



# 次世代モビリティにおける価値成長デザイン

古郡 了\*1 . 山崎 卓\*1 . 黒田 康秀\*1  
末富 隆雅\*2 . 農沢 隆秀\*2 . 氏家 良樹\*3  
中澤 和夫\*3 . 松岡 由幸\*3

## Value Growth Design in a Next Generation Mobility

Satoru FURUGORI\*1, Taku YAMAZAKI\*1, Yasuhide KURODA\*1  
Takamasa SUETOMI\*2, Takahide NOUZAWA\*2, Yoshiki UJIE\*3  
Kazuo NAKAZAWA\*3, and Yoshiyuki MATSUOKA\*3

**Abstract**– This paper describes a concept of Emergent Control System which is a core module that manages value growth of a next generation mobility. Emergent Control System enables to adapt to the driver’s demand by means of estimation of the field condition of his trips based on identity mapping model and the emerging engine control algorithm based on genetic network programming (GNP). Value growth by Emergent Control System was verified as a subject of the improvement of the fuel efficiency and the battery duration of life in a series hybrid vehicle. The test was conducted on the driving simulator, and the control by Emergent Control System showed greater improvement than traditional engine control.

**Keywords**– timeaxis design, value growth design, emergent control system

### 1. はじめに

近年の主要な自動車の技術開発項目を以下に示す。

- (1) 地球環境維持に向けた技術開発  
電気自動車やハイブリッド自動車などパワートレインの革新による低燃費化や、リサイクル技術、バイオ材料開発などによる地球温暖化防止、など。
- (2) 安全性能向上に向けた技術開発  
ヒューマンエラーを防止するための予防安全技術や、事故時の被害を最小にする衝突安全技術、運転者を介在させない自動運転技術、など。
- (3) 利便性向上に向けた技術開発

車外情報を利用してより使いやすい車室にするテレマティクス技術や、誰でもどこでも使えるシェアムレスなモビリティの開発、など。

- (4) ものづくりの効率向上に向けた技術開発  
車両試作を省くことにより短期間・低コスト開発を目指した CAE 技術や、マザー工場の技術伝承、など。

(1)～(4)の技術開発は、社会からの要請により実施されるもので、自動車の実用価値向上を促進する技術である。

一方、電気自動車でスポーツカーを開発するなど、実用価値に加えて楽しさなどの精神価値を向上させ、若者のクルマ離れを食い止めようとする自動車各社の動きも顕著になっている。以上から、次世代モビリティを検討する際には、実用価値を満たした上で、精神価値をも満足させることに効果的なシステムを考えていくことが得策である。そこで、コンソーシアム型プロジェクト「未来モビリティ創生プロジェクト(代表者: 松岡由幸)」として、未来の社会とモビリティのあり方を議論してきた。その結果、タイムアクシス・デザインとそれを応用する価値成長デザインが必要であるという結論に至った。実用価値と精神価値が購入時よりも向上していく価値成長

\*1 マツダ株式会社技術研究所 神奈川県横浜市神奈川区守屋町 2-5

\*2 マツダ株式会社技術研究所 広島県安芸郡府中町新地 3-1

\*3 慶應義塾大学大学院理工学研究科 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

\*1 Mazda Motor Corporation, Technical Research Center, 2-5 Moriya-cho, Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa

\*2 Mazda Motor Corporation, Technical Research Center, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima

\*3 Graduate School of Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa

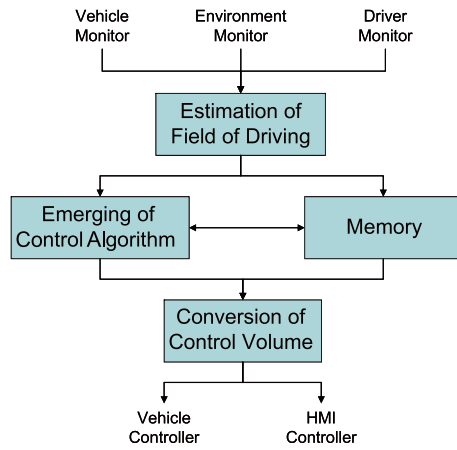


Fig. 1: Block diagram of emergent control system

デザインの一例として価値成長モビリティを提案し、その価値成長を長期的に管理するコアモジュールとして、創発型制御システムを考案した。本論文では、開発した創発型制御システムのコンセプトと基本デザインの概要を述べ、創発型制御システムを用いることにより価値成長効果を検証した一事例について記す。

## 2. 創発型制御システムのコンセプト

創発型制御システムは、使用者の使用環境などの多様な場やその時間軸変動に対応することにより、使用者の使用状況の長期的変化も考慮して個人適合させていくことを狙いとしたシステムである。創発型制御システムの概念図を Fig. 1 に示す。本システムでは、走行場の状態を常時推定しながら、走行場の状態に応じて制御を出力する。走行場の状態と制御アルゴリズムはメモリーに記憶され、走行場の状態に対応した制御アルゴリズムがない場合には、新たな制御アルゴリズムが創発される。選択された制御アルゴリズムに基づいて制御量が計算され、情報提示、警報、車両制御などが実行される。

創発型制御システムを用いて、実用価値を向上させる事例を 2 例示す。

1 例目は、運転をすればするほど、燃費が良くなるシステムである。燃費を良くするためには、車両モニターから入力される運転者のアクセル量、ブレーキ量、車速などの車両状態データを予め学習しておき、低燃費になるようにエンジン出力目標値の制御を行う。

2 例目は、運転をすればするほど、より安全な走行ができるシステムである。車両状態データに加えて、環境モニターから入力される車間距離や相対速度などの車外環境データ、運転者モニターから入力される覚醒度などの運転者反応データも含めて走行場のリスクの程度に応じて予め学習し、情報提示、警報、制御介入等を行うことにより、事故リスク低減を行う。

創発型制御システムは、実用価値だけでなく精神価値

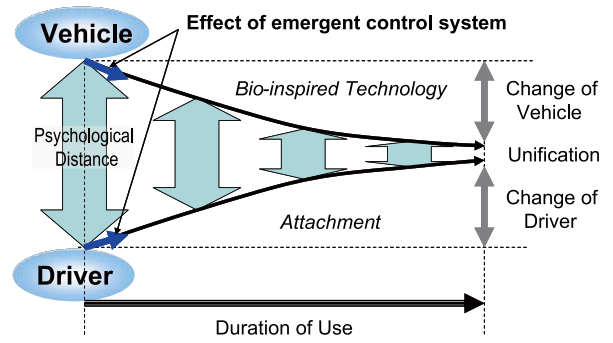


Fig. 2: Concept of attachment growing

の向上にも有効であると考え、そのシナリオ例を示す。

精神価値として、長期間使っていくうちに、愛着が増加するシステムを考える。愛着を感じさせる要因の一つとして、モノ自体を相棒や子供のように感じさせる「親近感」がある [1]。親近感向上の概念図を Fig. 2 に示す。クルマが運転者を慮る機能を持つことにより、運転者がクルマへの親近感を増加させ、クルマと運転者との心理的距離を縮める。クルマと運転者の心理的距離を検討すべき重要な課題の一つとして、運転技量の課題がある。人は、運転免許取得初期には、上手に運転できないが、習熟するに従って自由に運転できるようになり運転が楽しくなる。一方で、習熟できずに運転を諦め、ペーパードライバーになる人もいる。これは、クルマが誰に対しても同じ条件で技量向上を要求するからである。習熟の遅い人に対してはクルマが手を差し伸べ、習熟の早い人に対してはクルマが運転テクニシャンになるプログラムを提供すれば、誰もが自己実現の達成感を感じるようになると思われる。クルマと自己実現のプロセスを共有化した運転者は、クルマに今まで以上の愛着を感じ、かけがえのない存在となるだろう。一方で、クルマのハードとしての経年劣化は避けがたく、機能製品である以上いずれ手放す時がくる。創発型制御システムでは、共有化した自己実現のプロセスをデータとして蓄積してあるので次に乗り換える車に移転でき、個人の過去の経験を反映したクルマの制御が可能となる。

## 3. 創発型制御システムの基本デザイン

開発した創発型制御システムは、「走行場の推定システム」、「車両アルゴリズムの創発システム」、「走行場と車両アルゴリズムの記憶システム」の 3 つのサブシステムで構成される。3 つのサブシステムは、タイムアクセス・デザインにおけるマルチタイムスケールの視点に則り、ショートタイムスケール、ミディアムタイムスケール、ロングタイムスケールの 3 つのタイムスケールに応じた制御を行う。創発型制御システムの基本フローを Fig. 3 に示す。

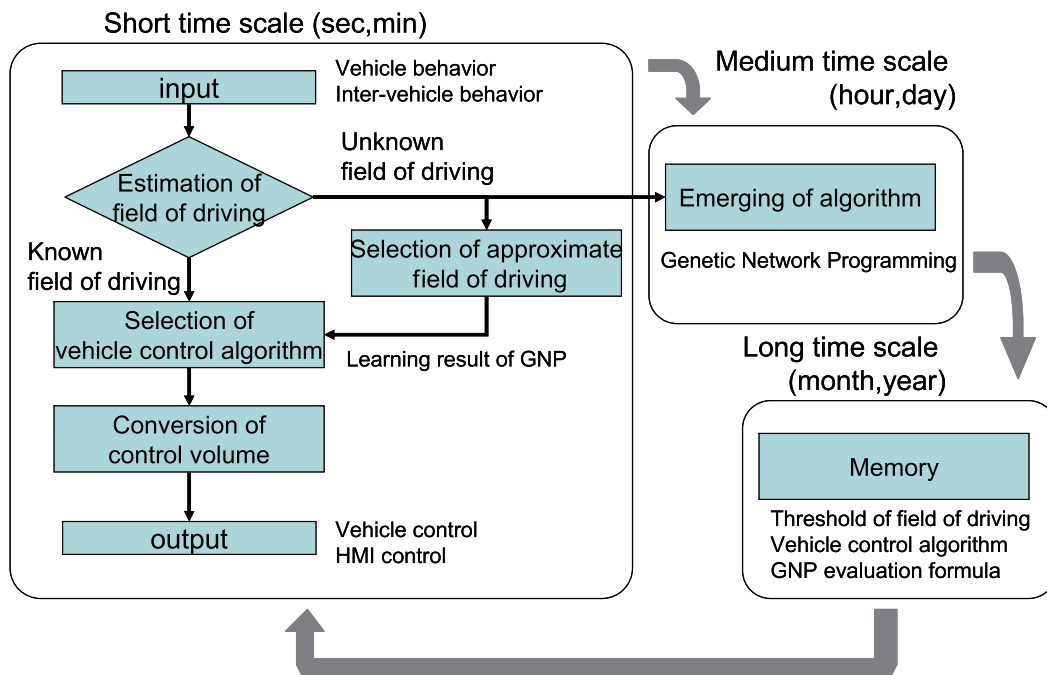


Fig. 3: Flowchart of emergent control system

(1) ショートタイムスケールの制御

ショートタイムスケールでは、車外環境と車両状態に基づき走行場の推定を行う。走行場が既知の場合は、あらかじめ用意された走行場ごとに最適な車両制御アルゴリズムを選択し、車両制御を行う。運転者特有の操作量や天候などの使用環境、およびそれらの時間軸変動が入力され、既知の走行場として推定できない場合は、未知の走行場として推定され、近似する走行場を選択する。そして、近似する走行場に最適な車両制御アルゴリズムを選択し、仮の車両制御を行う。また、走行場の推定では、車外環境と車両状態から、運転者が危険を感じた状態であるヒヤリハットの判定を行う。以上の処理はリアルタイムで行われる。

走行場の推定にはニューラルネットワークモデルの一種である恒等写像モデル [2] を用いる。恒等写像モデルの構成を Fig. 4 に示す。恒等写像モデルは、非線形データの次元圧縮、および特徴抽出に有効な手段と考えられている。入力層のデータを中間層で圧縮し、出力層で復元する。入力層と出力層の値が等しくなるように学習を行うことにより、中間層には入力層に含まれる必要な情報がコンパクトに表現される。

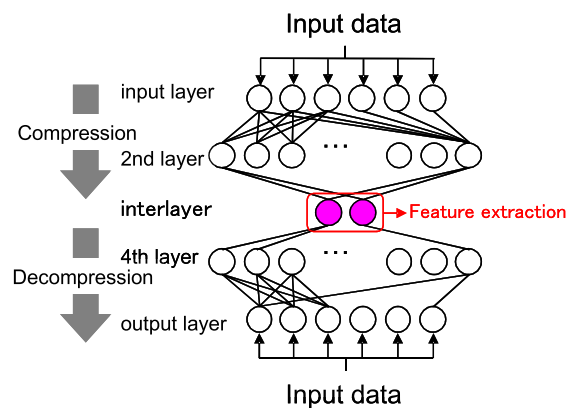


Fig. 4: Identity mapping model

(2) ミディアムタイムスケールの制御

ショートタイムスケールにおいて仮の車両制御を行っていた未知の走行場に対して、仮の車両制御より適した車両制御アルゴリズムを遺伝的ネットワークプログラミング (GNP) [3] によって創発する。GNP は、遺伝的アルゴリズム (GA)、遺伝的プログラミング (GP) の拡張であり、基本アルゴリズムは Fig. 5 に示すとおり同様で

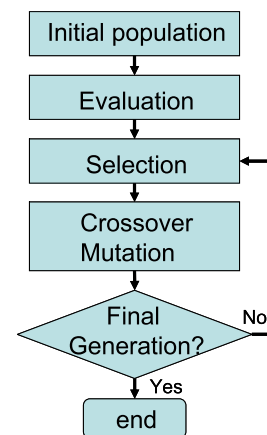


Fig. 5: Basic algorithm of GNP

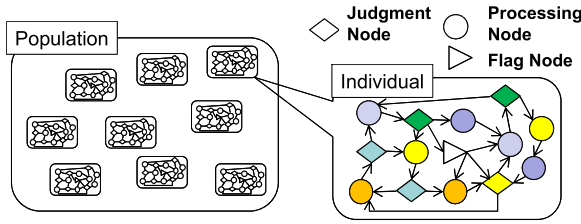


Fig. 6: GNP configuration

ある。評価値は個体の適合度や有効性を数値化したものであり、その値は評価関数によって求められる。交叉や突然変異を実行し世代を進化させることにより、評価値の最適化が行われる。GA, GP, および GNP の違いは、解の表現方法が GA はビット列構造, GP はノード関数を用いた木構造であるのに対し, GNP ではノード関数を用いたネットワーク構造になっている。GNP の基本構成を Fig. 6 に示す。個体では、状態が各ノード上を遷移していき、ノード関数を逐一実行していく。ノード関数には、if-then 文による条件判定のみを行う判定ノード、処理内容を実行する処理ノード、判定や処理を行わず状態を遷移させるのみのフラグノードがある。基本アルゴリズムを実行することにより、接続先ノードの変更、ノード内容の変更が行われ、車両制御アルゴリズムの準最適解が探索される。

### (3) ロングタイムスケールの制御

ミディアムタイムスケールで創発された車両アルゴリズムや、生成された走行場に関する閾値を更新して記憶する。この記憶がショートタイムスケールにおける走行場の推定の際に適用されることで、未知の走行場として処理されていた走行場を、既知の場として処理ができる。つまり、運転者や使用環境とそれらの時間軸変動に適合した車両制御を行うことができ、多様な場とその時間軸変動への対応が可能となる。

## 4. 創発型制御システムによる低燃費制御

### 4.1 目的

創発型制御システムによる価値成長の検証を行う。ハイブリッド自動車の燃費改善およびバッテリー長寿命化を対象とした。検証の目的は、創発型制御システムが、  
 ① 多様な走行場に対応した車両制御ができていること。  
 ② 多ユーザーに対応した車両制御ができていること。  
 ③ 多様な走行場、多ユーザーに対応した車両制御を行った結果、多目的のユーザー価値が向上していること。  
 を確認することである。なお、データ取得およびデータ検証は、ドライビング・シミュレータを用いて行い、用いる車両モデルは 4.2 節に示すとおりである。

### 4.2 車両モデル

想定するシリーズ方式のハイブリッド自動車のシステム構成を Fig. 7 に示す。エンジンで得られた動力は発電機で電力に変換され、バッテリーの電力と合わせてモータに送られ、駆動力に変換される。バッテリーは発電機、モータと電気的に接続されており、充放電が可能である。また、ブレーキによる制動エネルギーをモータで回生することにより、バッテリー充電が可能である。エンジンモデルとバッテリーモデルは次に示すとおりである。

#### (a) エンジンモデル

発電量  $W_G$  [W] は式 (1) により求める。

$$W_G = \eta_G W_E \quad (1)$$

ただし、 $W_E$  [W] はエンジン出力、 $\eta_G$  は発電機の発電効率である。 $W_E$  は、トルク  $T_E$  [Nm] と回転数  $\omega$  [rpm] によって (2) 式で表される。

$$W_E = T_E \cdot \omega \frac{2\pi}{60} \quad (2)$$

エンジン出力変更時は、予め求められた最適なエンジントルクと回転数に収束するよう、PID 制御を行う。燃料消費率  $F_E$  [g/kWh] は、トルク・回転数からの燃料消費率換算テーブルより求める。1 秒当たりの燃料消費量  $F_C$  [g/s] は (3) 式より求める。 $F_C$  と時間との積算により燃料消費量が得られ、これを積分したものが総燃料消費量となる。

$$F_C = W_E \cdot F_E / 1000 / 3600 \quad (3)$$

#### (b) バッテリーモデル

バッテリー残容量  $E_B$  [Wh] は式 (4) より求める。

$$\dot{E}_B = W_B - (W_B/V_B)^2 R_B \quad (4)$$

$$W_B = W_G - W_M - W_A \quad (5)$$

ただし、 $W_B$  [W] はバッテリー入出力量、 $V_B$  [V] はバッテリー内部電圧、 $R_B$  [ $\Omega$ ] はバッテリー内部抵抗である。また、等価燃料消費量  $F_B$  [g] は式 (6) より求める。等価燃料消費量とは、走行終了後にエンジンを稼働させて、SOC を初期の状態に戻すために必要とする燃料消費量である。

$$F_B = -\Delta SOC \cdot E_{Bmax} \cdot F_E / \eta_G / 1000 \quad (6)$$

ただし、 $\Delta SOC$  [%] は走行終了時と開始時のバッテリー残量 SOC との差である。

バッテリーの劣化量  $Y$  は  $\sqrt{t}$  時間に比例し [4]、その傾きとなる劣化係数  $k$  は放置時とサイクル時によって異なる。劣化係数は温度  $T$  [K]、平均電流  $I_{rms}$  [A] によって決まる。本研究では、充放電電流と温度とから劣化量を算出する実験式を用いた。

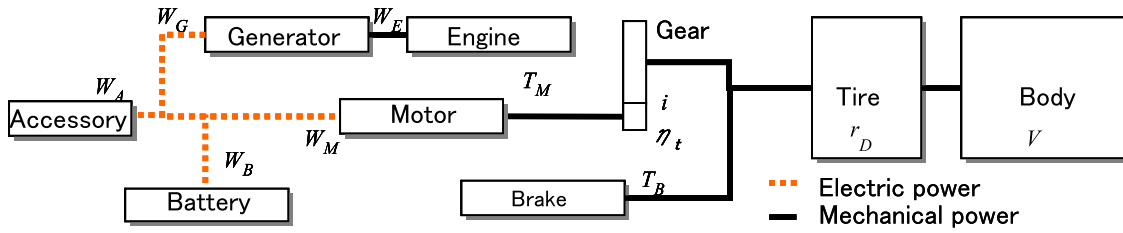


Fig. 7: Series hybrid vehicle system

### 4.3 実験方法

#### (1) 実験システムの構成

実験システムの構成を Fig. 8 に示す. 創発型制御システムのコアモジュール ECU をドライビング・シミュレータに接続し, ドライビング・シミュレータで走行した時の車外環境データ (車間距離とその微分, 道路勾配) と車両状態データ (車速, アクセル/ブレーキ踏み込み角とその微分) を創発型制御システムに入力する. 前節で示した車両モデルを組み込んだ創発型制御アルゴリズムに基づき走行場推定と制御目標値計算が実行され, ドライビング・シミュレータに出力する.

#### (2) シミュレータ走行条件

以下の 4 通りの走行条件で, 各 5 分間の走行データを取得した. 3 名の走行データを取得し, 2 名分を学習に, 1 名分を検証に用いることにした. データサンプリング周期は 100 ms とした.

##### ① 平坦走行

勾配のない平坦な道において, 前方に障害物や先行車がなく自由に運転できる環境で, 速度 100[km/h] の定常走行.

##### ② 下り走行

4~5% の下り勾配において, 平坦走行と同様の走行.

##### ③ 上り走行

4~5% の上り勾配において, 平坦走行と同様の走行.

##### ④ 渋滞走行

車速を変化させた前方車両を追従することで, 発進停止を繰り返す走行環境で, 最高速度は 40[km/h].

#### (3) 評価モデルと GNP の設定

燃料消費量とバッテリー劣化量を式 (7) によりコスト換算し, 合計コストを評価値として用いる.

$$cost = \frac{C_{battery} \times \frac{E_{Bmax}}{1000}}{\frac{X}{t_{drive}} \times d} + \frac{C_{fuel}}{F_l} \quad (7)$$

ただし,  $C_{battery}$ [¥/kWh] はバッテリーコスト,  $E_{Bmax}$ [Wh] はバッテリー容量,  $X$ [h] はバッテリー寿命予測日,  $t_{drive}$ [h] は走行時間,  $d$ [km] は走行距離,  $C_{fuel}$ [¥/l]

#### Driving Simulator Cockpit



#### Driving Simulator Control System

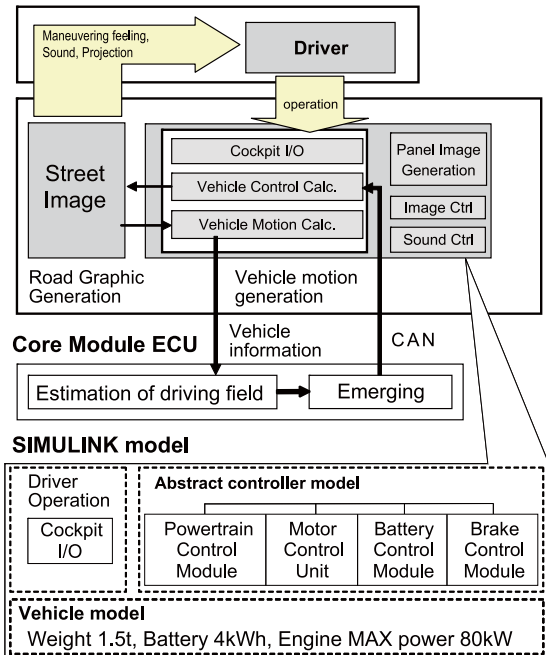


Fig. 8: Experimental system

は燃料コスト,  $F_l$ [km/l] は燃費である.

右辺第一項はバッテリー劣化によるコストを表し, 右辺第二項は燃料消費によるコストを表す. バッテリーの寿命となる劣化度を 20[%] (= 残容量 80[%]) と定義し, 連続使用した場合の寿命を迎えるまでの時間を  $X$ [hour] とした. バッテリーコストは, NEDO による二次電池技術開発ロードマップ [5] より 2010 年の予測値から,  $C_{battery} = 100000$ [¥/kWh] とした. また, ガソリン価格を,  $C_{fuel} = 130$ [¥/l] とした.

次に, GNP パラメータを Table 1 に示す. 判定ノード

**Table 1:** GNP parameter

Generation	4000
Individuals	60
Judgment node	
Acceleration[0 – 1]	7
Brake[0 – 1]	7
SOC[40 – 70 %]	8
Speed[0 – 180 km/h]	15
Processing node	
Engine power[0 – 70 kW]	36
Flag node	3
Elite	1
Tournament selection	2
Probability of crossover	0.7
Probability of mutation	0.4

や処理ノードは入力値の範囲を任意の間隔で刻み、閾値の異なるノードを複数生成する。判定や処理の際には、入力値がその閾値の範囲内か否かで Yes/No の二方向出力を行う。

(4) 制御条件

以下の4条件の評価を実施した。

① 未学習

バッテリー残量 SOC が 70% 以上でエンジンを停止しバッテリー電力で走行, 40% 以下でエンジンを稼働させバッテリー充電を行う。

② 固定学習

1つのGNP(平坦走行)により創発された車両制御アルゴリズムにより制御。

③ 走行場適合学習

推定された走行場ごとに GNP を切り替える制御。

④ 走行場・個人適合学習

検証に用いる1名の走行データにより, 走行場推定閾値と走行場ごとの GNP を個人適合させた制御。

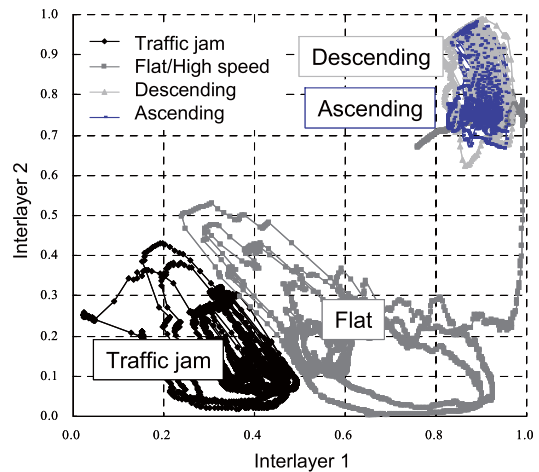
4.4 実験結果

(1) 走行場の推定結果

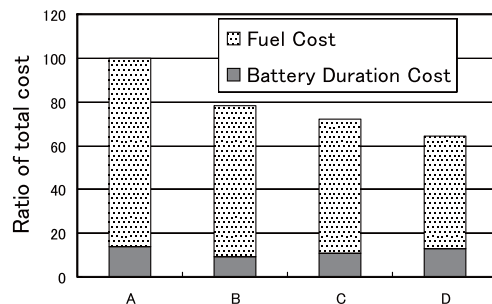
恒等写像モデルにおける中間層出力の一例を Fig. 9 に示す。非線形情報圧縮された中間層で走行場を分離可能なことがわかった(上りと下りも3層と4層で分離されている)。

(2) 創発制御による改善効果

全走行場を総合したとき, 4つの制御に対する合計コストを Fig. 10 に示す。未学習, 固定学習, 走行場適合学習, 走行場・個人適合学習という順序で制御が高度に



**Fig. 9:** Estimation of driving fields



A: Before learning

B: Fixed learning

C: Driving field adaptation learning

D: Driving field & individual adaptation learning

**Fig. 10:** Improvement of fuel cost by control types

なる。合計コストは, 制御が高度になるほど改善効果が大きくなり, 未学習と比較して, 固定学習では 22%, 走行場適合学習では 28%, 走行場・個人適合学習では 36% 改善された。以上から, ①4つの多様な走行場に対応でき, ②2名から生成された制御アルゴリズムが別の被験者へも適用できることから, 多ユーザへの対応ができ, ③走行場の推定, GNP 選択, 個人適合することにより, 合計コストが最大限に低下し, 創発型制御システムの価値成長の効果が検証された。

5. まとめ

本研究では, タイム軸・デザインの研究として, 価値成長モビリティにおける価値成長を管理するコアモジュールとして, 創発型制御システムを提案した。さらに, 創発型制御システムの車載 ECU を開発し, それを用いて燃費・バッテリー寿命改善効果の検証を行った。その結果, より高度な創発型制御を行うほど改善効果の向上が見られ, 性能面での価値成長を示すことがで

きた。これにより、クルマが運転者に適合して変化することで、クルマと運転者の心理的距離が縮まることがわかり、精神価値の向上に向けた礎を構築できた。今後は、長期間使用時の価値成長検証も含め、クルマが運転者に近づくことが運転者の精神価値向上に寄与するか検討を進め、タイムアクシス・デザインに基づく価値成長モビリティの実用化を目指す。

特許： 特願 2010-164216

### 参考文献

- [1] 青木弘行: 時間軸をデザインする時代, 第4回横幹連合コンファレンス論文集, 1A1-1, 2011.
- [2] G. W. Cottrell, P. Munro, and D. Zipser, "Image Compression by Back Propagation. An Example of Extensional Programmings," ICS Report 8702, Institute for Cognitive Science, UCSD, 1987.
- [3] H. Katagiri, K. Hirasawa, and J. Hu, "Network Structure Oriented Evolutionary Model: Genetic Network Programming, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers," Vol.38, No.5, pp. 485-494, 2002.
- [4] 竹井勝仁: 重要性が増してきた二次電池技術の最前線, IEEJ Journal, Vol.130, No.5, 2010.
- [5] NEDO, Battery RM2010, 2010, <http://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/other/FA/nedoothnews.2010-05-17.7840439413/>

### 古郡了



1985年慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業。同年マツダ株式会社に入社。技術研究所にて、着座疲労、乗降性、高質感内装材開発など人間工学や感性工学の研究開発に従事、現在に至る。自動車技術会、日本人間工学会などの会員。

### 山崎卓



2004年東京電機大学工学部電子工学科卒業。06年同大学院工学研究科博士課程前期修了。同年マツダ株式会社に入社。次世代ロータリエンジンの開発をした後、技術研究所にて、ファジィシステム/電子制御システムの研究に従事。

### 黒田 康秀



1990年広島大学工学部第2類電気系卒業。92年同大学院工学研究科博士課程前期修了。92年マツダ株式会社入社。電子制御システムの研究開発に従事。日本物理学会、応用物理学会などの会員。

### 末富 隆雅



1987年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士課程修了。同年よりマツダ株式会社技術研究所、現在に至る。ドライビング・シミュレータ、アクティブ・セーフティ、マン・マシン・システム、車両統合制御などの研究開発に従事。機械学会、自動車技術会、計測自動制御学会、シミュレーション学会などの会員。

### 農沢 隆秀



1980年広島大学大学院工学研究科移動現象工学博士前修了、博士(工学)。同年マツダ株式会社入社。空気力学、人間工学、感性工学の研究を中心に、車両に関わる研究開発に従事。Fordグループ技術開発プロジェクトリーダー、広島国際大学客員教授兼務の車両実験研究部部長を経て、現在、東京大学生産技術研究所委嘱研究員を兼務し、技術研究所長。日本機械学会、日本流体力学学会、日本人間工学会、自動車技術会などの会員。

### 氏家 良樹



2005年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(工学)。同年より同大学理工学部にて6年間の助教を経て、2011年より同大学理工学部専任講師。計算機援用の設計方法論に関する研究に従事。日本計算工学会、日本機械学会などの会員。KEER 2007 Excellent Paper Award などを受賞。

### 中澤 和夫



1989年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了、工学博士。同年より同大学理工学部の助手、1992年同大学理工学部専任講師。2001年同大学理工学部助教授、2007年より同大学理工学部准教授。環境情報処理とロボットの学習制御に関する研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。

### 松岡 由幸



1979年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。博士(工学、千葉大学)。野村総合研究所にて本四架橋プロジェクト、日産自動車にてスカイライン、ローレルなどの開発に従事。イリノイ工科大学デザイン研究所フェローを経て、2003年より慶應義塾大学教授。専門は、デザイン科学。デザイン塾主宰。