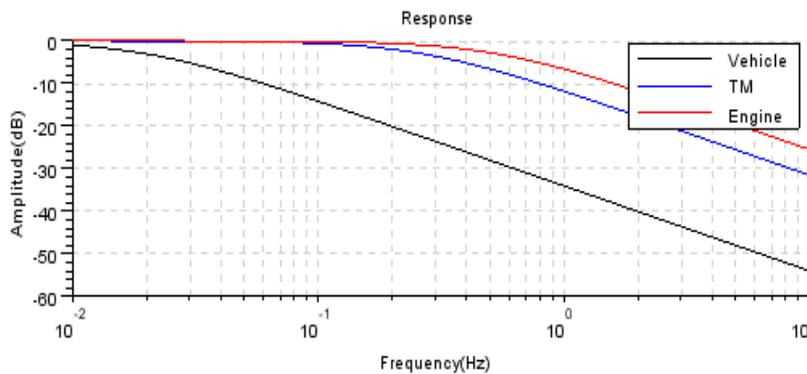


Fig. 2.10 Frequency response of the test vehicle at engine speed 1500rpm

## 2.4 低次元パワートレインモデルと運転者系への適用

運転者を含む車両系の挙動を十分な精度で表すことのできる低次元の無次元モデルを構成する。対象とする車両システムは運転者が直接制御するアクセル踏み込み量が入力で車両速度が出力である。この間に内燃機関とトランスミッションが介在している。

人間操作の周波数特性の制約から、スロットルから筒内への吸気はエンジン速度に比例する時定数をもつ一次遅れとする。吸気弁が0次のサンプルホルダとして機械的に働くため、行程平均モデルにより吸入空気量に対応した出力指標を求め、これを基底関数により振幅変調する。これは始動を含む低速の挙動評価と振動騒音の評価のためである。熱発生過程のモデルを持たずに基底関数（脈動トルク波形）を適用する理由は、モデルの簡易化と高速化のためであるが、精度低下の影響は少ない。吸気から排気までの行程遅れは速度に逆比例した無駄時間として扱う。

トルクコンバータは伝達トルクが入力回転速度の二乗に比例する流体モデル、クラッチは質量-ばねモデルである。トランスミッションはギヤ比のみか変速過程は含むとしても油圧-機械系を一次遅れとするのみで十分である。車両は質量に駆動力と走行抵抗が加わるフードバック型とする。

人間の操作に電子制御装置(ECU: Electronic control unit)が介入することがあり、その再現のため ECU を含む必要があることがある。SiLS (Software in the loop simulation)では ECU とプラントとの間で ECU の内部で量として扱われている噴射量などが直接交換できる。しかし HiLS の場合、入出力がタイミング信号である速度信号（エンジンおよびトランスミッションはパルス割り込みの間隔から速度を計算）と噴射燃料量指令（PWM として出力）をその動作のとおり作動させるのはかなり困難である[34], [35]。

### 2.4.1 運転者-車両相互作用システムへの適用

運転は車両と人との相互作用であり、そして運転者は車両の特性を学習する。特に、目標追従運転の場合に、Fig. 2.11 の判断過程に示すように、運転者は習熟するにともない車両の特徴（応答性とゲイン）を運転行動に反映する。排ガス試験サイクルにおけるある程度習熟した運転の挙動を Fig. 2.12 に示す。パワートレインの特性が運転操作に反映される様子が停止からの加速と加速途中のアクセル操作にみられる。前者は操作も含む遅れを補償するための先取り操作であり、後者は速度上昇にともなうギヤ比が小さくなることに適応した踏み増し操作である。Fig. 2.13 にその特徴を拡大して示す。こうしたことは経験の豊富な運転者に見られることで、排ガス試験サイクルの運転挙動を示す Fig. 2.1 からも読み取れる。

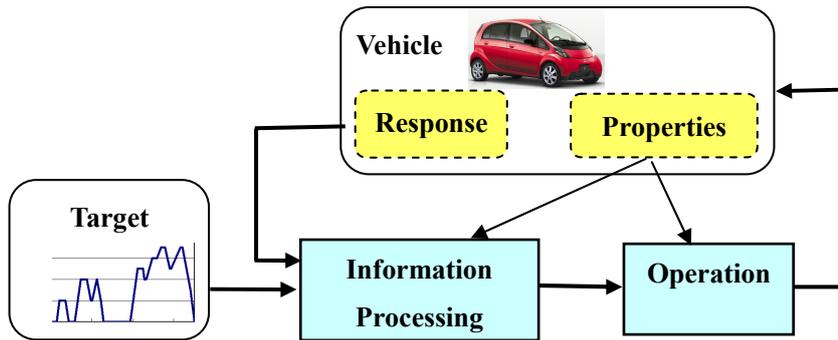


Fig. 2.11 A driver model with leaning capability – vehicle interactive environment

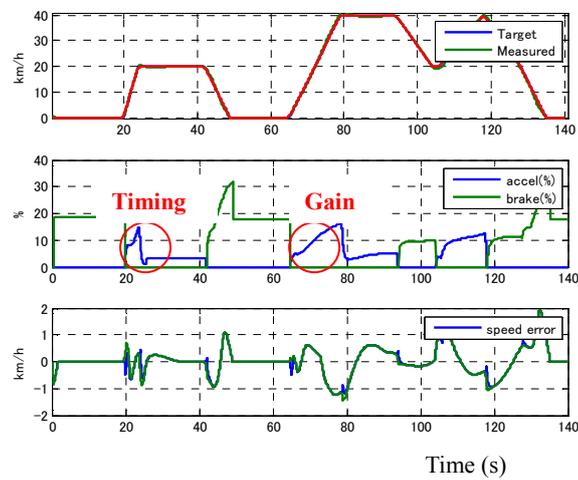


Fig. 2.12 Adapted driving behavior in an emission test cycle with the model

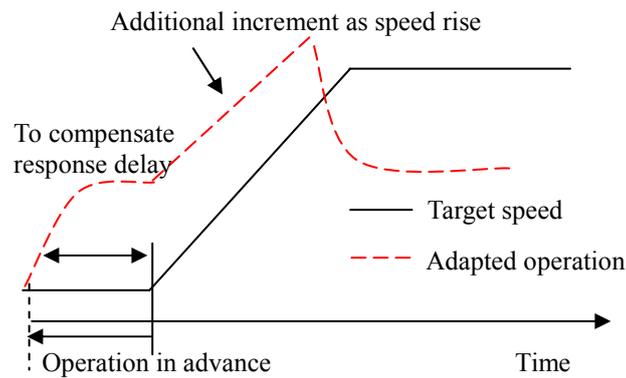


Fig. 2.13 Operation timing learning

排ガス試験サイクル運転で、エンジン停止をしない場合はこの脈動部がなくても精度には影響はないが、振動評価には脈動は必要である。

### 2.4.2 振幅変調モデルによるエンジン始動中の車両挙動と振動騒音評価

エンジン（内燃機関）始動の間はスタータ、エンジンおよびクラッチの間のトルク(負荷)と速度のつりあいで Fig. 2.14 に示すように振動的に速度が上昇する。このような速度変動は始動期間中の不愉快な振動を引き起こすため、システムとしての評価が必要である。排ガス試験サイクルでは、もしエンジンの停止/始動制御が用いられなければ、脈動トルクがなくても著しい精度の悪化は起こらない。脈動トルクモデルはエンジン始動過程の評価には不可欠である。振動騒音開発にもまた脈動トルク波形が必要である。多くの振動騒音評価過程では、周波数領域での解析が用いられるため、一サイクル間のトルク情報で十分である。脈動トルクの時間波形はショック/しゃくりのような過渡的な振動抑制手法を開発するために必要となることがある。

提案した行程平均モデルと振幅変調手法を用いると要求されているトルク波形は短時間で容易に作ることができる。人間はこれまで述べたような着荷周波数の振動をアイドル回転数以上でも気づくが、気づいてもそれに対する操作はないはずである。

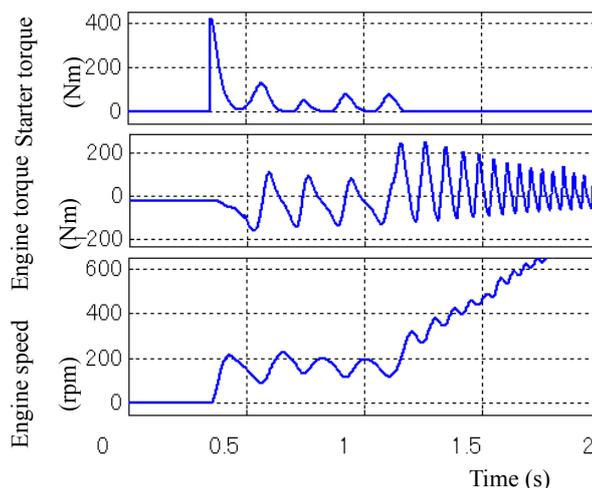


Fig. 2.14 Engine speed & torque during starting

## 2.5 まとめ

モデルに基づく過程の適応拡大により運転者を含む車両モデルが必要になっている。自動車の研究では様々なモデルが使われているが、効率的なシミュレーションの実行および制御系設計のために低次元化が必要でできれば線形化も望まれる。特に HiLS のような実時間実行の目的には必須である。運転行動は人と車両の相互作用である。運転者モデルを含む車両系のモデルは、運転者の操作と感覚の応答性に合わせた特性が必要でまたそれがあれば十分である。人間の運転操作の遮断周波数はフィードフォワードには 5Hz, フィードバックは高々 3Hz 程度である。

内燃機関による駆動力発生は、3次元の気体&液体流動と化学変化をともなう熱力学をもつため、本質的に非線形現象である。化学エネルギーから機械エネルギーへの変換過程では、ピストン機械構造と最大燃焼圧に起因する着火周期の大きな起振力、(振幅は平均出力の2倍以上)が発生する。

吸気弁は0次ホルダの役割をもちトルク(熱発生)のもとになる空気と燃料が離散化される。アクセルによる空気量制御は一次遅れをもつ行程平均モデル表している。往復内燃機関によるエネルギー変換過程はAM放送に使われている振幅変調と考えてよく、搬送波の基本周波数は着火周波数である。搬送波(基底関数)を解析すると、運転状態によらず、高調波成分の比率がほぼ等しい。そこでトルク指標のみから1サイクルの時間波形が再現できる。そしてこの搬送波成分はクラッチのローパスフィルタ特性により低減される。

これらのことにより運転者の操作から内燃機関を通じた車体駆動までの伝達過程は低次元モデルが適用できることが示された。さらに速度を決めると、線形化することができ、周波数応答が得られて見通しのいいものとなる。

通常の運転ではAMによる振動は感じられても、時系列の波形は認識できないので、そのための操作反応はない。それで振動騒音を評価しないならAMはなくてもいい。しかし、始動時には脈動トルクの周波数が低く、スタータとクラッチの振動に影響するため、モデルとして必要である。

この概念でモデルを作成、運転者の学習を含むシミュレータに適用した。運転者の学習によりパワートレインの応答遅れと速度依存ゲインに対応した運転操作が見られた。

## 第3章 運転技能学習過程の概念とモデル設計

### 3.1 はじめに

ITS, ACC など運転支援技術の開発が進んでいる[36], [37], [38]. 支援を受ける運転者の技術水準はさまざまでありそれを一律に扱っていいわけでない. さらに同じ運転者でも経験とともに運転技術に習熟できる. また, 運転する環境は多様で目標も変化するが, いったん習熟すると短期間にその環境に適応できる. 運転支援技術や今後の車両開発のために運転者モデルが必要とされている. このモデルの構造は, 環境が異なると使えない場合が多い機械ロボット系のものでなく, 習熟および別環境への適応など人間の特徴をもつ必要がある[39].

運転は情報処理と操作からなるが, 実時間で動く車両との相互作用であるため, 適切なタイミングで適切な操作量を加えることが求められる. これが満たされないと, 最悪道路からの逸脱や別な車両や歩行者に衝突することになる. 運動競技や音楽演奏と違い, 通常の運転では初心者と熟練者の間に運動能力の差はないといわれている. そこで入力情報とその処理過程および操作技能の中に違いを見出すことになる.

環境への適応や習熟過程の要因の寄与度が示せるように構造とパラメータが明示的なモデルを構成する. 運転行動は外部情報から運転操作を生起させることであり, 逐次的な情報処理と仮定する. この情報処理から運転装置を動かす過程を認知, 判断と操作の機能に分割する. そしてそこに学習による能力向上機能を含む. このモデル構造を目標が明確で運転挙動の評価がしやすい排ガス試験サイクルの運転に適用する. 初心者と熟練者が日本の 10・15 モード試験サイクルを運転する試験をし, そこでの挙動から運転能力習熟の特徴を抽出する. 提案したエージェントモデルが実運転者の習熟過程を表現できることを実測データを用いて検証する.

### 3.2 運転者の能力と習熟

#### 3.2.1 熟練過程

従来研究において, 技術の高い熟練者と非熟練者の挙動の違いから熟練に関係すると思われる能力を抽出し, 定量化するものである. 自動車運転においては運転者の挙動を定量的に評価することが難しいため, 熟練者として運転そのものの経験が豊富な運転者が熟練者として扱われることが多い [40], [?]. しかしある環境で十分に熟練した運転者が別の環境では必ずしも上手く運転できるとは限らない. 新しい環境では運転性能が低下することが考えられる. このような環境の変化が運転性能にどのように影響を与えるのかということに着目した研究は少ない.

運転結果を定量的に評価できる指標  $f_e$  を仮定し, この指標を車両などの環境に依存しない形で規格化することができれば, この指標は走行回数にともない向上すると考えられる. 環境が変わると運転者は慣れていないためこの指標は低下する. しかし再度走行を繰り返すと, 環境に対する知識に相当す

る脳内モデルが修正され、この指標は向上すると考えられる。

そこで本研究では環境の変化が走行結果におよぼす影響に着目して熟練過程を形式化する。

運転支援設計やモデルに基づく開発(MBD)においては特徴パラメータにより熟練度を表すモデルが必要であるが、これに関連する研究は多くない。

### 3.2.2 習熟過程の概念モデル

一定の環境における評価値の変化を考える。走行を繰り返すにしたがって環境に慣れていくため評価値はよくなるが、ある程度慣れるとその速さは徐々に遅くなりやがて収束すると考えられる(Fig.1).

評価指標を用いて熟練度を表し、それにより熟練過程を示す。特定の運転環境,つまり対象車両が固定され、運転目標が特定されている排ガス試験サイクルであれば、繰り返しにより評価指数が上がることを次のような式で定量化できる。

評価値を  $f_e$ ,  $t_e$  をその環境における経験(時間),  $\phi_A$  を評価値が収束する値,  $\phi_B$  を習熟する早さ,  $\phi_C$  を初期値とする。次の式で表される。

$$\frac{d}{dt_e} f_e(t_e) = \phi_B(\phi_A - f_e(t_e)) \tag{3-1}$$

$$f_e(0) = \phi_C \tag{3-2}$$

これより

$$\begin{aligned} f_e(t_e) &= (\phi_A - \phi_C)(1 - e^{-\phi_B t_e}) + \phi_C \\ &= \phi_A \left(1 - \left(1 - \frac{\phi_C}{\phi_A}\right)e^{-\phi_B t_e}\right) \end{aligned} \tag{3-3}$$

が得られ  $f_e(t_e)$  の推移は一次遅れ系で表すことができる。

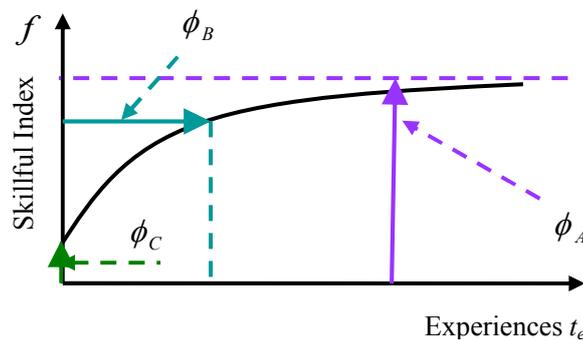


Fig. 3.1 Skill acquirement process

もし、ここで環境(対象車両)が変わると同じ運転操作で同じ車両挙動にはならないため、評価指数は一時的に低下するが、それは初期値まで低下することではない。これは、特定の車両に依存しない技能(共通のしぐみ)が獲得されているためである。熟練者は短時間でアクセルに対する車の応答性を

見抜くといわれている[41]. そして繰り返しにより, 以前の水準より高い点に到達できる.

$\Phi_A$   $\Phi_B$   $\Phi_C$  が高い運転者ほど熟練しているといえる.  $\Phi_A$  はどの程度の技能があるかを示す潜在能力である,  $\Phi_B$  はどの程度の速さでその能力を顕在化できるかという顕在化能力と呼ぶ.  $\Phi_C$  は未知の環境において正しく適応できるかを示すもので汎化能力とよぶ. これらの能力が熟練度を表すパラメータであるとする.

さらに経験の増加にともなう潜在能力, 顕在化能力および汎化能力が向上と環境変化について考える. 評価指標の推移は次の式で表される.

$$f_e(T_e, t_e) = (\phi_A(T_e) - \phi_C(T_e))(1 - e^{-\phi_B(T_e)t_e}) + \phi_C(T_e) \quad (3-4)$$

ここで  $T_e$  は環境の変化にかかわらずその運転者のすべての経験であり  $t_e$  はある環境での経験を示す.  $\Phi_A(T_e)$ ,  $\Phi_B$  と  $\Phi_C$  が向上することにより, 一定環境における  $f_e(T_e, t_e)$  の推移は変化していく. すなわち熟練度合いは潜在能力, 顕在化能力および汎化能力によって定まる. これらの能力も走行結果の推移と同じように一時遅れ系のように推移していくと考えられる. このような環境変化を含む熟練過程の一例として, 式(4-4)で表される場合を Fig. 3.2 に示す. 変化は 50, 100, 150 秒で起こるとした.

$$\begin{aligned} \phi_A(T_e) &= 20(1 - e^{-0.02t}) + 10 \\ \phi_C(T_e) &= 0.2(1 - e^{-0.003t}) \\ \phi_C(T_e) &= 13(1 - e^{-0.02t}) + 2 \end{aligned} \quad (3-5)$$

車両の目標挙動を実現(近似的に)する操作列はひとつとは限らない. 特に実際の環境における運転ではそれがあてはまる. 別の知識から別の操作列ができることもある. そのため, 前述のような滑らかな熟練過程をとらない場合があることも考えられる.

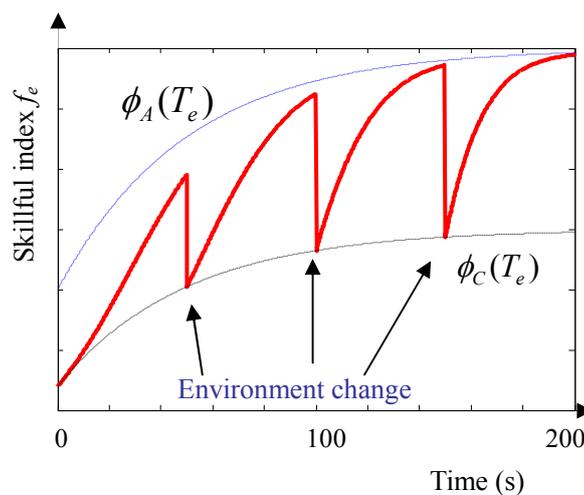


Fig. 3.2 Skill acquisition process with environment change

### 3.2.3 運転者の能力との対応

運転挙動の評価の違いは運転技術と環境に対する慣れによって生じると考えられる。ここで運転技術とは環境の変化に関わらない認識や判断、操作の正確さなどとする。前述した潜在能力は環境を十分に理解した状態で発揮できる評価を示しており、運転技術によって定まると考えられる。さらに顕在化能力は環境が変化したときに良い結果がだせるようになるまでの速さ、また汎化技術は初めて経験する環境でもうまく運転することのできる能力であり、顕在化能力と汎化能力の優れた運転者は環境になれるのが速い運転者と言い換えることができる。ここで熟練度の定量化にさいして運連挙動の定量的な評価が必要になる。本研究では排ガス試験サイクルでの目標速度追従運転を主な対象として運転者モデルを構成する。ここでは運転行動の目標が厳密に定義されており、それにより運転挙動の評価が定量的に行えるからである。

## 3.3 運転者モデルの構成

### 3.3.1 速度追従運転の目標と環境

排ガス試験の目標速度追従運転はある時系列にそってあらかじめ定められた目標速度に車両速度を追従させるものである。実車両を用いた試験では、シャーシダイナモと呼ばれるローラの上で車両は走行する。運転はアクセルとブレーキのみの操作でよく、操舵は必要ない。運転者に与えられる情報は目標速度時系列と車両速度である[42], [43]。Fig. 3.3 に車両試験用の装置と運転者への速度指示方法を示す。運転者に表示される目標速度の例としてFig. 3.4に日本の10・15モード試験の目標を示す。こうした試験の車両走行のモデルは確立されているため、モデル挙動の評価は計算機シミュレーションでおこなえば十分である。

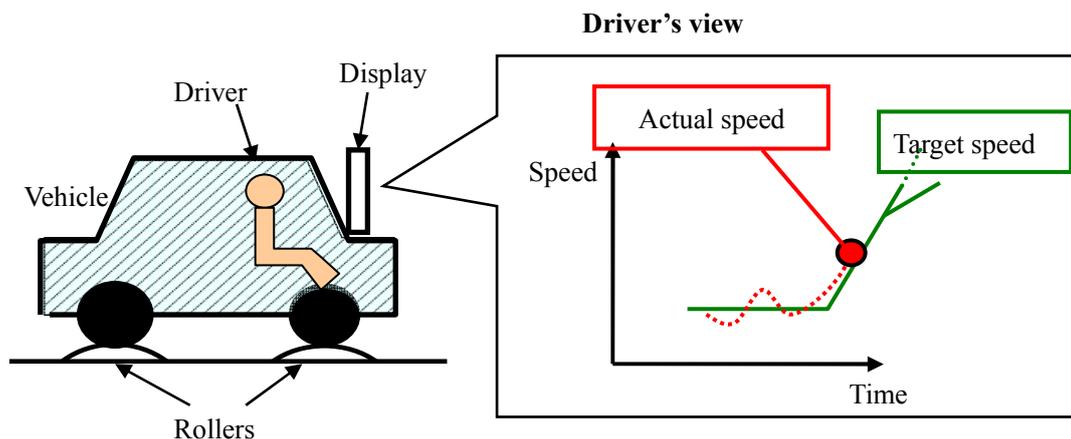


Fig. 3.3 Emission test cycle driving

車両速度は決められた誤差内に入ることが必須の条件であり、さらにこの運転で排ガスと燃費を計測するためアクセルとブレーキの操作は滑らかな方がいい。そのため運転挙動の評価として速度誤差と運転のなめらかさの双方が少なくとも必要である。通常の運転に比べ、速度偏差の許容度は小さい

ため、運転者はアクセル・ブレーキの操作でどのように車両速度が変化するかより正確に知る必要がある。

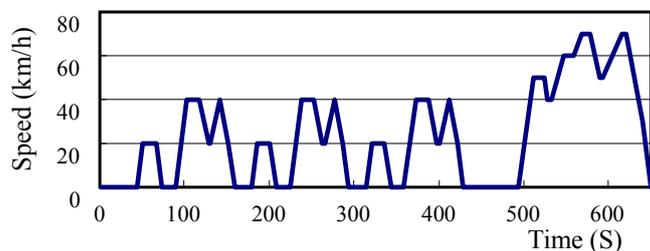


Fig. 3.4 Target speed in 10·15 mode emission test cycle

### 3.3.2 モデルの要件

#### 3.3.2.1 運転者モデル

運転者モデルは次の機能を持つことが必要である。

- ・目標速度追従を目的とする制御器の役割をもつ
- ・エンジンおよびトルクコンバータを介したトルク発生の遅れ、アクセルと速度に依存したギヤ比の変化、車両応答性を考慮できる

さらに環境変化(目標速度系列、車両特性)に対する熟練過程を再現できるように次の要件が必要

- ・運転者の認識・判断・操作がそれぞれどのような機能を担っているか明示的に解釈できる
- ・前述の環境変化が運転の意思決定に与える影響を表現できる
- ・運転者の熟練度(技能)による走行挙動の違いを表現できる

#### 3.3.2.2 車両モデル

前章で述べたように、エンジンのトルク発生、トルクコンバータの動作、CVT の変速と車両の走行抵抗を含む。アクセルまたはブレーキ操作から車両速度までを、十数 Hz の範囲で表現できる動的特性をもつ。前章に記述した数式モデルである。

### 3.3.3 運転者モデルの枠組み

目標を含む環境からの情報から運転装置を動かす過程を認知、判断と操作の機能で構成する。認識系は目標速度追従運転に必要な情報を取り込み、判断系に伝達する。判断系は認識からの情報をもとに操作に必要な目標を設定する。操作系は目標にしたがって運転装置を操作する。フィードフォワードとフィードバックは判断系に入る。そこに目標速度をある時間先まで読み、人間-車両の応答遅れの補償と操作がしやすくなるように滑らかにする目標速度修正モデルを加える。さらに、車両特性モデル(操作量から加速度への非線形ゲイン、これは主に操作に対するゲインに相当)を加えた。Fig. 3.5 に運転者モデルの構造、遅れと不確定性を含む情報伝達過程を示す。

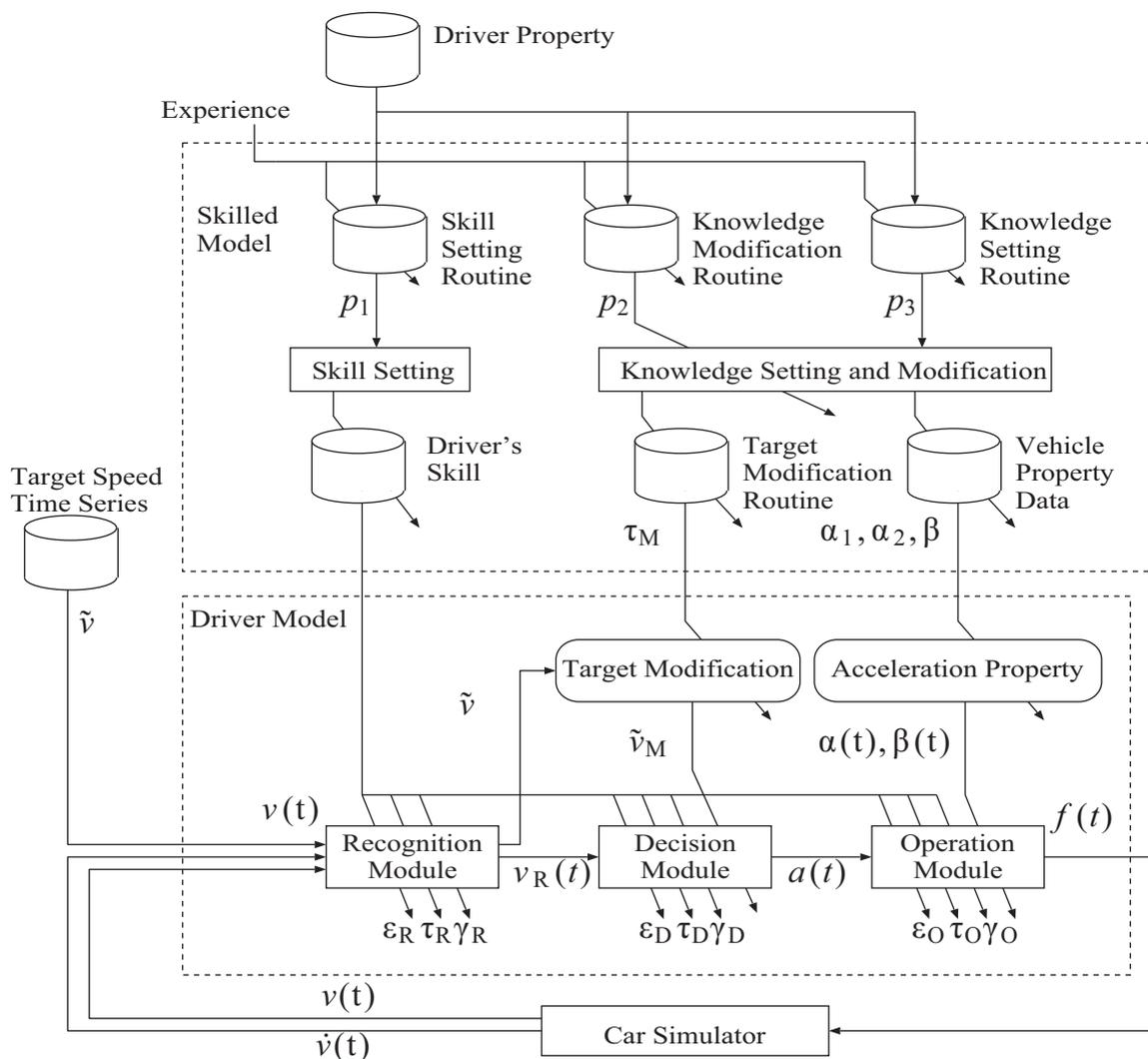


Fig. 3.5 Framework of the driver model

### 3.3.3.1 認識系

認識系は目標速度追従運転に必要な情報を環境から取り込み判断系に送る。電子制御装置であれば、制御の目標値は電圧など範囲の決まった値で与えられ、現在の状況についてもセンサ出力として電圧など決まった値のフィードバックが得られる。センサを選択され設置された時点で、環境認識の枠組みは決まってしまう。それと異なり、人間の運転者では運転者は主に視覚からの情報をもとに、そこから必要な情報を切り出すことから始めなければならない。そのため、速度認識など一見明らかかなような情報処理でも熟練度を含む個人差が現れる。

ある時刻  $t$  における車両速度  $v(t)$  および加速度  $\dot{v}(t)$ 、さらに追従対象である目標速度時系列  $\tilde{v}(t)$  をよりどころに運転していると考えられるので式(3-7)を認識系への入力とする。この  $v(t)$  に認識誤差、認識遅れ、認識の時間粒度を加味したものを判断系への出力とする。

運転者は刻々発生する事象を連続的に感知しているのではなく、通常はある時刻ごとに見ているサンプル系としてとらえた方がいい。環境情報の中から運転者は目標速度、速度および加速度をよりどころに運転していると考えら得るので、認識系への入力情報は(3-6)式で表されるベクトルとする。

$$\mathbf{v}(t) = (v(t), \dot{v}(t), \tilde{v}(t + \theta)), \quad (-t \leq \theta \leq T - t) \quad (3-6)$$

ここで  $t$ : 時間,  $T$ : 全走行時間,  $v$ : 速度,  $\dot{v}$ : 加速度,  $\tilde{v}$ : 目標速度 である。

$$\begin{aligned} v_R(t) &= (v_R(t), \dot{v}_R(t), \tilde{v}(t + \theta)), \quad (-t \leq \theta \leq T - t) \\ v_R(t) &= v(k\gamma_R - \tau_R)(1 + \mu_R) \\ \dot{v}_R(t) &= \dot{v}(k\gamma_R - \tau_R)(1 + \mu_R), \quad (\mu_R \in [-\varepsilon_R, \varepsilon_R]) \\ &(t - \gamma_R < k\gamma_R \leq t (k = 0, 1, 2, \dots)) \end{aligned} \quad (3-7)$$

認識過程において遅れと誤差が生じるため、それらを加えたものが判断過程への出力になる(式(3-7))。以降これらの変数に添え字 R, D, O をつけて認識, 判断, 操作過程のそれを示す。

### 3.3.3.2 判断系

判断系は認識により得られた情報をもとに操作に必要な目標を設定する機能をもつ。同じ情報に対する判断に習熟を含む個人差があることは認識系と同じである。

ここではペダル操作量は速度でなく加速度に直接的に作用することを考慮して、目標として加速度を用いる。判断系では後述する目標速度修正モデルによって決定される修正目標速度  $v_M$  に追従するような目標加速度を決定する。得られた目標加速度が熟練者設定する最適なタイミングで決定された最適値であるとし、技能の劣る運転者の判断には遅れや誤差を伴うものとする。

$$a_{FF}(t) = \frac{d}{dt} \tilde{v}_M(t) \quad (3-8)$$

$$a_{FB}(t) = \frac{1}{\tau_B} (\tilde{v}_M - v_R(t)) \quad (3-9)$$

$$a'(t) = a_{FF}(t) + a_{FB}(t) \quad (3-10)$$

を理想的な熟練運転者の目標化速度とする。この  $a'(t)$  精度誤差  $\varepsilon_D$ , 時間遅れ  $\tau_D$  および時間粒度  $\gamma_D$  のパラメータの影響を考慮して目標化速度を

$$\begin{aligned} a(t) &= a'(k\gamma_D - \tau_D)(1 + \mu_D), \quad (\mu_D \in [-\varepsilon_D, \varepsilon_D]) \\ &(t - \gamma_D < k\gamma_D \leq t (k = 0, 1, 2, \dots)) \end{aligned} \quad (3-11)$$

と定める。判断系はこの目標化速度  $a(t)$  および現在の加速度  $\dot{v}_R(t)$  をあわせて

$$\mathbf{a}(t) = (a(t), \dot{v}_R(t)) \quad (3-12)$$

とし、操作系へ送る。

### 3.3.3.3 操作系

操作系は判断系で決定した目標を元に操作力を決定し、車両につたえる機能を有する。操作は人間の手足であり、ここでは記述しないが位置制御あるいは力制御をもつ運動をする。そのため手足自体がセンサを持つアクチュエータとなる。さらにこれらセンサ／アクチュエータは基準点を持つ必要があるため、座席形状と密接な関係のある運転姿勢が影響している。そのため、個別に区分しないが運転操作の一部である位置制御や力制御にも環境や習熟の影響が大きい。

目標加速度から操作力を決定するには車両特性の理解が必要となる。ここで車両特性の理解に相当する処理を加速特性モデルに実装し、操作力係数として取り組む。

#### アクセル操作

アクセルを踏んでいるときまたはアクセルもブレーキも操作しておらず目標加速度が正( $a(t) > 0$ )になるときアクセル操作をする。操作力の変化分は式(3-13)となる。

$$\Delta f(t) = \alpha(t)(a(t) - \dot{v}(t)) \quad (3-13)$$

#### ブレーキ操作

アクセルと同様に、ブレーキを踏んでいるときまたはアクセルもブレーキも操作しておらず目標加速度が負( $a(t) < 0$ )になるときブレーキ操作をする。操作力の変化は式(3-14)で表される。

$$\Delta f(t) = \beta(t)(a(t) - \dot{v}(t)) \quad (3-14)$$

これらの操作力修正量を前回からの操作量に加え、今回の操作量にする。

$$f(t) = f(t - \delta t) + \Delta f(t) \quad (3-15)$$

これに遅れと誤差を含めて次の式で実際の操作力を表す。

$$f(t) = f(k\gamma_0 - \tau_0)(1 + \mu_0), (\mu_0 \in [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]) \\ , t - \gamma_0 < k\gamma_0 \leq t (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3-16)$$

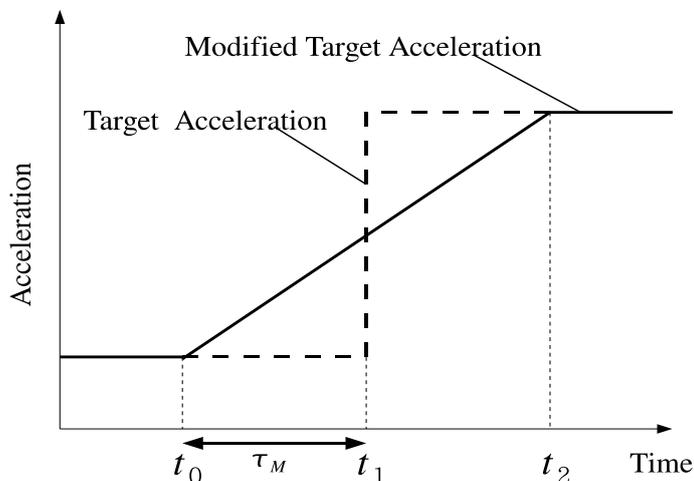
### 3.3.3.4 目標速度修正モデル

目標加速度の変化を認識したあとでそれに対応する操作をしても、操作の遅れと車両の応答遅れから、車両速度が変化するのはある時間がたってからになる。そこで、この遅れを補正し、また運転者が操作しやすい滑らかな目標に変更するため、目標修正モデルを付加する。ここでは一定時間先の目標値を取り込み、修正した目標値を判断系に出力する。加速度の変化点の $\tau_m$ 秒前から $\tau_m$ 秒後まで次の式のように目標速度を変更する。

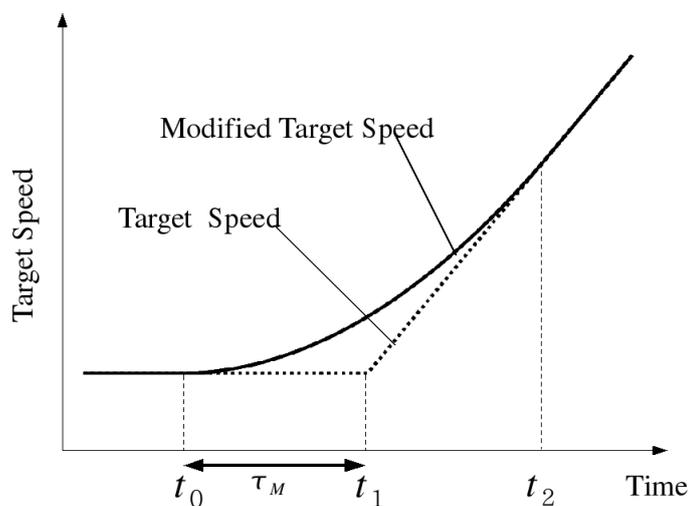
$$\tilde{v}_M(t') = \tilde{v}(t_0) + \frac{d}{dt} \tilde{v}(t_0)(t-t) \\ + \frac{1}{2} \frac{\frac{d}{dt} \tilde{v}(t_2) - \frac{d}{dt} \tilde{v}(t_0)}{t_2 - t_0} (t' - t_0)^2 \quad (3-17)$$

式(3-17)を用いて法定目標速度から運転者による操作のために目標速度を修正した例を Fig.

3.6 および Fig. 3.7 に示す。



**Fig. 3.6 Modification of acceleration change**



**Fig. 3.7 Modification of the target speed**

### 3.3.3.5 車両応答特性モデル

車両の運転条件によりアクセル/ブレーキの単位操作量に対する車両の加速減速度は異なる。特に加速側ではトランスミッションの変速により、得られる加速度は速度により大きく変化する。そのため車両特性モデルを導入し、得られた特性を操作系に出力する。

アクセル操作量に対する車両加速度は変速ギヤのため速度により異なる。経験的に同一加速度を得るために速度が上昇するに従いアクセルをより踏込まなければならないことが分かっている。加速度係数の初期設定は近似的に速度比例とする。一定速度を維持する場合加速度は0であるが、走行抵抗分アクセルを踏む必要があるため、その場合は固定値を初期設定とする。制動力はブレーキ踏力にはほぼ比例するため、加速度係数の初期設定は一定値とする。初期設定の加速係数を式(3-18)に示す。

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \alpha_1 v(t), (\dot{v} > 0) \\ \alpha(t) &= \alpha_2, (\dot{v}_D = 0 \ \& \ v_D > 0) \\ \beta(t) &= \beta_1 \end{aligned} \tag{3-18}$$

### 3.3.4 熟練度を表す要因とパラメータ

熟練度合いは潜在能力、顕在化能力と汎化能力によって定まることを提案した。潜在能力は環境に依存しない運転技術に相当する。提案した運転者モデルでは認識、判断、操作の機能要素は環境に依存せず同じものであることから次のパラメータは潜在能力に関連するパラメータと言える。

*Table 3.1 Parameters for potential ability*

Accuracy/ error	$\epsilon_R$	$\epsilon_D$	$\epsilon_O$
Processing delay	$\tau_R$	$\tau_D$	$\tau_O$
Temporal granularity	$\gamma_R$	$\gamma_D$	$\gamma_O$

これらを最小とした場合にもっとも優秀な運転者に相当し、そこから増やすことで技量の劣る運転者を表現できる。

さらに顕在化能力と汎化能力は環境に対する理解や慣れに相当する能力であると考えられる。運転者モデルでは目標速度修正モデルと車両特性モデルのパラメータがそれに当たるものである。

*Table 3.2 Ability for actualization generalization*

Target modification span (Modification profile)	$\tau_M$
Vehicle property model (Acceleration coefficient)	$\alpha, \beta$

## 3.4 運転者モデルの挙動と評価

### 3.4.1 モデルとシミュレーション設定

シミュレーション評価をするにあたり、時間を単位時間  $\tau_c$  を用いて離散化する。目標速度系列は Fig. 3.3 のうち 10 モード区間(142 秒まで)とする。車両特性モデルから出力される  $\alpha$ 、 $\beta$  は定数で与え

る。車両モデルと運転者モデルのサンプル時間を含む計算条件を Table 3.3 のように設定する。

**Table 3.3 Model & Simulation Parameters**

Vehicle model sample time	$\tau_C$	0.01 [s]
Driver model sample time	$\tau_H$	0.1 [s]
Pedals change time	$\tau_P$	0.3 [s]
Acceleration coefficient	$\alpha$	0.2
Deceleration coefficient	$\beta$	1.0

### 3.4.2 評価指標

目標速度追従運転の目的から目標速度からの偏差が少ないように走行できる運転者ほど技術が高いといえる。また燃費排ガス面からアクセルとブレーキ操作が安定している、いいかえれば操作が振動的でない、ことが求められる。これらから次の2つの指標を用いる

速度追従性評価関数: 目標速度と実速度の絶対偏差の蓄積量で定義する

$$f_T = \int_0^T |\tilde{v}(t) - v(t)| dt \quad (3-19)$$

安定性評価関数: アクセル開度の変化量およびブレーキ操作の変化量をそれぞれ  $d(A(t))/dt$ ,  $d(B(t))/dt$  これらの運転区間にわたる積算量とする。これが少ない方が安定した走行状態である

$$f_S = \int_0^T (|\dot{A}(t)| + |\dot{B}(t)|) dt \quad (3-20)$$

### 3.4.3 結果と考察

以下の3とおりの設定でシミュレーションをした

例1 操作出力が理想的

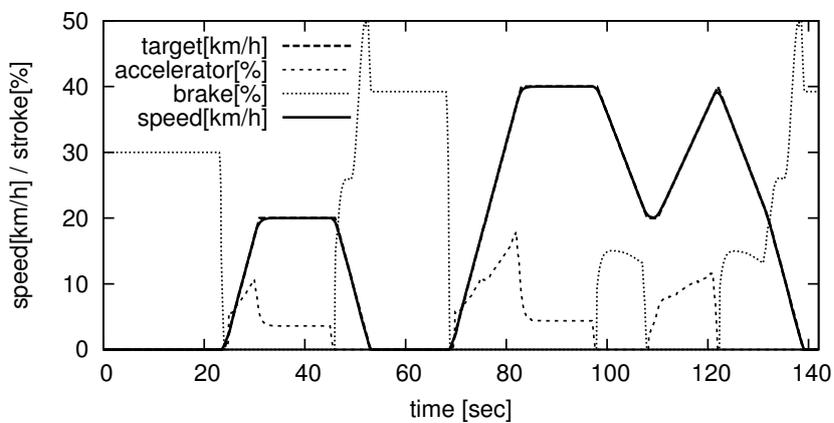
理想的な操作出力を得る方法として運転者モデルの出力を探索し得られる速度偏差が最小となる出力を操作量としてシミュレーションに使った

例2 時間遅れも誤差もない

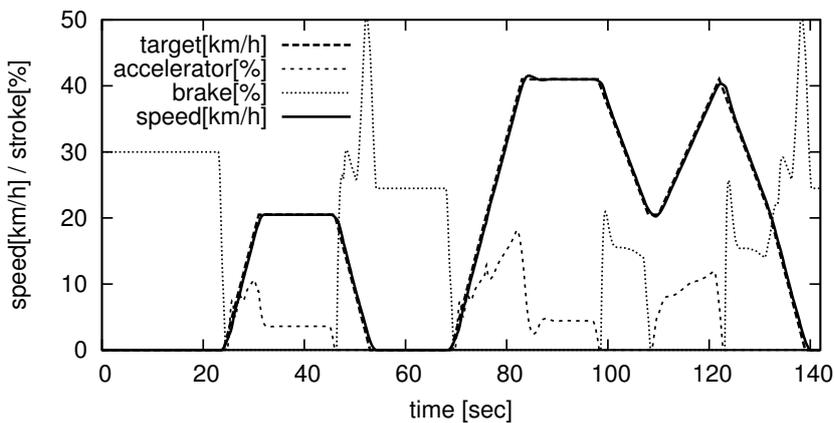
例3 認識および操作に0.1秒の時間遅れと5%の誤差がある

**Table 3.4 Driving performance by indices**

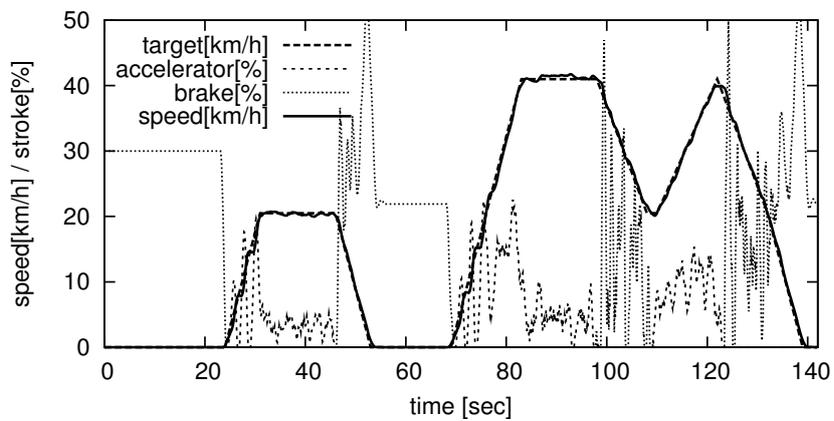
Case study	Tracking index ( $f_T$ )	Stability index ( $f_S$ )
1	84	362
2	525	393
3	620	1681



**Fig. 3.8 Case study 1: With optimal operation profile (Searched)**



**Fig. 3.9 Case study 2: Potential ability maximized**



**Fig. 3.10 Case study 3: Unskilled driver (delay with errors)**

各設定の走行状態に対する評価値を Table 3.2 に記載した。また Fig. 3.7 から Fig. 3.9 習熟度に対応した目標速度への追従性とアクセル/ブレーキの操作量履歴を示す。

事例1では理想的な操作系列を使ったため追従性安定性とも非常に良い値をしめしており、時系列の挙動もそれを示している。

事例2では事例1と比べて安定性はあまり変わらないが追従性が悪化している。これは目標加速度が変化する時点での操作が遅れているためである。環境に十分になれておらず適切な操作タイミングを理解できていない運転者を表現していると考える。

事例3では安定性評価値が極端に悪くなっており、操作量の振動もきわめて大きくなっている。つまりペダルを大きく踏む、また戻すという運転を繰り返している。これは運転者自身が意図した操作ができず、修正のための操作が頻繁に行われる状況に似ていて、運転技術の未熟な運転者挙動を再現できていると考える。

### 3.5 まとめ

運転技能習得過程は経験の蓄積にともなう熟練過程でもある。運転の目標と運転対象車両が一定であれば、経験とともに技能水準を表すある指標は増大する。しかし目標や対象車両が変化した直後はこの指標は低下するが、初期値にはもどらず、再び増加する。これには潜在能力、顕在化能力および汎化能力が関係している。

目標速度追従運転を対象とした運転者モデルを構築するにあたり、運転過程を運転者が環境情報をどのように認識し、それをどのように判断し、その結果どのような行動を起こすかという情報処理と行動と考えた。そしてここに環境変化にともなう技能水準の変化も含めて意思決定を説明でき熟練課程を表現できる運転者モデルの枠組みを提案した。この枠組みのもとで認知系、判断系、操作系からなる運転者モデルに技能表現パラメータとして処理の正確さ、応答遅れと時間粒度を導入した。さらに環境との関係として、目標の先読みと修正および車両特性の知見を加え、運転者モデルを構成した。

そのモデル使って典型的な排ガス試験サイクルの目標速度追従運転シミュレーションをした。その結果により次のことが示された

- (a) 提案した運転者モデルによって目標速度に追従できる
- (b) 時系列の目標速度の特徴や車両特性などの環境を理解して意思決定に反映できる、
- (c) パラメータを調整することで人間の運転挙動を再現できる、
- (d) 初心者や熟練者といった熟練度合いを表現できる

これより提案した枠組みと運転者モデルにより熟練課程を再現できる可能性があることを示した。

## 第4章 操作量学習と制御システムとしての実現

### 4.1 はじめに

前章で人間の運転行動について情報処理過程を中心に明示的なパラメータ表示できるモデルの枠組みを提案した。情報処理と操作反応に遅れ（むだ時間）を含めまた粒度（サンプル間隔）も含めた。それらパラメータを電子制御系のそれと同じにできるのか、また同じにできないとしたらどのような操作（制御）戦略が選択可能なのかということから、人間による制御と電子-機械装置による制御の違いを検討する。さらに選択された制御戦略と熟練過程との関係を明らかにする。

まず、初心者と熟練者の運転挙動を計測しその違いを調べる。2章で求めた運転対象の車両モデル（伝達関数）から人間の応答性と目標速度追従運転の追従精度との関係を求める。そして人間の制御応答から許容される制御方法を特定する。そこから人間の運転行動ではフィードフォワード操作が主であり、精度を上げるためには学習/習熟が必要であることが予想される。

学習方法の手がかりをつかむため、まず制御対象の知見がない場合でも出力誤差だけを見て操作を変更する繰り返し学習を試みる。その過程で制御対象の特徴を得られれば、その知識に基づいて、少ない特徴パラメータを規則的に学習でき、それによりロバストなフィードフォワード則が得られることを示す。さらに、習熟すると目標のパターン（Profile）を認識して、ほとんど意識することなく、対応する操作が出てくるようになる。この過程は Rasmussen の SRK モデルとしてもとらえることができる。

### 4.2 排ガス試験サイクルにおける速度追従運転問題

速度追従問題とは法律で定められた排ガス試験サイクルの目標速度に運転操作により車両を追従させるものである。Fig. 4.1 に示されるように目標値追従誤差が $\pm 2.0\text{km/h}$ 内であれば追従要件を満たしており、これより高い追従精度は不要である。この場合の運転者モデルにおける運転性能の目標は最高性能をめざすものでなく、ある範囲内の性能を保証するものである。絶対性能を求める信頼性より、ある程度以上の性能を確保する耐故障性に近いといえる。

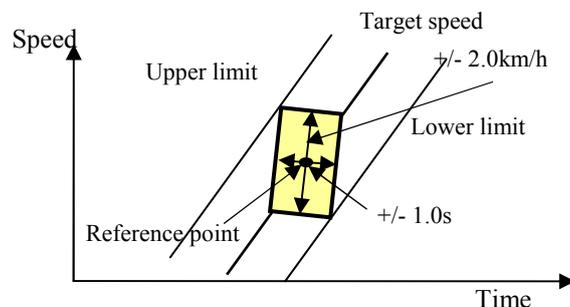


Fig. 4.1 Speed tolerance in the Japanese emission test cycle

排ガス・燃費を考慮すると、アクセル全開—全閉を頻繁に使うことで速度誤差が小さくなるより、それより滑らかな操作が重要である。耐故障性のように最低限の性能確保が前提となる。

車両の制御器は入力为目标速度、現在速度で出力がアクセルおよびブレーキの操作量であって、それは車両の制御入力としては機械装置であっても人間であってもどちらでも同じで、Fig. 4.2 の Controller の部分が人か機械かの違いだけである。

目標追従性能の評価のためにはこの制御器は簡単な比例制御器と仮定していい。この比例ゲインを車両の単位質量当たり  $K$  とする。速度目標に対する車両—制御器で構成される閉ループ系の時間応答は式(4-1)で記述される伝達関数を用いて解析的に計算できる。加速度一定の目標速度に対して、この車両系の定常速度偏差は、目標加速度に  $1/K$  を乗じたものである。そこから、ゲイン  $K$  は Fig. 4.1 に示す許容速度誤差の範囲に車両速度を維持するためには少なくとも 1.0 以上が望ましいことが計算できる。

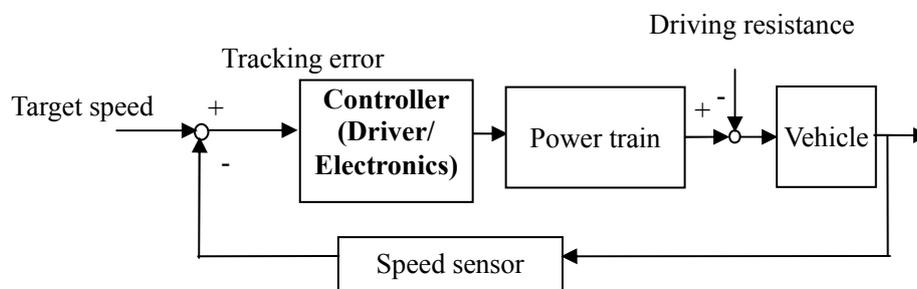


Fig. 4.2 Target speed tracking system

### 4.3 運転者の挙動と可能な制御

排ガス試験での運転挙動を計測し、前述の速度追従問題に対して、どのような運転が望ましいか検討する。

#### 4.3.1 熟練者と初心者の運転挙動の比較

複数人がシャーシダイナモ上で日本の排ガス試験サイクル 10・15 モードの速度を目標として試験車を複数回運転し、運転操作と速度を計測した。試験車には 2.0L ガソリンエンジンと CVT が搭載されている。目標速度追従運転挙動を計測した。Fig. 4.3 に初心者の連続した 3 回の運転挙動と熟練者のそれを示す。その時の操作を Fig. 4.4 に示す。熟練者は滑らかで安定な操作で良好な追従性を示すのに対し初心者は追従誤差が大きくかつ操作が不安定（制御でいう不安定）であった[44]。

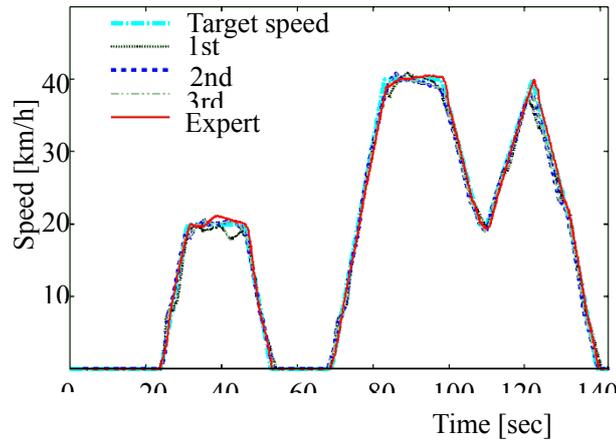


Fig. 4.3 Target speed tracking performance in an emission test cycle driving

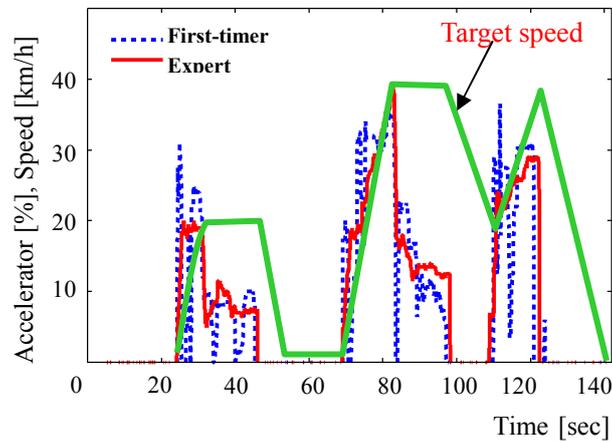


Fig. 4.4 Accelerator operation difference between an expert driver and a beginner

#### 4.3.2 人間特性の制約のもとで可能な制御

目標速度追従は目標速度と現在の速度誤差を見て運転操作をする視覚情報による制御である。人間には視覚からの情報を認知判断して操作するまでの遅れがある。このむだ時間は0.3-0.5秒程度あり、熟練によって大きく短縮できるものではないと景山[26]は報告している。人間の運転の中で安定性に代表されるフィードバック制御性能は制御器の応答性が支配的になる。そのため前述のむだ時間により、機械的な制御装置に比べ許容フィードバック補正量がこのむだ時間に反比例して少なくなる。Fig.4.5に0.05sのむだ時間をもつ電子制御装置と0.5秒のむだ時間をもつ運転者を含む制御系の周波数応答を示す。ここでは比例制御を用いゲインは1としてゲイン線図が描かれている。制御系内のむだ時間は著しく安定性を損ない、許容フィードバック補償量はこのむだ時間に反比例する。

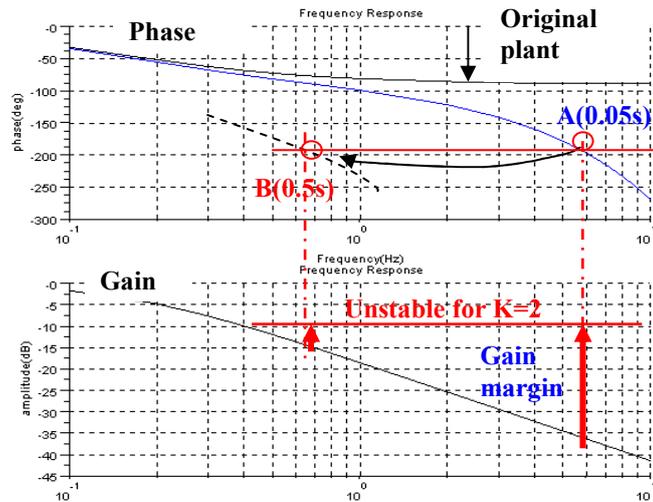


Fig. 4.5 Dead time dependent stability margin

電子制御系(A)では位相が180度を超える時のゲイン余裕は33dBあるが、人間系(B)では同じ位相遅れに対し13dBの余裕しかない。これらが許容フィードバックゲインであり、電子制御の方が16dB(約6倍)高いゲインを取ることができる。前の章で述べたように制御器の比例ゲインは目標速度追従のため2.0以上必要である。この場合Aは26dB余裕があるが、Bは7dBの余裕しかない。それでもBの系ではまだ安定に見えるがゲイン2.0は追従誤差を小さくするには不十分である。このことはむだ時間の大きい人間の運転では大きなフィードバック補正はできないことを意味する。そのため、人間の運転はフィードフォワードが主で、フィードバック補正が従である制御と言える。フィードフォワード制御がほとんどできない初心者の運転ではフィードバックにたより、高ゲインとなって不安定(リミットサイクル)な操作となっている。

また、運転では操作量を維持しても誤差が減らない場合にはさらに操作量を追加(増減)するため、フィードバックは積分型か積分を含むものである。

### 4.3.3 予見による先行操作と遅れ補正

加速開始時点でそれを認識して瞬時にアクセルを目標値に操作をしても、Fig.4.6の赤の実線に示したように、エンジン応答のむだ時間+時定数およびトルクコンバータの時定数の間車両はほとんど停止したままである。大きなフィードバック補正により応答遅れは取り戻せるが、操作入力に制約、つまりエンジン出力トルクは有限、があるので、大きな入力で追従性を上げることはできない。目標変化があらかじめ分かっているならば、これら応答遅れに対応した時間分操作を早めることだけで目標速度追従ができる。また、操作入力量の制約に対しても、目標変化の前から入力を加えることで応答を最適にする手法がデジタル予見制御として開発されている[45], [46]。

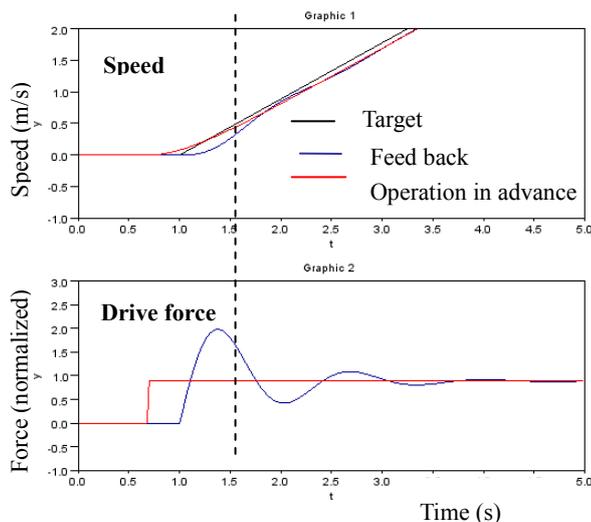


Fig. 4.6 Prediction control for feedback compensation

先読みによる目標修正は次の式による.

$$V'_t(t) = \alpha V_t(t + \tau) + (1 - \alpha)V_t(t) \tag{4-2}$$

ここで  $V_t$  : 目標速度列,  $V'_t$  : 修正目標速度列,  $\tau$  : 先読み時間,  $\alpha$  : 重み係数 ( $0 < \alpha < 1$ ) である.

#### 4.4 運転者内部での習熟過程

運転は外部からの情報を処理し、それに基づいて操作（手または足）することであり、その流れは Fig.4.7 のように認知・判断・操作という過程を経ると前章で説明した。ここで入力  $V(t)$  は速度,  $V(t)'$  と  $a(t)$  は加速度, 出力は操作力  $f(t)$  である。それぞれの段階で遅れ  $\tau$  および誤差  $\varepsilon$  を持つ。しかし、脳内の情報処理を観測することが困難なために、それぞれの処理についてどのようにしているのかあるいは制御系としてどのように表現できるかということについての説明はまだうまくいっていない。

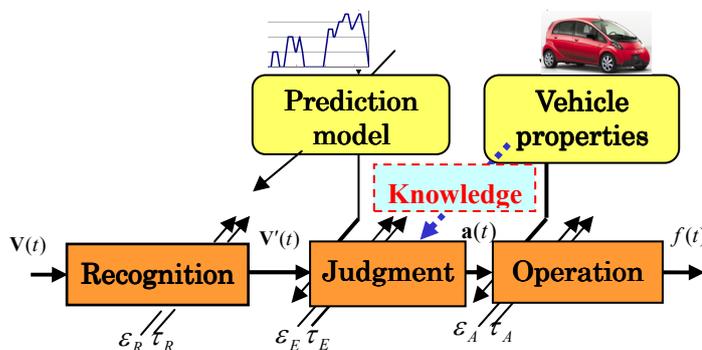


Fig. 4.7 Information transfer process for a driving agent

#### 4.4.1 制御対象の脳内モデル

一般に制御対象の入力への応答特性は式(4-3)のように表わすことができる。

$$y(t) = f(x, u, t) \quad (4-3)$$

ここで  $u$ : 入力,  $x$ : 状態量,  $y$ : 出力 である。

これに対して, 逆特性をもつ関数

$$u(t) = f^{-1}(x, y, t) \quad (4-4)$$

が制御器に備わっており, それを用いて目標  $y_t$  から操作量  $u$  を求めれば目標追従ができる。

ただし, 時間を遡ることや微分を含む場合があることから実現性は別である

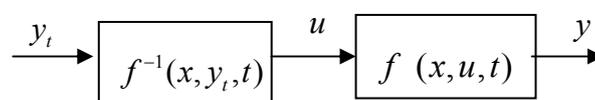


Fig. 4.8 A reverse system for generating input to a target plant

制御器としての人間はこうした逆モデルを脳の中に持ち情報入力から操作をしており, さらにそれは手足の動きまで含むと伊藤は述べている[47]. ここからは脳の中の逆モデルは操作量(位置, 力)までを含むものとする. もちろんこうした逆モデルは瞬時には構築されず, 予備知識と学習(経験や訓練)より徐々に形成されるものである. 人間の筋骨格系に対してその逆モデルが小脳にあり, それでフィードフォワード制御することと, 逆モデル学習アルゴリズムが提案されている[48].

この学習過程は, Human error の研究で利用されている Rasmussen の SRK(Knowledge, Rule, Skill)モデルの概念を用いるとうまく説明でき, 運転者の誤り行動への適用もある[49]. 人間行動は誤りを犯すが, その行動を知識に基づく, 規則に基づく, 技能に基づくとしてそれぞれの段階での行動と誤りについての概念である. 人間内部での学習過程は測定できないため, 機械的制御のモデル記述を用いて, 熟練にいたる挙動を示す.

#### 4.4.2 学習の初期/制御対象の特徴抽出

初心者にとって運転対象の車両の特性はまだ理解されていない. しかし, 加速度あるいは減速度はアクセル/ブレーキの踏み込み力に比例するという知識はあり, 目標と現在値のずれも認識できる. 目標と出力との偏差を次の操作量にフィードバックするとだんだんと出力が目標に近づくことが知られており, Arimoto[50]や杉江[51], [52]らによりロボテックスの分野で研究されてきた. これは繰り返し学習と呼ばれ, Fig. 4.9 に示すような構成となっている. この場合制御対象の特性(パラメータ)が分からなくても適用できるが, 目標出力にはある滑らかさが要求される[53]. 操作入力は前回の操作と誤差により記述される.

$$u_{k+1} = u_k + Q(y_t - y_k) \tag{4-5}$$

ここで  $u_k$  :  $k$  回目の入力データ列,  $y_k$  :  $k$  回目の出力列,  $y_t$  : 目標列,  
 $Q$  : フィードバックゲイン(行列) である.

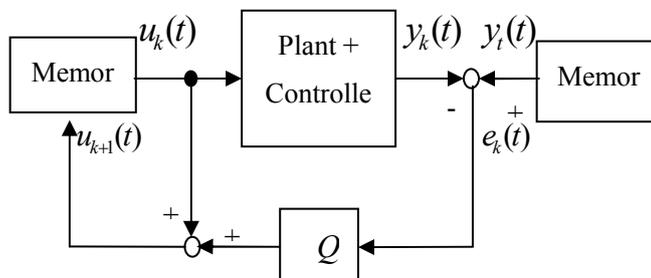


Fig. 4.9 Iterative learning control

この方法を目標追従運転に適用した. 目標速度に無関係に加速側減速側それぞれにアクセル/ブレーキの一定値の操作をする(Fig. 4.10)ところから始め, 10 回の学習により, 目標速度の近傍に追従する運転となる(Fig. 4.11). さらに 100 回まで学習を繰り返すと, 速度誤差は減る. ただし, 目標速度の部分が不連続な点の前後では追従させるために高調波の操作がとなる. つまり振動的な傾向が表れる.

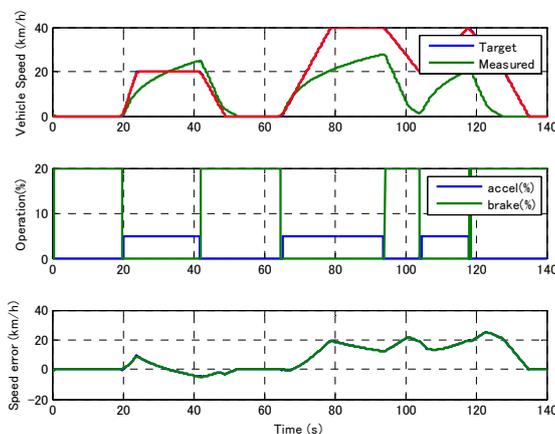
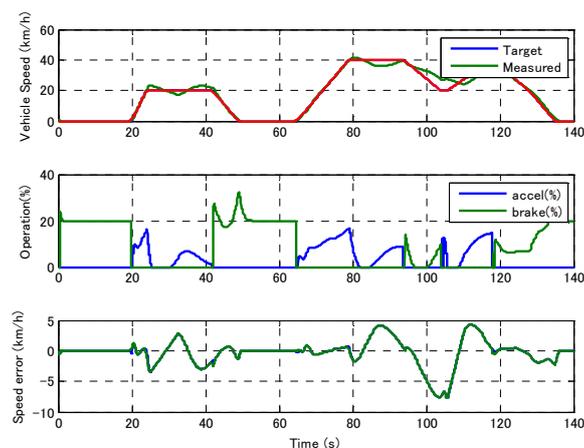


Fig. 4.10 Initial condition for learning



**Fig. 4.11** Speed tracking performance after 10 times learning

しかし、これで最適な操作が学習できるかというところではない。一定時刻ごとの操作量を記憶する必要がある。これは膨大であり、数値間に脈絡のないのである意味  $\pi$  の値を千桁まで暗記することより困難である。さらに多数回の学習の繰り返しが必要であり、膨大な記憶の必要と合わせて人間の学習行動としては実現困難である。こうした試行で目標に近づくにつれて操作と応答の関連性が分かる、つまり対象の特性が分かってくるため（たとえば速度の増加に応じてアクセルを踏み込む）、次の学習（特徴抽出と規則化）のための手がかりとなる。この段階で熟練者より操作についての助言を得られる場合もある。

さらに、この操作入力列は対象車両特性に一義的に依存しているため、対象が変われば再度同じ学習をする必要がある。たとえ入力操作を全部覚えられたとしても、この方法では対象構造についての知見が得られないため、他の車両の運転に習熟することはできない。

#### 4.4.3 規則の発見、車両の知識を用いた学習

運転操作に対する車両反応の知識があれば、特徴的な量だけ学習することができる。そして学習は系統的にできて少ない回数で終わる。車両の目標速度のある特徴にある一連の運転操作を対応付けると言っている。

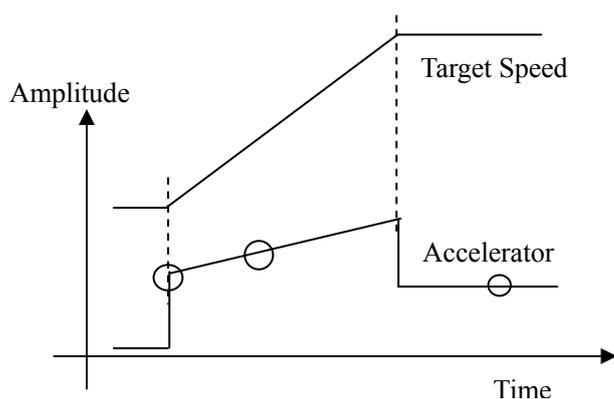


Fig. 4.12 Operation features to track the target speed

乗用車（内燃機関＋トランスミッション）の目標速度追従運転をある程度経験すれば、次のことが経験的に分かってくる。アクセルに応じた加速度が得られるが、速度が上がるとギヤ変速のため同じ加速度を得るために、よりアクセルを踏まなければならない。一定速度の運転では速度に応じた踏み込み量が必要。車両が停止する前にはより強くブレーキを踏む必要がある。

これらを学習する特徴を選択するための知識として用い、人間が感知できる情報である、目標速度、実際の速度と速度誤差および速度変化を学習値の更新に使う運転者モデルを構成した。時系列の操作は特徴パラメータ、たとえば発進から加速して定常速度で運転する場合、Fig. 4.12 に示すように制御則は次の3種に分けられる。

$$p_a(t) = a'(t)a_0 \quad V'_t(t) \leq v_0 \text{ \& } a'(t) \neq 0 \quad (4-6)$$

$$p_a(t) = a'(t)a_1(V'_t(t)) \quad v_0 < V'_t(t) \quad (4-7)$$

$$p_a(t) = a_2(V'_t(t)) \quad v_0 < V'_t(t) \text{ \& } a'(t) = 0 \quad (4-8)$$

ここで  $p_a(t)$ :アクセル操作量,  $a'(t)$ :修正目標加速度,  $a_0$ :発進加速係数,  $v_0$ :発進完了速度,

$a_1(V'_t(t))$ :速度依存係数(ギヤ比補正相当),  $a_2(V'_t(t))$ :走行抵抗係数である。

適当な加速アクセル, 速度増加に対する踏み込み補正なしの初期条件で運転した (Fig. 4.13).

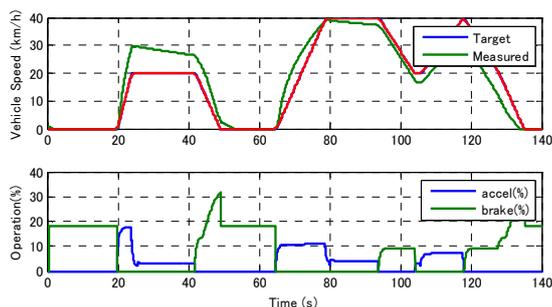


Fig. 4.13 Driving behavior with a initial value set for the learning

ここから加速度対応アクセルゲインを学習した (Fig. 4.14). 学習は発進直後の速度が目標に合うよう初期踏み込み量を変更している.

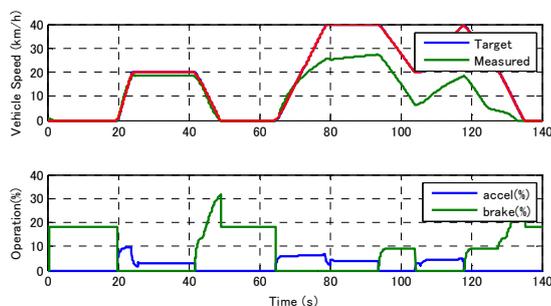


Fig. 4.14 Driving behavior with a initial acceleration gain learned

方法は発進 1 秒後の速度偏差を減らすように初期加速係数を修正する.

$$a_0(k+1) = a_0(k)(1 + K_0 \Delta v_1) \quad (4-9)$$

ここで  $a_0(k)$  は  $k$  回目の係数であることを示す.  $K_0$  は学習ゲイン,  $\Delta v_1$  は 1 秒後の速度偏差である.

次に, 速度に依存した踏み込み量の学習をした (Fig. 4.15). ここでは速度上昇の程度から速度依存量についての補正量を変更している. この学習は加速度を直接比較するのではなく, 加速中の 2 つの時間の目標速度の差を用いている.

$$a_1(k+1, v_2) = a_1(k, v_2)(1 + K_2(\Delta v_2)) \quad (4-10)$$

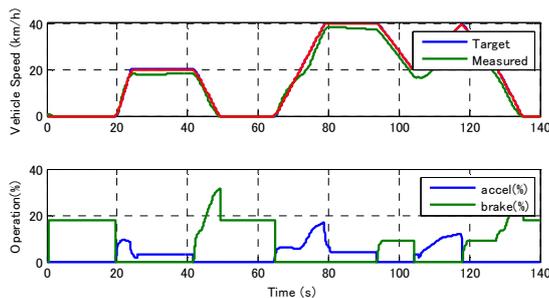
$$a_1(k+1, v_3) = a_1(k, v_3)(1 + K_2(\Delta v_3)) \quad (4-11)$$

ここで  $a_1(k, v_2)$  は目標速度  $v_2$  に対する  $k$  回目の係数であり,  $\Delta v_2$  は時刻  $t_2$  の速度偏差,  $K_2$  は学習ゲインである.  $a_1$  は細かい速度刻みではなく, 目標速度範囲で数点もつようなものである.

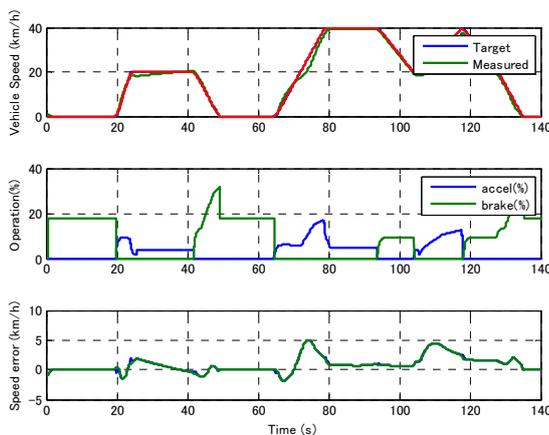
さらに, 走行抵抗に相当する一定速度運転の時のアクセル量を, 実速度の変化と誤差から学習した (Fig. 4.16). 方法は一定速度区間で実速度が増減したかどうかを区間内の 2 つの時刻で判定して, それをもとに走行抵抗係数  $a_2$  を修正している.

$$a_2(k+1) = a_2(k)(1 + K_3(\Delta v_4 + \Delta v_5)) \quad (4-12)$$

ここで $a_2(k)$ は $k$ 回目の係数であり、 $\Delta v_4$ は時刻 $t_4$ (一定速度運転初期)の速度偏差、 $\Delta v_5$ は時刻 $t_5$ (一定速度運転終期)の速度偏差、 $K_3$ は学習ゲインである  
この状態で目標速度偏差が許容値ではない部分があるが、少量のフィードバック補正で許容値に入る。



**Fig. 4.15 Driving behavior with a speed dependent acceleration gain learned**



**Fig. 4.16 Driving behavior with the running resistance learned**

ここでの学習はそれぞれ3回であったが、さらに適切な学習をすると、フィードバックなしで許容速度誤差範囲に入る。

#### 4.4.4 応答遅れの学習

加速開始時の人間の反応遅れを含む応答遅れの補正は、因果関係がはっきりしているために比較的容易にできる。この学習結果を考慮した目標速度の先取りが Fig.4.17 に示すように電気-機械系の制御として実現できる。

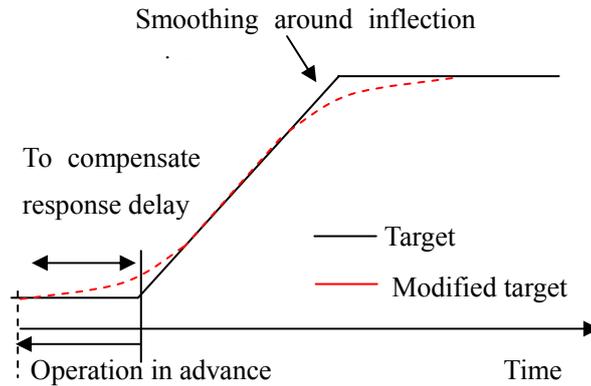


Fig. 4.17 Learning for response delays

#### 4.4.5 目標に対して直接体が動く熟練状態（習熟段階）

排ガス試験サイクルの運転は、初心者にとってアクセルを強く踏むほど加速度が高くなるという知見から運転操作を考えるものである。そして経験を積むことで前節のように規則が決まり、規則の最適パラメータを獲得して、その使い方に習熟する。そして、熟練者にとっては、目標速度のパターン(profile)をみてほとんど無意識のうちに、そのパターンに対応した操作を行うものであり、階段を上ったりある文字を書いたりする挙動に近い。これらが、SRK モデルの3つの段階である。初めてか経験の少ない行為では知識に基づく、何度も行って経験が積み重なると、規則に基づく行動になり、熟練者になると対象状況を見てほとんど意識に上ることなく、技(skill)に基づく行動をとるようになるという。

この概念に前述のモデルを適用することで初心者から熟練者までの運転挙動が再現できる。

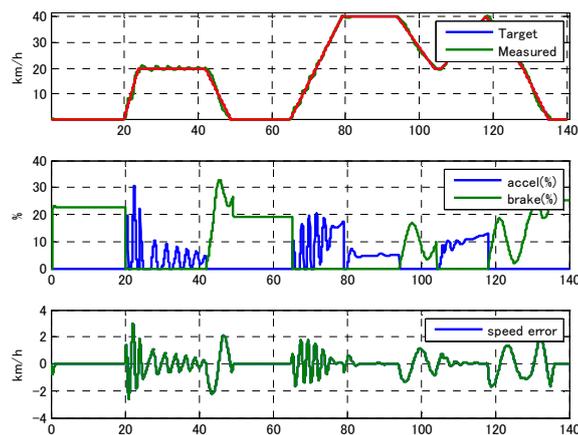


Fig. 4.18 Beginner's driving behavior represented with the driving agent

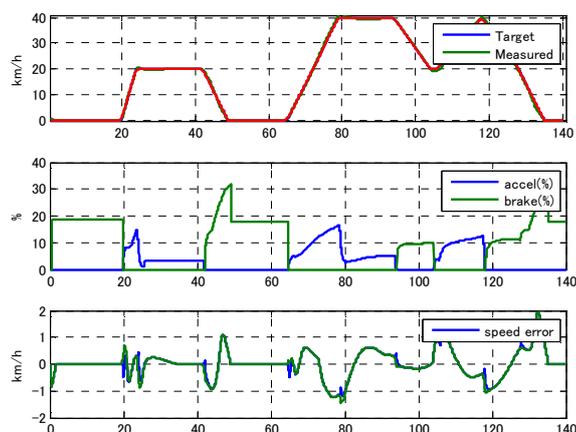


Fig. 4.19 Expert's driving behavior represented with the driving agent

## 4.5 対象の特性変化への対応能力と学習のしやすさ

車両が変われば出力や重量が変わる。そうした変化に対しても短時間で適応できる。

### 4.5.1 負荷/出力の変化

負荷の変化により必要な駆動/制動力が異なり、定格出力が変化すると同一アクセル量では加速度が目標からずれる。これらはおもにアクセル/ブレーキの初期操作量に影響を与える。しかし、規則をモデルとして持つ前述の運転者モデルでは1または2度の学習で対処できる範囲である。対象の特徴を含むモデルでは、対象の変化に対して小修正で対応可能であり、これは習熟すると他の環境でも大きな影響がないことを示す。

### 4.5.2 応答性と非線形性

ここまでは内燃機関（特にガソリンエンジン）による駆動と機械-油圧ブレーキによる制動を対象としてきた。電気自動車では内燃機関が電気モータになり変速機はなく、油圧ブレーキが電気-油圧ブレーキに置き換わる。内燃機関のトルク発生の遅れとトルクコンバータの伝達遅れは、モータ電流の遅れのみになり、その時定数は0.1s以下にでき、かつ運転状態によらず一定である。そしてアクセル踏み込み量に線形な動力が得られ、電気モータ回生/機械ブレーキによる制動では電流制御によりブレーキ力に対して線形な制動力が得られる。つまり、駆動力の発生に遅れが少なく、アクセル/ブレーキ操作にほぼ比例した駆動/制動力が得られる。この場合には、適応させるパラメータが減っており、必要な学習回数が少なくすむ。さらにフィードバックもより有効であることが予想され、また応答性の改善効果としてフィードバック安定性も増す。

## 4.6 まとめ

制御装置として人間の運転行動を考えると、フィードバックよりフィードフォワードを主に使っている。そしてそのフィードフォワード行動は学習により精度や滑らかさが増すだけでなく、無意識化すると考えられる。

目標速度追従運転のような目的と制約が与えられると、運転者の役割は通常の電子制御装置と同じである。そこで2章で導出した車両の伝達関数モデルを用いて、フィードバック速度制御の解析解を求めた。変化する目標への即応性の観点から、制御装置をゲインのみと仮定しそれを単位質量当たり  $K$  とすると、加速度一定目標への定常偏差は目標加速度に  $1/K$  を乗じたものとなる。これを許容誤差  $\pm 2\text{km/h}$  の範囲に維持するためにはゲインをあげればいいが、人間系は情報処理の応答遅れが電子系に比べ大きいので安定性の制約からゲインを大きくできない。このことから速度追従運転をなめらかに安定的にするためにはフィードフォワードが主な制御策とならざるを得ない。

しかし、フィードフォワード操作は最初から与えられていないので、これを経験から学ぶ必要がある。学習が収束するためには、操作対象の特性が分からない状態で目標と結果から操作量を変更して、目標を実現する操作が見つからなければならない。これは繰り返し制御制御により証明されている。これには多大な時系列データの記憶が必要で、人間の場合には困難である。その代わり、操作パターンを繰り返しで発見し、少ない繰り返しで特徴パラメータを学習すると考えた。

この概念により運転者モデルを構成し、繰り返し学習制御で特徴パラメータを発見した。そしてそのパラメータ（発進時のアクセル踏み込み量、速度依存のアクセル踏み増し、一定速度時のアクセル位置）を学習させた。それぞれ数回の運転で、ほぼ目標速度に追従できる特徴パラメータを学習できた。また、このモデルでフィードバックゲインを大きくすると、学習が少ないと頻りに操作量に変更されるが安定しない初心者の運転挙動が現れ、十分に学習すると滑らかで安定な習熟者の挙動が現れる。当然のことではあるが、操作対象の応答が単純であればそれだけ学習は簡単になる。

学習により運転操作に習熟する運転者モデルを具体的な計算アルゴリズムで示した。これは簡単な制御器の実現や自律分散型制御系の構築において適用が期待される。

## 第5章 結論

### 5.1 結論

我々は人間の運転によって公道上を自動車が走れることを当然とした社会に生きている。一方、多くの機械装置や設備は電子制御で運転されており、ごく最近公道を走ることの自動運転車が出現した。制御装置も人間も同じ目標と環境情報を元に、運転装置を操作しているが、内部の情報処理過程は全く異なるだろう。また、人間の運転は最初訓練され、そして学習により習熟することができる。これまで運転にともなう環境情報の認知や反応は、事故要因解析と予防安全、人間-機械インタフェースの分野で研究されてきて、操舵系の研究で人間を含めたものがあるものの、実時間制御系の視点で人間特性からその運転挙動を解明する研究は多くない。さらに運転操作の本質である学習や熟練についてはほとんど研究されていない。習熟を含む人間の運転行動と機械制御装置との違いを明らかにし、人間の運転行動を制御系として実現するために、目標が厳密に定義できる排ガス試験サイクルの運転を対象に、車両系のモデル表現、習熟する運転者モデルの枠組みと学習過程アルゴリズムを研究した。

#### 5.1.1 運転者を含む車両系モデル

入出力応答が解析的に求められるよう、必要な周波数帯域で人間-車両系の低次元モデルを構成した。駆動源はガソリンエンジンと CVT である。アクセル操作に対するエンジンの出力応答は燃焼室への空気流入による一次遅れ系で表現した。乗員に不快な振動騒音を考慮することが必要な場合は、一次遅れのトルクに対して振幅変調をすればよく、クランク回転角に同期したトルク計算は不要である。

CVT はギヤ比をゲインとして扱えばいいが、このゲインは速度に依存した非線形である。発進時はトルクコンバータが一次遅れ系として加わる。車両は質点として扱えばよく、速度が上がれば空気抵抗がかかるので一次遅れ系として扱う。

人間の応答はゲインとむだ時間とした。これら車両系の低次元数式モデルを用いることで、人間の運転挙動が解析解として得られ、安定性や目的追従性能が制御理論の枠組みのなかで議論できるようになった。

#### 5.1.2 習熟する運転者モデルの枠組み

運転技能習得過程は経験の蓄積にともなう熟練過程でもあり、運転目標や運転対象車両といった環境が一定であれば、経験とともに技能水準は向上する。しかし環境が変化した直後はこの指標は低下するが、初期値にはもどらない。これを説明するため潜在能力、顕在化能力および汎化能力の概念を導入した。

運転過程を運転者が環境情報を認識し判断し行動を起こすという情報処理と操作と考え、モデル機能の要枠を提案した。それは目標追従の制御機能を持ち、情報処理過程（認知、判断、操作）の機能が明示でき、環境変化が考慮でき、かつ熟練による挙動を表現できることである。

この枠組みのもとで認知系、判断系、操作系からなる運転者モデルに技能表現パラメータ

として処理の正確さ、応答遅れと時間粒度を導入した。さらに環境との関係として、目標の先読みと修正および車両特性の知見を加え、運転者モデルを構成した。また、環境変化と習熟過程を結ぶ潜在能力を情報認識と判断のずれ、情報処理の速さ（遅れ時間）と操作の正確さとしてパラメータ表現し、顕在化能力のひとつとして車両応答を予測した操作で（アクセル/ブレーキ操作に対する加速度ゲイン）をパラメータとして表した。

この運転者モデルを使って典型的な排ガス試験サイクルの目標速度追従運転シミュレーションをした。その結果により次のことが示された

- (1) 提案運転者モデルにより目標速度に追従できる
- (2) 時系列の目標速度の特徴や車両特性などの環境を意思決定に反映できる、
- (3) パラメータを調整により熟練度合い（初心/熟練）を含む人間の運転挙動を再現できる、  
これより提案した枠組みと運転者モデルにより習熟過程のパラメータ表現ができ、どの能力を習熟するとどれくらいの技能水準に到達できるかが定量的に評価できるようになった。

### 5.2.3 習熟のための特徴の発見とパラメータ学習アルゴリズム

人間の応答性の制約から学習によるフィードフォワード操作が運転の本質であり、そのためには操作のこつをまず習得する必要がある。

導出した車両モデルと応答遅れを含む制御をフィードバック目標速度追従問題に適用して解析的に解き、加速時の定常速度偏差を求めた。その偏差は制御ゲインに反比例するため、許容速度偏差内に入れるためにはフィードバックゲインを上げればいいが、人間の反応むだ時間により安定限界へのゲイン余裕が電子制御に比べると非常に小さく、十分なゲインが得られないことを示した。それにより人間の運転はフィードフォワード操作を主とせざるを得ないことが分かる。

フィードフォワード操作のためには知見が必要である。制御対象の特性が不明であっても、毎回の出力偏差から次回の操作量を修正し、繰り返して目標に追従できる操作量を学習できることを、繰り返し学習制御の理論から明らかにした。しかし、これには操作履歴をすべて記憶する必要があり、また目標が違えば一から始める必要があるため、この方法だけでは運転の学習は人間には困難である。それで繰り返し学習制御を学習初期に使い、操作の特徴パターンを発見すると考えた。いったんパターンが決まれば少数のパラメータ学習で済み、類似した目標にも適用できる。

目標速度追従運転では、この特徴パラメータは出力パワー比に関係するアクセル位置-加速度の関係、転がり抵抗に関係する定常速度でのアクセル位置などであり、それを学習するアルゴリズムを運転者モデルに実装した。計算機実験で数回の試行で学習されることを示し、運転行動の学習による習熟過程の一面が制御システムとして実現および電子システムに実装できることが分かった。

#### 5.1.4 本研究の期待される適用分野

人間が道具を使う場合、使った結果は人間の技能と道具との相互作用で決まる。それで道具のように左利きのための包丁や子供用のバイオリンのようなものがあるが工業製品にはそう

したことはほとんど考慮されない。習熟過程を明らかにすることで、習熟の妨げになる要因、たとえば予測しがたい大きな非線形性、が分かり、そこから使いやすい自動車の機能設計や運転支援のしくみを開発することができる。さらに、人間による制御の応答は比較的遅いため実時間での複雑な計算はできないのに、ある範囲では機械装置と類似な結果が得られる。この過程をアルゴリズムとして記述し、電子-機械制御で実現できれば、学習-適応型の制御として広い応用が見込める。

## 5.2 今後の研究課題

この研究では動的な運転者-車両挙動の解析と運転者モデルの制御系としての再現を目的としたため、人間の情報処理過程を電子制御系と類似の固定サンプルかつ逐次処理として扱った。そのための制約があり、これらの緩和が今後の研究課題である。また操舵機能を取り込み、一般的な2次元空間での習熟過程を含む運転者モデルへの拡張も今後の研究対象である。なお、操作系で触れた人間のセンサ機能モデルはこの研究とは別領域のものである。

### 5.2.1 サンプルングによる認識と判断

運転者モデルの制御アルゴリズムへの適用を想定して、人間の情報処理を主にサンプルングとして扱った。しかし人間の頭脳ではサンプルングによる情報処理と生起事象への反応が渾然としており、デジタル計算機の一定時間サンプルのもとでの周期的情報処理と割り込みによる非周期的情報処理のような厳密な区別がないものと思われる。そのため積分型の修正が計算機のように一定周期ごとの誤差の加算でいかどうかは検討を要する。

運転操作量は3.3.3.3章操作系に式(3-13)から式(3-16)で表されており、これは加減速度係数 $\alpha$ と $\beta$ だけでなく情報処理の時間粒度つまりサンプル間隔に依存する。時間粒度が習熟過程で変わるモデルや生起事象への反応で操作が行われるモデルの場合には、モデル選択に応じて蓄積型の操作量をどう生成するか検討が必要である。

### 5.2.2 パターン処理による反応時間の短縮とその表現

SRKモデルでは人間の行動は経験の蓄積にともない、知識に基づく、規則に基づくそして技に基づくように変化するとしている。箸を使って食べる時にはあたかも箸先が指先であるかのような感覚になっている。運転操作でもある程度習熟するとカーブ形状を見ただけで、無意識のうちに適切なタイミングと量で操舵が行われ、道路に沿って車を走らせるようになる。

これは習熟すると目標パターンに対して操作パターンが対応するようになり、ほとんど無意識化で操作まで行われることを意味する。これらをどう計算機上のモデルとして表現するかが今後の研究課題である。

### 5.2.3 操舵を含む運転者の習熟過程モデル

卓越した運転技術を持つレーシングカーの運転者は、カーブを運転する時まず経路選択をしてそこを逸脱せず走行できる速度に制御するそうである。しかし、初心者では経路（操舵）と速度（アクセル/ブレーキ）の同時制御になると考えられる。

## 謝辞

この研究は 2004 年開始したが、人間の特性から自動車の機械特性まで幅広い分野が対象であるため、まとまった成果が出るまで長期間を要し、多くの人々がこの研究に関係した。

当初から指導いただいた神戸大学システム情報学研究科玉置久教授に感謝します。そして本論文をまとめるにあたり指導や助言をいただいた大川剛直教授、鳩野逸生教授と太田能准教授に感謝します。

多面的な議論をしていただいた国際文化科学研究科村尾元准教授、この研究に関係した玉置研究室の稲元勉博士、松本卓也博士、杉川智博士と大原誠博士、大野智誠氏、谷垣啓太氏、清水則史氏、田村一起氏らの卒業・修了生に感謝します。また研究環境を整えていただいた高木由美助手に感謝します。

長年このテーマを共同研究の対象とし、試験設備や関連データを提供された三菱自動車工業株式会社に感謝します。特にエンジンの実時間モデルの研究をともにした木戸和夫氏とアクティブ振動抑制やトランスミッションモデルの研究とともにした三菱自動車エンジニアリングの山浦氏に感謝します。

一連の共同研究の発端となったパワートレインの知的制御をともに手がけた Daimler AG の Michael Schinkel 博士、エンジンモデルと故障診断をともに研究した Zenchun Xia 博士、およびギヤ音抑制の研究に関係した Romax Technology Ltd. (UK) の Jamie Pears 博士、Theo Potter 博士、Michael Platten 博士に感謝します。

そして曜子に！

## 参考文献

1. C. C. Macadam Understanding and Modeling the Human Driver, Vehicle System Dynamics, C.C. Macadam, Taylor & Francis, 2003
2. Ichiro Kageyama, Analysis for Control Action of Driver's Steer-An Example of Aged Driver-, JSAE20055491, 2005
3. G.N. Ornstein, The Automatic Analog Determination of Human Transfer Function Coefficients. Med. Electron. Bio. Eng. 1 (3) , 1963
4. 景山一郎, 栗谷川幸代, 狭路走行におけるドライバの運転挙動評価に関する研究, JSAE 20055849, 自動車技術会 学術講演会前刷集, 2005
5. 景山一郎, 栗谷川幸代, ドライバ特性解析用ドライバモデル構築に関する研究, JSAE20075284, 自動車技術会 2007 春季学術講演会, 2007
6. 景山一郎, 栗谷川幸代, ドライバの運転動作解析用ドライバモデル構築に関する研究, JSAE20115077, 2011
7. 景山 一郎, 栗谷川 幸代, ドライバ特性解析用ドライバモデル, 自動車技術 Vol.64 No.10, pp.53-59, 2010
8. 景山 一郎, 栗谷川 幸代, ドライバ特性評価のためのドライバモデル構築に関する研究, JSAE20105609, 2010
9. 木村英紀, モデル学の展望, 計測と制御, Vol. 41, No12, pp.832 – 834, 2002
10. 丸木利光, 海津秀雄, 最近のドライブロボット技術, 自動車技術, Vol.58, No.5, p61-65, 2004,
11. 金子哲也, 栗谷川幸代, 靱山富士男, 景山一郎, 自律走行車両のためのドライバモデルおよび車両モデルを考慮した制御目標のリアルタイム生成 - エネルギーITS 推進事業の開発, JSAE20115135, 2011
12. C. Miyajima, Y. Nishiwaki, K. Ozawa, et al., Driver Modeling Based on Driving Behavior and Its Evaluation in Driver Identification , Proceedings of the IEEE, Vol.95 (2) , pp. 427 - 437(2), 2007
13. Byron Mason, Kambiz Ebrahimi, A Driver Model for Simulation Based Design, Avec'10, 2010
14. J. Christian Gerdes, What can racing teach us about autonomous vehicles?, Avec'12 Keynote speech, 2012
15. 山口大助, 李曙光, 他, スキルの高いドライバの運転特徴抽出に関する研究, JSAE20115357, 2011
16. Saskia Monsma, Martijn van Oort, Subjective Evaluation of Handling Behaviour related to Tyre Dependent Driver Parameters, Avec'10, 2010
17. 佐野明人, 藤井一貴, 大熊陽介, 武居直行, 望山洋, 田中由浩, 藤本英雄, シフトフィールの触知覚現象とその生成メカニズム, 自動車技術会 2008 春季学術講演会, JSAE20085378, 2008

18. 佐野明人, 梅尾健吾, 田中由浩, 藤本英雄, ステアリングの両手操作における受動操作とその影響, JSAE20095465, 2009
19. Horiue, M., tomonori, O., Okiyama, H., Tanaka, Y. et al., A Study on Design Factors of Gas Pedal Operation, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5(1), pp.30-35, 2012
20. 鈴木達也: 運転におけるヒューマンファクタの解析 ~コントローラとしてのドライバ~, 社団法人計測自動制御学会 計測と制御, Vol.45, No.3, pp. 231-236 (2006)
21. 和田隆広, 予防安全のためのヒューマンファクタ解析, 計測と制御 Vol. 45, No. 8 , pp.667 - 670, 2006
22. Torsten Butz, Oskar Von Stryk, Optimal Control Based Modeling of Vehicle Driver Properties, SAE2005-01-0420, 2005
23. Díaz, J., Ros, E., Mota, S., Rotter, A. and Muehlenberg, M., Lane change Decision Aid system based on motion driven car tracking. IEEE Transactions on Vehicle Technology. 57(5): pp.2736 - 2746. WP1, 2008
24. 寺澤 武, 小山 哉, 工藤 新也, 藤岡 健彦, 狩谷 悠史, ドライバ特性を考慮した車線維持支援システムの開発と評価, JSAE20075260, 2007
25. Horst Bauer (Editor in chief), Emission control, Automotive Handbook 4<sup>th</sup> Edition, pp.487- 490, Robert Bosch GmbH, 1996
26. 景山一郎, 栗谷川幸代, 初心ドライバの学習過程に関する基礎的研究, JSAE20065295, 自動車技術会学術講演会前刷集, 2006
27. Tom van der Sande, Igo Besselink, Henk Nijmeijer, Steer-by-Wire: A Study on Bandwidth and Force Requirements, Avec'12, 2012
28. 森 一俊, ディーゼルエンジン電子制御の夜明け前, 計測と制御, Vol.45, No.3, pp.167-176, 2006
29. H. Schuette, M. Ploeger, Hardware-in-the-Loop Testing of Engine Control Units - A Technical Survey, SAE 2007-01-0500, 2007
30. E. Hendrics, SI Engine Controls and Mean Value Engine Modeling, SAE910258, 1991
31. Y. Danno, K. Togai, Powertrain Control by DBW System: Strategy and Modeling, SAE 890760, PP85-98, SP788, 1989
32. A.J. Kotwicki, Dynamic models for torque Converter Equipped Vehicles, SAE820393, 1982
33. K. Togak, H. Tamaki, Human driving behavior analysis and model representation with expertise acquiring process for controller rapid prototyping, SAE2011-01-0051, 2011
34. M. Bier, D. Buch, M. Kluin, C. Beidl : Development and Optimization of Hybrid Powertrains at the X-in-the-Loop Engine Testbed. p.46-52, MTZ worldwide 3/2012, 2012
35. Z. Xia , K. Togai, “Accelerated and Integrated Real Time Testing Process Based on Two Universal Controllers on Rapid Controller Prototyping”, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. I(1); 258-267, 2008

36. Hattori et al., Agent - Based Driver's Information Assistance System, *New Generation Computing*, 17, 359-0367, 1999
37. Boer et al., Modeling Driver Behavior with Different Degree of Automation: A Hierarchical Decision Frame work of Interacting Mental Models, 17th European Annual Conf. on Human decision Making and Manual Control, 1998
38. Velenis et al., On Steady-state Cornering Equilibria for Wheeled Vehicles with Drift, 48th IEEE conf. on Decision and Control, 2009
39. Togai, Tamaki, Human Driving Behaviour Analysis and Model Representation - Acquisition of Meta - Knowledge and Expertise acquiring Process, Proc. of AVEC'10, pp. 801 -806, 2010
40. Takemoto et al., A Study on the Relationships between Unsafe Driving Behaviors and Driver's Inner Factors When Entering a Non-Signalized Intersection, *J. of Computers*, 3 (9), pp. 39-49, 2008
41. 原田光浩, 燃費モードドライバ, *自動車技術* vol.64, No.11, pp.110-110, 2010
42. 自動車技術ハンドブック編集委員会, 5.2.2 排ガス試験方法, *自動車技術ハンドブック 6 試験・評価 (パワートレイン)* 編, pp. 80 -82, 自動車技術会, 2006
43. K. Togai, H. Tamaki, Construction of a Driving Agent for Target Tracking Driving and Learning Process, AVEC'08, 2008
44. K. Togai, H. Tamaki, Emission test cycle driving agent and expertise in driving behavior, *Review of automotive Engineering JSAE*, Vol.29 No.3, pp.387- 391, 2008
45. 江上, 土屋, *デジタル予見制御*, 産業図書, 1992
46. F. Lio, T. Egami , T. Tsuchiya & X. Yu: On General Type of Digital Optimal Preview Servo System, *Applied Mathematics and Mechanics*, vol.17, No.5, pp.423-436
47. 脳に学ぶ制御の仕組み 伊藤正男 *自動車技術* 2009年5月, pp.85 - 90, 2009
48. 村松 鋭一, 渡部 慶二, フィードバック誤差学習とむだ時間, *計測と制御* Vol. 45, No. 8 , pp.667 - 670, 2006
49. P. Carlo Cacciabue (Editor), *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments: Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems*, Springer, 2007
50. S. Arimoto, S. Kawamura, Bettering operation o robotics, *Journal o Robotic system*, Vol.1-2, pp.123-140, 1984
51. T. Sugie, T. Ono, An Iterative Learning Control Law for Dynamical Systems, *Automatica*, Vol. 27, No. 4, pp.729-732, 1991
52. 杉江, 反復学習制御の展開 システム制御情報 Vol. 51, No.1, pp.34 - 36, 2007
53. 中野道雄, 井上憲, 山本裕, 原辰次, 繰返し制御, *計測自動制御学会*, 1989

## 本研究に関する発表

### 学術誌掲載論文

1. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Model Structure and Learning Process for a Driver Model Capable to Improve Driving Behavior, Journal of Control Engineering and Technology, (To be published)
2. Zhenchun Xia, Feng Gao, Kazuhide Togai, Hiroki Yamaura, Accelerated and Integrated Real Time Testing Process Based on Two Universal Controllers on Rapid Controller Prototyping, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 1(1):258-267, 2009
3. Kazuhide Togai, Hiroki Yamaura, Zhenchun Xia, A Layered Model Based Diagnosis: Application to a Gear Box System, JSAE transactions (査読中)
4. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, A Reduced Order Powertrain Model Concept for Model Based Development Process with a Driver Agent, SAE International, SAE2012-01-1628, 2012
5. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Human Driving Behavior Analysis and Model Representation with Expertise Acquiring Process for Controller Rapid Prototyping, SAE 2011-01-0051, 2011
6. Kazuhide Togai, Zhenchun Xia, Hiroki Yamaura, A Layer Structured Model Based Diagnosis: Application to a Gear Box System, SAE 2011-01-0753, 2011
7. Kazuhide Togai, Kazuo Kido, Hiroki Yamaura, Powertrain Model Selection and Reduction for Real Time Control Algorithm Design and Verification in Rapid Controller Prototyping Environment, SAE 2010-01-0236, 2010
8. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Emission Test Cycle Driving Agent and Expertise in Driving Behavior, Review of Automotive Engineering, Vol.29, No.3, 2008, p387 – p391
9. Kazuhide Togai, Kazuo Kido, Hiroki Yamaura, Zhenchun Xia, Model Based Diagnosis: Failure Detection and Isolation by State Comparison with Model Behaviors, SAE Int., SAE 2007-01-2077, 2007

### 招待講演

1. Kazuhide Togai, Driver Model Concept and structure - Capable to Improve Performance with Learning -, HMI Transport & Systems 2012, Berlin, 2012
2. Kazuhide Togai, Noise & Vibration Problem in Driveline System - Improvement with input torque profile shaping -, 自動車 NVH についての講演会, 韓国経営企画協会 (KMPA) , 2012

## 国際会議

1. Hisashi Tamaki, Kazuhide Togai, Driving Agent Model for Driver Assistance and MBD Part 1– Concept Design of Skill Learning Process -, Avec'12, 2012
2. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Driving Agent Model for Driver Assistance and MBD Part 2 – Learning Process Considering Physical Constraints - Based Development Process with a Driver Agent, Avec'12, 2012
3. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Model Structure, Realization and Learning Process for a Driver Model Being Capable to Improve Performance with Learning by Itself, FISITA F2012-E12-052, 2012
4. Kazuhide Togai, Michael Platten, Input torque shaping for driveline NVH improvement and torque profile approximation problem with combustion pressure profile, FISITA, F2012-J02-009, 2012
5. Hisashi Tamaki, Kazuhide Togai, Human driving behaviour analysis and model representation - acquisition of meta-knowledge and expertise acquiring process, Avec'10, 2010
6. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Powertrain output torque profile shaping for noise & vibration reduction, Avec'10, 2010
7. Kazuhide Togai, Theo Potter, et al., Gear Rattle Modelling and Meshing Gear Teeth Behaviour Estimation Considering Lubrication Influence, FISITA2010, F2010-C-095, 2010
8. Kazuhide Togai, Kazuo Kido, Hiroki Yamaura, NVH Problem Causes In Passenger Car Drive Line And Alleviation Measures With Input Force Shaping Based On Excitation And Transfer Path Modeling, proceedings of MPT2009-Sendai, 2009
9. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Construction of a Driving Agent for Target Tracking Driving and Learning Process, Avec'08, 2008
10. Kazuhide Togai, Hiroki Yamaura, Zhenchun Xia, A Structured Model Based Diagnosis: Application to a Gear Box System, FISITA208, F2008-05-110, 2008
11. Togai Kazuhide, Koso Miki, Yamaura Hiroki, Dynamic Gearshift Scheduling Strategy To Integrate Fuel Economy Optimal And Driving Force Reservation, FISITA, F2006P166, 2006

## 国内会議/研究会

1. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Human driving behavior analysis and model representation for test cycle driving, 2010 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE20105298, 2010
2. Kazuhide Togai, Kazuo Kido, Hiroki Yamaura, Powertrain output torque profile shaping for noise & vibration reduction with a robust control approach, 2010 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE20105339, 2010
3. 梅井 一英, 起振源としての内燃機関と振動低減手法について, 自動車技術会関西支部 2009 年度 講習会『振動・騒音に関する対応技術の動向と課題対応事例』, 2009
4. Kazuhide Togai, Hisashi Tamaki, Vehicle behavior knowledge acquiring and expertise process with a driving agent for emission test cycles, 2009 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE20095325, 2009
5. 梅井一英, 吸気音の生成過程と目標音設計, 自動車技術会音質シンポジウム予稿集, 2008
6. Kazuhide Togai, Zhenchun Xia, Hiroki Yamaura, A Structured Model Based Diagnosis: Application To A Gear Box System, F2008-05-110, 2008)
7. 梅井一英, 玉置久, 排ガスモード運転エージェントと運転習熟過程(第一報)JSAE20075814, 自動車技術会秋季学術講演会, 2007
8. Kazuhide Togai, Andy Dixon, Chris Halse, Theo Potter, Towards a Verified Tool for the Investigation of Transmission Gear Rattle, 2007 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE20075339, 2007