

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360114
 研究課題名（和文） 連続・離散ハイブリッドシステムモデルに基づく行動解析
 研究課題名（英文） Behavior Analysis based on Hybrid System Modeling

研究代表者
 鈴木 達也（Tatsuya Suzuki）
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：50235967

研究成果の概要： 本研究では**連続・離散ハイブリッドシステム理論**に基づいた比較的汎用性の高い統一的な判断・動作（操作）系のモデル化手法を提案し、その有用性を立証した。一連の研究成果の特徴は、観測データのみから判断と動作（操作）の混在した人間行動のハイブリッドシステムモデルを推定、構築している点であり、特に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る。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2008年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード： 人間機械システム・判断特性・動作特性・ハイブリッドシステム

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、人間行動を機械がアシストする人間機械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（図1）、これまで実現された人間機械系においては、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、人間と機械系が、「認知」「判断」「動作」の各フェーズで同時

かつ複合的なインタラクションを有するような人間機械系の設計・実現は現状ではほとんど手がついておらず、何らかのブレークスルーが強く望まれている。高次インタラクションを伴う人間機械系を設計・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る。自動車運転などにおいては、フェーズごとに様々な支援装置が開発されているが、各フェーズ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る。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発生することも多い。すなわち、**現状の取り組みはそのほとんどが対症療法的なアプローチであり、軸となる基礎概念が著しく欠如している**。また少し範囲を広げ、人間と機械の協調行動の実現、あるいはそのためのインターフェースの設計という観点から眺めた場合、その多くは人間行動における動特性（ダイナミクス）を明示的に扱いきれておらず、主に人間行動の静特性に着目した情報処理系の高機能化の視点から問題を捉える場合が多い。しかしながら、人間行動においてその挙動を静的な現象として捉える範囲は極めて限定的であり、人間行動の背後に潜む動特性を明示的に捉えることで、従来にはない革新的な人間機械系の創出につながると考えられる。

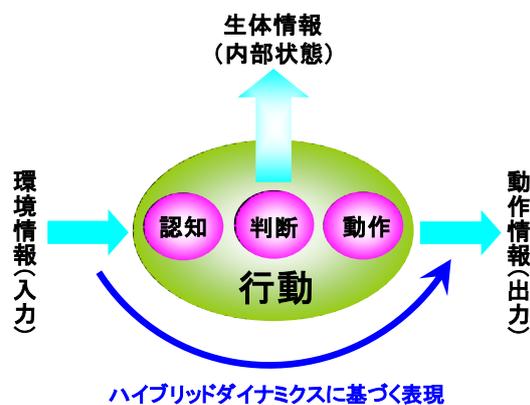


図 1 人間行動

2. 研究の目的

「認知」・「判断」・「動作」の各フェーズの数理モデル化を考える場合、まず認知フェーズに関しては、環境情報が多種多様であり、汎用性の高いモデル構築は现阶段では残念ながら困難と思われる。結果として個別の状況に応じたモデル構築を考える必要がある。次に、**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、上述の高次のインタラクションを構築するためには、両者を個別に独立した機能としてモデル化するのは不十分であり、何らかの統一的な数理表現を導く方策が不可欠である。この点を踏まえて、本研究では第一に**連続・離散ハイブリッドシステム理論**に基づいた比較的汎用性の高い統一的な判断・動作（操作）系のモデル化手法を提案し、その有用性を立証する（図 2）。ハイブリッドシステム論に対する関心はここ数年、制御工学や計算機科学の分野において急速に高まってきている。これらは、従来対象としていた範疇に収まりきれない困難な問題の解決を目指す試みの一つとみなすことができ、両分野において大きなブレークスルーをもたらす学術体系になり得ると期待されている。本提案手法の最大の特徴は、観測データのみから判断と動作（操作）の混在した人間行動のハイブリッドシステムモデルを推定、構築する点である。特に、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、高次インタラクションを伴う人間機械系の設計において重要な役割を果たすと期待できる。

第二に本研究では、得られた行動のハイブリッドモデルに立脚してアシストを行う行

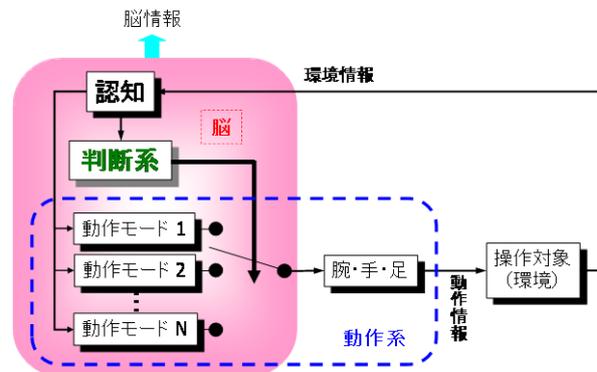


図 2 行動のハイブリッドシステム表現

動支援器を設計する。これにより、個人の判断特性や動作特性に応じた行動支援器の実現が可能となり、高次のインタラクションを伴う人間機械系の設計論の体系化へとつなげていく。

3. 研究の方法



図 3 ドライビングシミュレータ

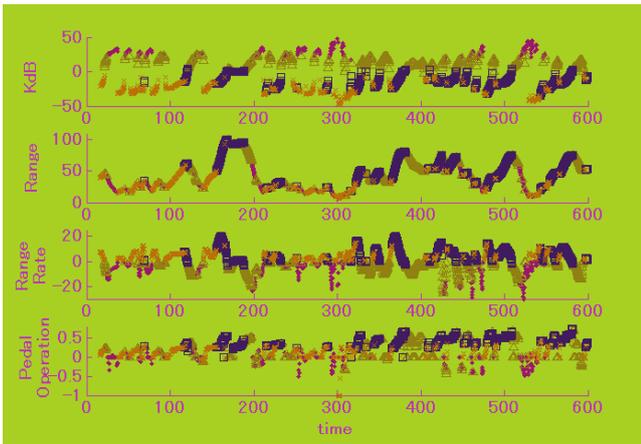


図 4 観測された運転データ

(1) 行動データの観測 **自動車とロボットの操作**を通して具体的な行動データを収集し、提案手法を適用して動作と判断の混在した行動モデルを提案する。自動車の運転行動データに関しては、応募者の研究室で開発した立体視情報提示型のドライビングシミュレータ (DS) を用いる。DS による高速道路路上での前方車追従走行実験の様子を **図 3** に示す。また、観測されたデータの一例を **図 4** に示す。

(2) 新たな行動モデルの提案 モード遷移条件、すなわち判断特性をロジスティック回帰モデルで表す新たな行動モデルを構築し、そのパラメータ推定アルゴリズムを導出する。これにより、人間の判断特性の定量的評価が可能となり、各個人の判断特性を考慮した行動支援が可能となる。

(3) アシスト系の実験的検証 データとパラメータ推定により得られた動作・判断混在型の行動モデルに基づいて行動支援器を実現し、DS 上に実装してその有用性を検証する。

4. 研究成果

本研究ではドライバの前方車追従運転をモデル化するために、ドライバの知覚情報 (入力) として次の三つを定義する。

- 接近離間状態指標 (KdB) x_1
- 自車と前方車との車間距離 x_2
- 自車から見た前方車の相対速度 x_3

ここで KdB とは、ドライバが前方車を注視している時に、ドライバの網膜に映る前方車の背面積の変化率を定量化した量である。また、ドライバの操作量 (出力) として

ペダル操作量 y

を定義する。ただし、アクセルを踏む時を正、

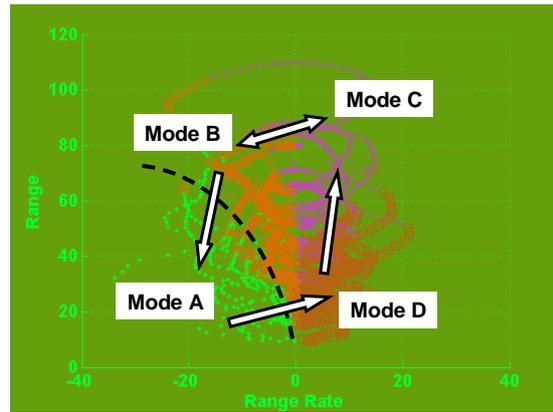


図 5 運転データのモード分割結果

ブレーキを踏む時を負の値とする。

本研究では、ドライバは走行中に複数の操作モードを、判断に基づいて適切に切り替えながら前方車に追従すると考える。このような操作特性を表現するためには、いくつかの異なる入出力関係 (操作モード) を内包する表現形式を採用する必要がある。このような表現形式の一つとして以下に示すような PieceWise Affine AutoRegressive eXogenous(PWARX)モデルを用いる。

$$y_{k+1} = \begin{cases} a_1 x_{1,k} + b_1 x_{2,k} + c_1 x_{3,k} + d_1 y_k & \text{if } x_k \in C_1 \\ a_2 x_{1,k} + b_2 x_{2,k} + c_2 x_{3,k} + d_2 y_k & \text{if } x_k \in C_2 \\ \vdots & \\ a_N x_{1,k} + b_N x_{2,k} + c_N x_{3,k} + d_N y_k & \text{if } x_k \in C_N \end{cases}$$

ここで、添字 k は時系列データの番号を表している。 $x_k = (x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k})$ であり、 C_1, \dots, C_N は各モードにおける入力の部分空間を表している。また、 a_i, b_i, c_i, d_i ($i = 1, \dots, N$) は未知パラメータであり、 C_1, \dots, C_N も未知である。PWARX モデルでは、観測データに基づいてこれらの未知パラメータを推定する必要があるが、各モード間の境界が未知、すなわち C_1, \dots, C_N も未知である点が、通常の線形系に対するパラメータ推定問題と大きく異なっている点である。

本研究では、上述の未知パラメータを推定するためにデータクラスタリング手法を用いた。前方車追従時の走行データをクラスタリングした例を図5に示す。図5は、高速道路走行時のデータ分布であり、縦軸は前方車との車間距離、横軸は相対速度を表す。この結果より、ドライバは4つの動作制御モード（Mode A～D）を巧みに切り替えながら追従運転行動を実現していることがわかり、各モード間の遷移条件（ドライバの判断条件に相当：一例を点線で示す）や各モードでの動作制御則を推定することができる。推定された被験者2名分の各モードの動作パラメータを表1に示す。これより、各モードの意味は以下のように解釈できる。

Mode A（危険回避）

Mode Aは車間距離が小さく、相対速度が負の領域を占めている。これは前方車が至近距離で自車に近づいてくることを意味しており、最も危険なモードであると言える。a, b, cの値を他のモードと比べた場合、Mode Aにおいては全体的にパラメータの絶対値が大きく、ドライバが最も積極的な制御を行っているモードと解釈できる。また、他のモードと比べてパラメータの中でも特にbが大きくなる傾向にある。これは、このモードではドライバが車間距離を意識しながら回避制御を行っていることを示している。さらには、dの値を見ると他のモードよりも小さな値を取っている。これはdが再帰項の係数を表していることから、Mode Aにおけるドライバの操作特性が他のモードよりも速い動特性を有していることを表しており、危険回避モードにおける興味深い特徴の一つと言える。

表1 推定されたARXパラメータ

Driver	Mode	A	b	c	d
I	A	-0.038	0.125	0.113	0.730
	B	-0.002	0.015	0.033	0.908
	C	0.027	0.021	0.085	0.940
	D	-0.015	-0.057	0.248	0.900
II	A	-0.060	0.295	0.222	0.769
	B	0.005	0.016	0.028	0.941
	C	-0.017	0.006	0.014	0.986
	D	-0.009	0.031	0.056	0.916

Mode B（回避準備）

Mode Bは、車間距離が大きく、相対速度が負の領域を占めており、相対速度に対するパラメータcがaやbに比べて大きいことから、

前方車との相対速度を意識しながら接近しているモードと言える。ただし、パラメータの絶対値は全体的に小さい傾向にある。

Mode C（加速追従）

Mode Cは、車間距離が大きく、相対速度は主に正の領域を占めている。この領域は遠距離でさらに前方車が離れていく領域であることから、前方車追従というタスクにおいては最も安全な領域と言える。また、パラメータの傾向も個人差が大きく、運転操作において多くの自由度を有しているモードと考えられる。

Mode D（回避直後）

Mode Dは、車間距離が小さく、相対速度が正の領域を占めており、このモードはMode A（危険回避）の後に頻繁に現れる。このモードでは、パラメータcの絶対値が大きく傾向にあることから前方車との相対速度を意識しながら車間距離を広げるよう操作していると解釈できる。

また、Support Vector Machine (SVM) を適用することでモード間の分離面を推定することができる。典型的なモード間の遷移が図4中に矢印で示してあるが、通常はMode B、C間を行き来しているのに対し、前方車が減速し、危険な領域であるMode Aに入ったと判断すると、それを回避する制御則に切り替え、その後Mode Dを経てMode Cに復帰する。ハイブリッドシステム論を行動解析に導入する最大の利点は、このようなモード分割およびモード間の遷移条件（判断条件）を先

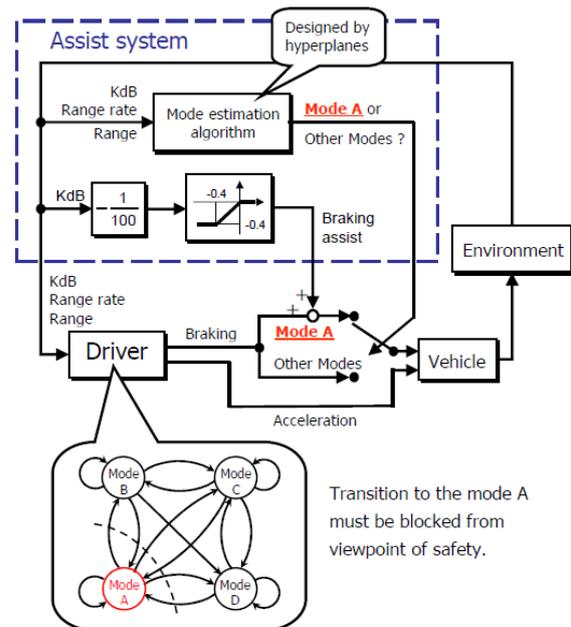


図6 運転アシスト系の構成

験的知識無しに観測データに内在する動的な特徴のみから抽出可能な点である。

安全性を確保するためには、クラスタリングによって得られた Mode A (危険回避) の滞留時間を減らすことが重要となる。つまり、Mode A を避ける様なアシストシステムの構築が求められる。本研究では同定された PWARX モデルに基づいて、**図 6** のブロック図で示されるブレーキアシストシステム (ドライバ・自動車・環境含む) を提案した。本システムの特徴はブレーキアシストの ON/OFF 条件が各ドライバの Mode A (危険回避モード) への遷移条件により規定されている点であり、この点が他の既存のアシストシステムと根本的に異なる点である。危険回避モードに遷移したかどうかの判断は各ドライバによって異なると考えるのが自然であり、ドライバ毎にアシストの ON/OFF 条件を設計する事で、各ドライバの判断特性における個人性を考慮した安全性の確保が可能となる。また、結果としてアシストブレーキに対してドライバが抱く違和感を低減することが可能になると期待できる。本アシストシステムでは、具体的には、ドライバが (1) Mode A に滞在し、かつ(2)アクセルを離している時、の両条件を満たした時のみ、アシストブレーキがペダル操作量に加えられるア

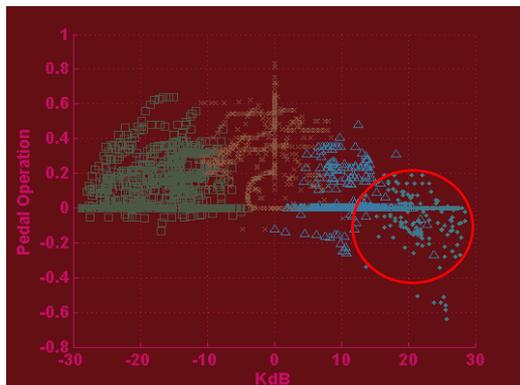


図 8 アシスト無し時のデータ

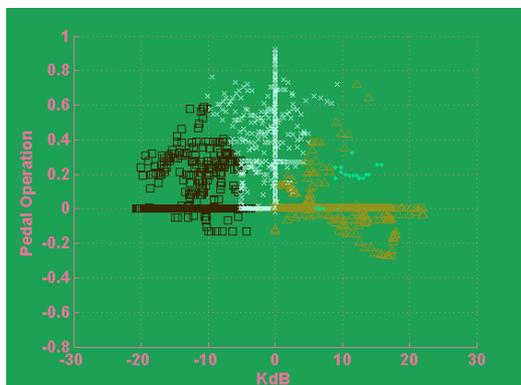


図 7 アシスト有り時のデータ

シストとし、実際に加えられるアシストブレ

ーキ量は $-x_j \times 0.01$ とした。なお、このアシストブレーキはドライバがブレーキもアクセルも踏んでいない状態、すなわちエンジンブレーキのみで走行している状態であっても (Mode A ならば) 加えられる。ブレーキアシスト実験は 4 名に対して行った。ある被験者のアシストの効果を図 7 (アシスト無し) 図 8 (アシスト有り) に示す。図 7 において円で囲ったデータ点 (Mode A) が図 8 ではほとんど見られなくなっていることがわかる。これはブレーキアシストにより Mode A での滞留時間が減少した事を示している。別のドライバは、アシストを入れた後はほとんどブレーキ操作を行わなくなっており、アシストブレーキのみで危険回避を行っていることになる。このことはドライバに対してエンジンブレーキの効きが強くなった感覚をアシストにより提供したことを意味する。本アシストシステムに対して 4 名のドライバのうち 3 名は違和感を覚えないと回答したが、アシストへの依存に関する安全面からの考察が今後必要になるであろう。

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 11 件)

1. Design of Autonomous/Man-Machine Cooperative Mobile Robot, S.Inagaki, T.Ito, T.Suzuki, W.Shidan, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.21, No.2, pp.252-259, 2009, 査読有
2. モード分割に基づく前方車追従行動のモデル化とアシスト系設計への応用, 鈴木達也, 秋田敏和, 中野暁斗, 早川聡一郎, 稲垣伸吉, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.2, pp.511-517, 2009, 査読有
3. ハイブリッドシステムと高次モーション, 鈴木達也, 電気学会論文誌 D, Vol. 128, No. 6, pp. 819-825, 2008, 査読有
4. 人間行動のハイブリッドシステムモデルに基づいた人間-機械協調型ロボットシステム, 奥田裕之, 早川聡一郎, 鈴木達也, 土田縫夫, 電気学会論文誌 D, Vol. 128, No. 6, pp. 810-818, 2008, 査読有
5. 運転行動における判断の定量化とそれに基づく行動特性解析, 田口峻, 稲垣伸吉(2), 鈴木達也(3), 他 3 名, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 44 No.3, pp. 269-277, 2008, 査読有
6. FMS scheduling based on timed Petri Net model and reactive graph search, Y. W. Kim, T.Suzuki, and T.Narikiyo, Applied Mathematical Modelling Vol. 31 pp. 955-970, 2007, 査読有

7. Modeling and Recognition of Driving Behavior based on Stochastic Switched ARX model, S.Sekizawa, S.Inagaki(2), T.Suzuki(3), 他 4 名, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 593-606, 2007, 査読有
8. Bayesian Network を用いた事象駆動型システムの分散型故障診断, 齋藤光生, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 青木猛, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 11, pp. 1065-1073, 2007, 査読有
9. Fault Detection and Diagnosis of Manipulator Based on Probabilistic Production Rule, S.Inagaki, K.Hayashi, T.Suzuki, IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E90-A, No.11, pp. 2488-2495, 2007, 査読有
10. システムのモデル化: 離散事象システム (解説記事), 高井重昌, 鈴木達也, 測と制御, Vol.46, No.4, pp.248-254, 2007, 査読有
11. 時間付きマルコフモデルを用いた事象駆動型システムの故障診断(解説記事), 稲垣伸吉, 鈴木達也, システム/制御/情報, Vol. 51, No. 12, pp. 539-544, 2007, 査読有

[学会発表] (計 約 30 件)

1. Modeling and Analysis of Human Behavior based on Hybrid System Model, T.Suzuki, T.Akita, S.Inagaki, S.Hayakawa, N.Tuchida, Int. Symposium on Advanced Vehicle Control, pp. 614-619, 2008/10/9, 査読有
2. Analysis and Synthesis of Driving Behavior based on Mode Segmentation, T.Akita, T.Suzuki, S.Hayakawa, S.Inagaki, Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems, pp.2884-2889, 2008/10/17, 査読有 **【Outstanding Paper Award】**
3. Modeling and Analysis of Peg-in-Hole Task Based on Mode Segmentation, H.Okuda, H.Takeuchi, S.Inagaki, T.Suzuki, SICE Annual Conference, pp. 1595-1600, 2008/8/8, 査読有
4. On-Line Fault Inference for Large-Scale Event-Driven Systems based on Bayesian Network and Timed Markov Model, S.Inagaki, H.Ogawa, T.Suzuki, Proc. of IFAC World Congress, pp. 6548-6553, 2008/7/8, 査読有
5. Modeling of Human Behavior in Man-Machine Cooperative System Based on

- Hybrid System Framework, H.Okuda, S.Hayakawa, T.Suzuki, N.Tsuchida, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2534-2539, 2007/4/12, 査読有
6. Local/Global Fault Diagnosis of Event-Driven Controlled Systems based on Probabilistic Inference, S.Inagaki, T.Suzuki, M.Saito, T. Aoki, Proc. of IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2633-2638, 2007/12/13, 査読有
7. Stochastic Modeling and Analysis of Drivers' Decision Making, S. Taguchi, S. Sekizawa, S. Inagaki, T. Suzuki, S. Hayakawa, N.Tsuchida, IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 587-592, 2007/10/8, 査読有
8. Analysis of Vehicle Following Behavior of Human Driver Based on Hybrid Dynamical System Model, T.Akita, S.Inagaki, T.Suzuki, S.Hayakawa, N.Tsuchida, IEEE Multi conference on Systems and Control, pp. 1233-1238, 2007/10/3, 査読有

○出願状況 (計 2 件)

名称: ドライバ状態推定装置およびプログラム

発明者: 鈴木達也, 秋田敏和, 寺寫立太, 脇田敏裕

権利者: 株式会社豊田中央研究所

種類:

番号: 特願 2007-334447, 特願 2007-334448 (同一名称で 2 件)

出願年月日: 2007 年

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 達也 (SUZUKI TATSUYA)

名古屋大学・大学院工学研究科・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・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 80362276