

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22360170

研究課題名（和文）

ハイブリッドシステム論に基づく行動支援制御系の設計

研究課題名（英文）

Design of Behavior Assistance Control based on Hybrid System Theory

研究代表者

鈴木 達也 (SUZUKI TATSUYA)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50235967

研究成果の概要（和文）：連続／離散のハイブリッドシステムモデルに基づくシステム同定論に立脚した判断・動作統合型の行動モデリング手法をベースとして、「判断」「動作」の各フェーズで複合的な行動支援を行う支援制御器のための制御系設計論を構築した。具体的には、判断と動作の自動抽出技術に立脚し、行動モデルを構築、支援制御器と人間が同じモード遷移構造（判断特性）を共有する「判断特性共有型」の行動支援制御系を提案した。この設計思想のもと、オンライン最適化に基づくモデル予測型の行動支援制御系を構築し、自動車運転行動への適用を通してその有用性を立証した。

研究成果の概要（英文）： This research has developed a new framework of the assisting system design based on a hybrid system description of the behavior model. In particular, a piecewise ARX model was used to represent the human behavior. Then, the design problem of the assistance control is formulated as an online optimization problem. By using the developed framework, the decision making mechanism is shared between human and machine. The usefulness is demonstrated by applying driving behavior.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2012年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：システム制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム、ハイブリッドシステム、人間行動、行動支援

## 1. 研究開始当初の背景

高齢化社会の到来や福祉・介護に関する要求の高まりを受けて、人間行動を支援する行動支援系の重要性が高まっている。人間の行動は通常、「認知」「判断」「動作」の各フェーズを経て発現すると考えられているが、これまで実現された行動支援系においては、そのほとんどが「認知」「判断」「動

作」の各機能的特徴を個別に切り出して各フェーズで個別にアシストを考えるものであった。これに対し、「認知」「判断」「動作」の各フェーズで同時かつ統合的な行動支援を行う行動支援制御系の設計・実現は現状ではほとんど手がついておらず、より高次の行動支援を実現するためにも何らかのブレークスルーが強く望まれていた。このよ

うな統合型の行動支援制御系を設計・実現するためには、「認知」「判断」「動作」の各機能的特徴をできるだけ統一化された数理体系で表現し、得られた数理モデルとある種の設計原理に基づいて設計問題を定式化する必要があった。例えば、自動車運転などにおいては、各フェーズに向けた様々な支援装置が開発されているが、これらの複合的なインタラクションを想定していない点や数理モデルに基づいたアプローチがとられていないことなどから、結果として保守的な支援装置となりがちであった。また、積極的な支援を試みる場合、人間側がそれを受容できない、といったオートメーションサプライズの問題が危惧されていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「判断特性共有型行動支援制御系」と呼ぶ設計原理と人間行動のハイブリッドシステム論的表現手法に立脚して、個人適合型の行動支援制御系の設計論を創出することである。

行動における判断フェーズに対しては、判断が主に「選択する」か「選択しない」かの記号的な変数で表現できることから、離散的かつ事象駆動的な数理表現が適切と考えられ、オートマトンモデルやルールベース表現等が代表例として用いられてきた。また、動作（操作）フェーズに対しては、人間の運動学的特性と密接な関係があることから、連続的かつ時間駆動的な数理表現が適切であり、代表例として伝達関数表現や状態空間モデル等が用いられてきた。しかしながら、判断フェーズと動作フェーズは互いに密接な関係にあり、上述の統合型の行動支援制御系を設計するためには、両者を個別に独立した機能としてモデル化、あるいは支援するのでは不十分である。この点を踏まえて、応募者らのグループはこれまで、連続・離散ハイブリッドシステムモデルに基づくシステム同定理論に立脚した比較的汎用性の高い統合的な判断・動作系のモデル化手法を提案している。応募者はこれまで、観測データのみから判断と動作の混在した図1に示すような人間行動のハイブリッドシステムモデルを推定、構築してきた。

図1は動作モード数が3の例であり、ドライバは外界から得た環境情報を認知し、ドライバが持つ三つの動作モードの中から適切なものを判断、適用し、外界へと働きかけるモデルである。人間行動の判断フェーズの数理モデルを観測データのみから明示的に抽出する試みは世界的に見てもユニークな試みであり、統合型の行動支援制御系の設計において重要な役割を果たすと期待

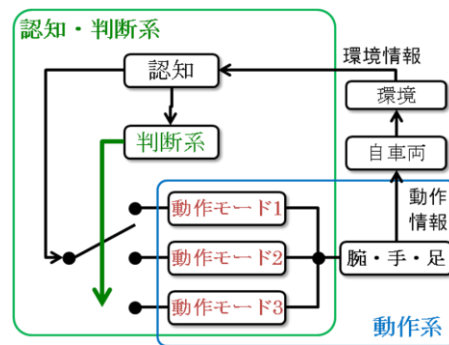


図1 改良したシミュレータ

できる。一方、統合型の行動支援制御系における設計原理および設計方法については、未解決であった。これまで実現されてきた行動支援制御系が有する最も大きな問題は、人間の判断と支援制御器の判断に整合性がとれていない点にあったと考える。言い換えれば、統合型の行動支援制御系においては、人間と支援制御器が同一の判断特性を共有することが不可欠であり、この判断特性の整合性に適切な動作アシストが加わってはじめて親和性の高い行動支援制御系が実現できることになる。本研究ではこのような系を「判断特性共有型行動支援制御系」と呼び、制御理論における重要な原理の一つである内部モデル原理に鑑みて、行動支援制御系における重要な設計原理と位置づける。本研究では、この設計原理と人間行動のハイブリッドシステムモデルに立脚して、個人適合型の行動支援制御系の設計論創出を主目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、判断・操作統合型の行動支援制御系の設計プロセスを確立し、その有用性を自動車運転行動への適用を通して立証した。設計プロセスを確立するために、(1) 行動データの観測、(2) 人間行動のハイブリッドシステムとしてのモデル化、(3) 最適化理論に基づく動作アシストの実時間最適化手法の確立、(4) 支援制御器としての実装および動作の検証、の4つの段階に分割し、取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 行動データの観測

本研究では自動車の運転行動を主軸として研究を行った。まず、初年度のH22年度には、人間の行動解析に先だって、自動車の運転行動データを収集するための実験設備の改良に取り組んだ。実験設備の構築成果として、A. 現実では実施困難な走行実験や、高い再現性を必要とする実験を可能とするドライビングシミュレータ、B. 研究室が所有していた一人乗り用小型電気自動車、の二つの実験プラットフォームを改良した。

A. のドライビングシミュレータ (以下 DS) について、図 2 に改良した DS の運転風景を示す。当補助金により購入した機器を活用することで、正面、左右の 3 画面による前方 180 度視界の提示に加え、ルームミラー、左右ドアミラーの 3 面を含めた没入感の高い画像提示が可能となった。また、ステアリングや内装品には市販車に用いられる物を採用し、より実車で運転に近い実験システムを構築できた。



図 2 改良したシミュレータ

(2) 人間行動のハイブリッドシステムモデルとしてのモデル化

より精度の高い行動モデルを構築するために、新しいハイブリッドシステムモデルの理論的整備を行った。本研究では、確率重み付き ARX モデル (Probability Weighted Auto-Regressive exogenous model、以下 PrARX モデル) を提案した。PrARX モデルは、ARX モデルと呼ばれる線形の外性入力付き時系列モデルを、soft-max 関数と呼ばれる切り替えを実現する関数により連続的に接続した関数であり、次式のように定義される。

$$y_k = \hat{y}_k + e_k \dots\dots\dots(1)$$

$$\hat{y}_k = \sum_{i=1}^s P_i(\phi_k) \theta_i^T \phi_k \dots\dots\dots(2)$$

ここで  $y_k$  は観測、 $\hat{y}_k$  はモデルの出力、 $e_k$  は誤差項であり、 $\phi_k$  は離散時刻  $k$  における入力と過去のモデル出力からなる拡大回帰ベクトル、 $\theta_i$  はモード  $i$  における ARX モデルのパラメータである。 $s$  はモード数であり、ここでモデルの出力は、各モードの ARX モデルの出力  $\theta_i^T \phi_k$  を、状態  $\phi_k$  のモード  $i$  への所属確率  $P_i(\phi_k)$  により重み付けて和をとったものとして定義される。ここで、 $P_i(\phi_k)$  は以下のように定義される。

$$P_i(\phi_k) = \frac{\exp(\eta_i^T \phi_k)}{\sum_{j=1}^s \exp(\eta_j^T \phi_k)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\eta_s = 0 \dots\dots\dots(4)$$

ここで、図 3 に 3 モードの PrARX モデルの例を示す。

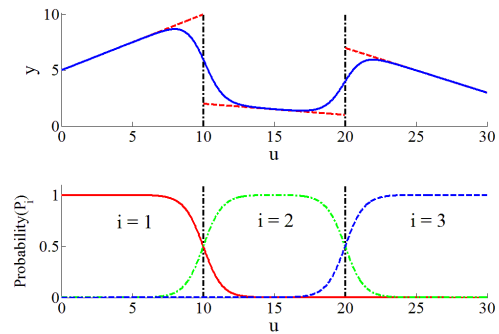


図 3 PrARX モデルの例

図 3 の上図では、三つの線形モデル (図中の赤い破直線) が、下図で示された確率重みにしたがって滑らかに接続されている様子が確認できる。この PrARX モデルを用いて運転行動をモデル化した結果を図 4 に示す。

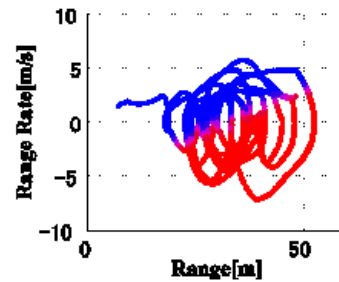


図 4 追従運転の PrARX モデルによるモデル化結果に基づくモード分割の様相

図 4 では、ある一人の被験者が、前方を走行する車両を追従運転する際のデータの分布が、前方走行車両と被験者の車両との車間距離と相対速度の平面で示されている。ここで、各データ点は、PrARX モデルによりモデル化した際のモード所属確率によって色分けされており、赤色で示された点がモード 1 である確率が 0.9 以上の点、青色で示された点がモード 2 である確率が 0.9 以上となる点である。ただし、ここでモデルへの入力として車間距離、相対速度、KdB (リスク認知指標) を用い、モデルの出力として自車両の加速度を用いた。図中の紫で示された点群は二つのモード境界付近に該当する点群であり、二つのモードが混在した出力が得られると期待される領域となる。

(3) および (4) 最適化理論に基づく動作アシストの実時間最適化手法の確立と、支援制御器としての実装および動作の検証

次に、判断共有型の支援系をシステム工学的に構築するため、運転支援量の決定問題

を、得られたドライバの運転行動のモデルを明示的に用いた支援量の最適化問題として定式化した。具体的には、実時間の支援量決定を可能とするために、モデル予測制御 (Model Predictive Control : 以下 MPC) の枠組みを用いて定式化した。図 5 にこのような考え方に基づく支援系のアーキテクチャを示す。

提案する支援系では、判断、動作を明示的に包含した人間の行動モデルが最適化器の中に拘束条件として組み込まれており、この行動モデルを用いることで人間の判断や動作の特性を考慮しつつ、行動の予測に基

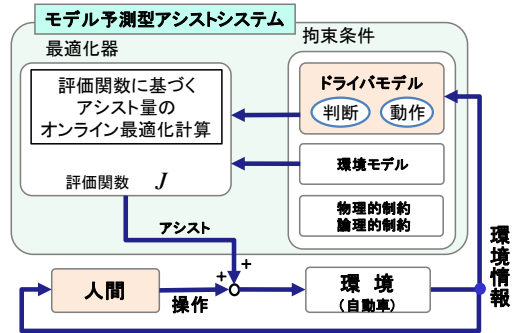


図 5 判断共有型支援系

づいたアシスト量の最適化が可能となる。本研究では、高速道路などの運転において比較的出現頻度の多いタスクである前方走行車両への追従タスクを対象として、ドライバへの加減速支援量の決定問題を、①確定的なハイブリッドシステムモデルである区分的線形モデルとして表現された行動モデルを用いた混合整数線形計画問題としての定式化、②(2)にて述べた PrARX として表現された行動モデルを用いた非線形モデル予測制御問題としての定式化、の二つの手法からアプローチし、定式化、実装、そして実験を行った。

①では、観測したドライバの運転行動を区分的線形モデル (Piece-Wise ARX model: 以下 PWARX モデル) を用いて表現した。2 モードの PWARX モデルは以下の式で表現される。

$$y_k = \begin{cases} \theta_1^T \phi_k & \text{if } \eta^T \phi_k > 0 \\ \theta_2^T \phi_k & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\theta_i$  と  $\phi_k$  はそれぞれモード  $i$  における ARX モデルのパラメータである。また、 $\eta$  は二つのモードを分ける回帰ベクトル空間上の分離超平面  $\eta^T \phi_k = 0$  のパラメータである。PWARX モデルはハイブリッドシステムモデルを同定する際に良く用いられる一般的なモデルである。このような PWARX モデルを用い、支援量決定問題を下記のような混合整数線形計画問題として定式化した。

Given:  $\phi_k (= \phi_0^*)$

Find:  $u_i^*, \phi_i^*, y_i^*, \delta_i^*, z_i^* \quad (i = 1, \dots, n)$

which minimize:  $J$

subject to:

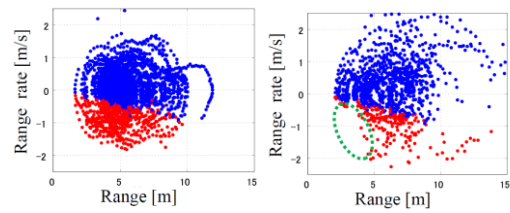
(driver's PWARX model)

(vehicle model), (other constraints)

ここで  $n$  はモデル予測制御における予測区間のステップ数、 $\phi_i^* (= \{\kappa_i^*, D_i^*, V_r_i^*\})$ 、 $y_i^*$  は予測された状態量 (KdB、車間距離、相対速度) とモデルの出力、 $\delta_i^*$ 、 $z_i^*$  は、ここでは詳細を述べないが、PWARX モデルを混合論理的システムとして記述する際に現れるバイナリ変数と補助変数である。 $u_i^*$  は最適化する対象となる入力 (ドライバへの加減速支援量) である。本最適化問題には拘束条件として、先に構築した PWARX モデルとしての行動モデル、車両モデル等が組み込まれており、人間の行動の予測に基づいて支援量  $u_i^*$  の決定が可能となる。ここで、評価関数には、下記の  $J$  を用いた。

$$J = \sum_{i=1}^n \omega_1 \zeta_i^* + u_i^{*T} u_i^* \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\zeta_i^*$  は衝突余裕時間の逆数を変数に取った時の基準値からの逸脱量であり、第一項は衝突余裕度に関する評価項である。一方、第二項は過剰な支援を防止するための支援量の評価項であり、 $\omega_1$  はこれらの二つをバランスするための重み係数である。図 5 に、小型の電気自動車を用いて上記の支援系を実装した結果を示す。図 6(a) は提案アシストを用いない場合の走行データの分布を、図 6(b) は提案アシストを用いた場合の走行データ分布を示す。



(a) without assist (b) with assist

図 6 判断共有型支援系

図 6(a) と図 6(b) を比較すると、比較的危険な状況となる、車間距離が短く、相対速度が接近方向に大きい領域 (図 6(b) 中の緑破線) のデータを減少できていることが確認でき、提案手法の有効性が確認された。一方で、①の手法は最適化問題における大域的な最適解を導出可能であるものの、問題を混合整数線形計画問題として定式化して



いるため、その計算コストの高さが問題となり、計算精度を向上させることが困難であった。そこで②では、観測したドライバの運転行動を PrARX モデルとして表現することで、支援量の最適化問題を非線形最適制御問題として定式化した。非線形最適制御問題に対する実時間解法は様々提案されているが、本研究では、ホモトピーという概念に基づいて非線形最適制御問題の高速計算可能とする、連続変形法に基づく手法を適用した。本手法は制御対象が連続(微分可能)なシステムである必要があり、PWARX モデルに代表されるハイブリッドシステムモデルは適用することが出来ない。本研究で新たに提案した PrARX モデルは微分可能なモデルであり、上記の手法に組み入れる事が可能となる。まず、状態を下記のように定義する。

$$x = \{D(t), Vr(t), y(t)\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $D(t)$ 、 $Vr(t)$ 、 $y(t)$  はそれぞれ車間距離、相対速度、ドライバモデルの出力である。ただし、本問題ではこれらの変数はすべて連続時間の変数である。ここで、制御対象の状態方程式は、

$$\dot{x} = \begin{Bmatrix} Vr^*(t) \\ a - (y^*(t) + u(t)) \\ (y^*(t + \tau) - y^*(t)) / \tau \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

と書ける。ここで、 $a$  は前方走行車の加速度であり、前方車の速度を線形予測するために用いる。式(8)の第3行は PrARX モデルの出力の微分を与えている。評価関数としては、下記の  $J_c$  を与えた。

$$J_c = \int_0^{T_f} \{ (x(t) - x_0)^T Q (x(t) - x_0) + u(t)^T R u(t) \} dt \dots\dots (9) + (x(T_f) - x_0)^T S_f (x(T_f) - x_0)$$

ここで  $Q$ 、 $R$ 、 $S_f$  は評価関数内のそれぞれ状態と目標状態との誤差、入力、最終状態に関する重み係数行列である。式(9)は入力を小さく抑えつつ、状態を目標状態に速やかに漸近させることを目的とした評価関数である。なお、目標状態は試行錯誤的に  $x_0 = \{30[m], 0[m/s], 0[m/s^2]\}$  とした。

本研究では、ドライビングシミュレータを用いた前方車の追従走行において、上記の問題に連続変形法を適用したモデル予測型非線形最適制御による追従支援を試みた。ドライビングシミュレータ上で、人間のドライバが運転しつつ支援を適用した走行結果を図7に示す。

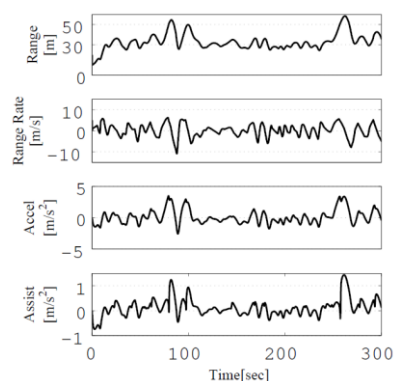


図7 連続変形法に基づく支援を適用した前方車追従走行データ

図7中には、横軸が時間、縦軸が上から順に車間距離、相対速度、自車加速度、計算された支援量が示されている。全体として目標状態である車間距離 30[m]、相対速度 0[m/s] を維持できており、前方車が加減速を頻繁に行っているにも関わらず、速やかに目標状態に追従できている事が確認でき、判断共有型支援系の有効性が確認された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- ① H. Okuda, N. Ikami, T. Suzuki, Y. Tazaki, K. Takeda, Modeling and Analysis of Driving Behavior Based on a Probability-Weighted ARX Model, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 査読有, pp. 98-112, Vol. 14, No. 1, 2013
- ② K. Takeda, C. Miyajima, T. Suzuki, P. Angkititrakul, K. Kurumida, Y. Kuroyanagi, H. Ishikawa, R. Terashima, T. Wakita, M. Oikawa and Y. Komada, SelfCoaching System Based on Recorded Driving Data: Learning From One's Experiences, IEEE Trans. On Intelligent Transportation Systems, 査読有, pp. 1821-1831, Vol. 13, No. 4, 2012
- ③ 山口拓真, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 分散型故障診断におけるアークの重要度指標を用いた Bayesian Network の構造構築 計測自動学会論文集、査読有, Vol. 48, No. 11, pp. 705-712, 2012
- ④ 項警宇, 田崎勇二, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 未知環境下の移動ロボットによる可変分解能グラフ地図の自律生成, 電気学会論文誌D分冊、査読有, Vol. 132, No. 8, pp. 808-816, 2012
- ⑤ S. Takahashi, R. Kawauchi, S. Takashima, S. Den, T. Katagiri, H.

- Kano, T. Ohta, M. Ito, T. Suzuki, K. Takeda and M. Hori, An Autonomously Controllable Plasma Etching System Based on Radical Monitoring, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 51 (2012) 076502
- ⑥ D. Zhang, S. Inagaki, T. Suzuki, N. Kanada, Online Signature Verification System for Kaisyo Script Based on Structured Learning and Segmentation of HMM, SICE Journal of Control, 査読有, Measurement, and System Integration, Vol. 4, No. 6, pp. 401-409, 2011
- ⑦ 稲垣伸吉, 丹羽智哉, 鈴木達也, 受動体節間関節を持つムカデ型多脚歩行ロボットの接地点追従法による分散歩行制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 47, No. 6, pp. 282-290, 2011
- ⑧ 勝洋明, 高橋徹, 奥田裕之, 鈴木達也, 筋電位を用いた離散的/連続的意図推定に基づく協調持ち上げシステムの実現, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 77, No. 776, pp. 274-284, 2011.
- ⑨ 三上晃司, 奥田裕之, 鈴木達也, 田崎勇一, 伊佐治和美, 津留直彦, ハイブリッドシステム論による前方車追従行動におけるモデル予測型アシスト制御の実現, 計測自動制御学会産業論文集, 査読有, Vol. 9, No. 5, pp. 29-36, 2010.

[学会発表] (計 20 件)

- ① Y. Kondo, H. Okuda, Y. Tazaki, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Owada, Evaluation of Decision-Making Ability in Car Driving while Operating Interior Devices Based on Probability-Weighted ARX Models, 19th ITS World Congress, 査読有, 2012. 10. 22-26, Wien, Austria
- ② N. Noto, H. Okuda, Y. Tazaki, T. Suzuki, Steering Assisting System for Obstacle Avoidance Based on Personalized Potential Field, 15th Int' l IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, 査読有, pp. 1702-1707, 2012. 9. 16-19, Anchorage, USA
- ③ H. Okuda, K. Mikami, Y. Tazaki, T. Suzuki, N. Tsuru and K. Isaji, A Unified Assisting System for Longitudinal Driving Behavior Based on Model Predictive Control, 2011 IEEE Int' l Conf. on Vehicular Electronics and Safety, 査読有, pp. 199-204, 2011. 7. 10-12, Beijing, China
- ④ N. Ikami, H. Okuda, Y. Tazaki, T.

Suzuki, K. Takeda, Online Parameter Estimation of Driving Behavior Using Probability-Weighted ARX Models, 14th Int' l IEEE Annual Conf. on Intelligent Transportation Systems, 査読有, FA8.1, pp. 1874-1879, 2011. 10. 5-7, Washington DC, USA

- ⑤ R. Terada, H. Okuda, T. Suzuki, K. Isaji, N. Tsuru, Multi-Scale Driving Behavior Modeling using Hierarchical PWARX Model, 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 査読有, 2010. 9. 19-22, Madeira Island, Portugal
- ⑥ K. Mikami, H. Okuda, S. Taguchi, Y. Tazaki and T. Suzuki, Model Predictive Assisting Control of Vehicle Following Task Based on Driver Model, 2010 IEEE Int' l Conf. on Control Applications, Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 査読有, pp. 890-895, 2010. 9. 8-10, Yokohama
- ⑦ J. Xiang, Y. Tazaki, S. Inagaki and T. Suzuki, Variable-resolution Map Building and Real-time Path Planning of Omni-directional Mobile Robots, 2010 IEEE Int' l Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 3014-3019, 2010. 5. 3-8, Anchorage, Alaska

[図書] (計 1 件)

- ① H. Okuda, A. Nakano, T. Suzuki, S. Hayakawa, S. Inagaki, Multilayer Modeling of Driver Behavior Based on Hierarchical Mode Segmentation, Digital Signal Processing for In-Vehicle Systems and Safety, Springer, pp. 57-72, 2012

[産業財産権] 該当なし

[その他] 該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木達也 (SUZUKI TATSUYA)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 50235967

### (2) 研究分担者

稲垣伸吉 (INAGAKI SHINKICHI)  
名古屋大学・工学研究科・講師  
研究者番号: 80362276

### (3) 連携研究者

田崎勇一 (TAZAKI YUICHI)  
名古屋大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 10547433