

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05854

研究課題名(和文) 個別適合ハプティックシェアードコントロールによる知能化運転支援システムの基盤構築

研究課題名(英文) Intelligent Driver Assistance System by Using Individual Adaptation of Haptic Shared Control

研究代表者

ポンサトーン ラクシンチャラーン (Raksincharoensak, Pongsathorn)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30397012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では自動車運転時に、危険度が高まってドライバ自身の運転成績が低下した際に、自律的に安全運転を支援する操作制御系を開発することを目的とする。先読み運転シナリオの解析では、かもしれない運転が必要な走行シーンについて経路計画アルゴリズムを検討した。前後・左右の2次元リスクポテンシャル場の定式化とリスク指標によるポテンシャル場の設定を提案した。カーブ走行場面では加減速と操舵が連係する運転モデルを構築した。熟練ドライバの操作データと比較し、運転者を支援する運動制御システムの有効性を検証した。走行実験は、ドライビングシミュレータで個別適合運転支援システムの設計要件とその方策をまとめた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to construct a shared control system in ADAS to assist the driver in improving his/her driving performance by using haptic interface. In Risky driving situation, the driving risk potential is defined and used for the path planning of the vehicle. We have investigated the reference driver model which calculates the steering wheel angle and longitudinal acceleration command simultaneously. To design the share rate of human and machine from the viewpoint of vehicle dynamics, the assist torque gains which express the intensity of the assist torque are theoretically determined. The major understandings from the experimental results can be summarized as follows. The proposed control system results in better stabilization of the driving route by the driver, and the resulting steering angle input becomes smoother. It is observed that the unsteadily oscillatory motion of the vehicle with respect to the target path is reduced by introducing the longitudinal speed control.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：運動力学 運転支援 予防安全 人間機械協調

1. 研究開始当初の背景

日本の交通事故死者数は平成 26 年になり 4500 名以下で減少傾向にあるものの、交通事故件数は年間 80 万件程度とさらに増加傾向を示している。また、70 歳以上の高齢者の運転免許保有者数は年々増加しており、自動車を運転して活発に外出する高齢者も少なくない。こうした中で、認知・判断・操作能力が衰えている高齢運転者が全体の交通事故件数を押し上げる懸念がある。高齢化による交通安全の問題は、先進諸国に留まらず、今後急激に自動車の普及が進む新興国でも同様な傾向にある。日本は課題解決先進国として、科学的アプローチを提示する責務があり、本研究の意義が高い。

最近では、衝突回避自動ブレーキが実用化されているが、事故・ヒヤリハットデータを分析した結果、遮蔽物から歩行者や障害物などが出現する場合は、現行のシステムでは限界がある。欧州の運転支援プロジェクト InteractiVe や PRORETA などでは、制御介入を積極的に利用し、人間・機械複合系としての事故回避性能向上を検討しているが、緊急回避時の性能向上のみに着目している。一方、申請者は、危険度が顕在化する前の状況において、熟練者の上手い運転を内蔵した運転支援という概念で高齢者の運転を積極的に支援する操舵制御、ブレーキ制御システムを開発してきた。熟練運転者の行動計画では、リスクポテンシャルという新たな概念で危険予測運転を数式モデルで記述することにより、複雑な市街地走行環境において合理的な運転支援を設計し、実車とシミュレータでその有効性と事故回避性能への向上効果を検証してきた。したがって、熟練者のような運転知能を運転支援に組み込む必要があるとの知見を得ている。

しかしながら、危険度が顕在化する前に作動する運転支援システムは、事故回避性能が向上する一方、ドライバによっては操作意図と干渉する場合があります。すべてのドライバに受け入れられるシステムとは言えない。この受容性問題の解決には、過去のドライバ個人の運転特性を把握し、個人の特性モデルに適合した個別適合支援を行うことが有効である。

そこで本研究では、事故回避性能と人間・機械系の協調性の向上を両立するため、従来の強制介入ではなく協調制御型運転支援システムの基盤構築を確立することを目指す。各種操作系におけるドライバと機械との干渉を最小化するため、力提示による協調制御 (Shared control) の新しい概念を導入する。本研究課題は、制御目標である熟練ドライバの規範的な行動に近づかせるためには、どのように個人の運転特性に合わせて支援レベルを能動的に変化すればいいかというアクティブ運転インタフェース (Active Driving Interface) の設計指針を得ようとしているものである。

2. 研究の目的

本研究期間内は、以下の研究課題を明らかにすることを目的とする。

(1) 先読み運転シナリオの解析・整理：市街地環境における危険な先読み運転が必要なシーンを市街地走行データから抽出し、熟練ドライバモデルを実データに基づき構築する。また、操舵と加減速が連係する走行シーンにおいて、規範運転ドライバモデルを提案する。

(2) 操作反力制御系の設計：ペダルとステアリングの触覚的な反力制御系を施し、運転支援の有無による人間・機械閉ループ系の安定限界を明らかにする。

(3) 協調制御型支援システムの設計：熟練ドライバの規範運転と実ドライバの運転と差に基づいて、状況に応じて操作支援をするアクティブインタフェース設計指針を明確にする。また、ドライバ・車両の走行特性を考慮して、合理的に操舵支援量を決定する設計指針を提案する。

これらの技術課題を明らかにすることにより、高度運転支援システムの適応型アクティブインタフェースの設計問題を解決し、受容性の高い運転支援システムの設計基盤を確立する。

3. 研究の方法

1. 先読み運転シナリオの解析

公道走行実験において熟練運転者の実路運転行動データベースを構築する。環境・車両運動・運転操作・視線行動を計測可能な高機能ドライブレコーダを構築し、そのドライブレコーダを備えた実験車両を製作し、大学周辺の市街路走行データを収集し、先読み運転支援が必要なシーンを選別し、そのシーンにおける規範ドライバの運転をモデル化し、特性パラメータ抽出を行う。カーブ走行場面では、加減速と操舵のタイミングと強さに着目して分析する。

2. 操作反力制御系の設計

走行状況に応じた安全な速度及び経路に追従するためのペダル・操舵反力制御系を構築する。ドライビングシミュレータにおいて図 4 に示すような操作反力発生機構と制御系を設計する。また、人間・機械協調系の観点から、制御工学の観点からドライバの特性パラメータと機械の反力制御パラメータとの関係を解析する。

3. 個別適合型操作支援アルゴリズムの開発

個人の通常運転特性に適合した運転支援の基盤構築を行う。具体的には熟練ドライバの規範運転特性と運転者の行動特性 (現在の運転状態、運転能力低下の度合いなど) との差を観察し、その差に基づきペダル反力および操舵反力の介入レベルを決定し、あたかも熟

練ドライバのように走行しているように人間・自動車閉ループ系の協調制御(Shared Control)を行う。実験では、連続的な運転場面と緊急回避場面のシーンで実施する。ここで重要な点は、ドライバがオーバーライドできるように操作反力を適応的に可変させる制御系設計である。走行実験は、ドライビングシミュレータおよび実験車両で基盤技術の開発を行い、個別適合運転支援システムの設計要件とその方策をまとめる。

4. 研究成果

ドライブレコーダで計測された走行データを分析し、先読み運転すなわちリスク予測が必要なシーン(駐車車両回避、見通しの悪い無信号交差点での減速、自転車追い越しにおける操舵・減速の複合回避)を図1に示す。駐車車両や交差点の角の陰から移動物体の飛び出しの予測が必要で、十分な側方間隔を取りながら速度を落とす必要があり、複合的な操舵・減速の操作を行う。前方に同方向に走行している自転車が進路変更して走行レーンに飛び出してくる可能性があるため、その最悪ケースに備えて、「かもしれないブレーキ」を行い十分に止まれる速度で追い越し、十分な側方間隔を取る必要がある。

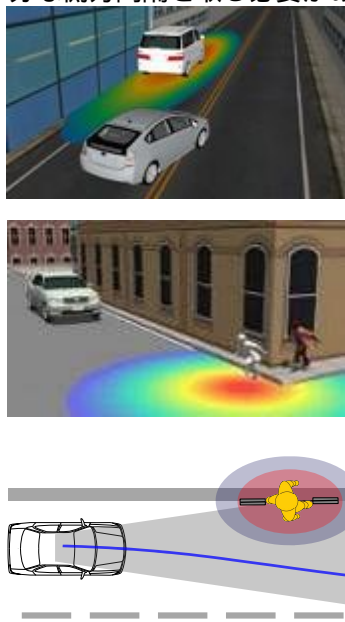


Fig.1 Scenes which need risk prediction

また、カーブ走行時において、スムーズにカーブ通過することを支援するシステムを考える。カーブ経路に沿って走行する操舵モデルに加えて、スムーズに加減速度を操舵と関係してコントロールする加減速モデルを構築する。

運転支援の内部に内蔵されたドライバモデルについて説明する。 T_{ps} 秒後に自車両が目標経路上に存在するような規範経路は式(1)のように導出することができる。

$$\kappa^*(t) = \frac{2\alpha}{T_{ps}^2 u^2} \{y^* - [y_c(t) + T_{ps} \dot{y}_c(t)]\} \quad (1)$$

ここで、目標経路に対する走行経路の振動成分を無くしたい特性方程式から減衰比 $\zeta=1$ とすると、 $\alpha=2$ となる。ただし、 κ^* は目標曲率、{}内の項は目標車線に対する前方一次横偏差である。

次に操舵の逆動力学モデルについて述べる。経路計画で得られた目標曲率を用い規範操舵角を算出する。等価二輪モデルより横加速度に対する操舵角の伝達関数は式(2)のように導出することができる。

$$\delta_{sw}(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \frac{nl(1 + Au^2)}{u^2} \ddot{y}_c(s) \quad (2)$$

ただし、 a_i, b_i は車両の動特性を表す伝達関数の係数、 n はステアリングギア比、 l はホイールベース、 A は車両のスタビリティファクタである。

車両運動力学モデルから、規範操舵角を式(3)で算出できる。

$$\delta_{sw}^*(t) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} nl(1 + Au^2) \kappa^*(t) \quad (3)$$

なお、式(9)は操舵角に対する横力発生が遅れを考慮した位相進み補償を内包している。ただし、DS実験においては操舵角に対する横力発生が遅れを考慮していない。

次に加減速モデルについて述べる。曲線路走行場面において、加減速度指令値を式(4)のように定義する。式(1)で導出された目標曲率を指令値として用いることで、前後運動と横運動を同時に決定することができる。つまり、式(4)の加減速度はドライバによる運転行動の結果得られる加減速度指令値ではなく、経路計画の結果得られる、経路追従に適した加減速度指令値である。

$$a_x^*(t) = -\text{sgn}(\kappa^*(t) \cdot \dot{\kappa}^*(t)) \frac{K_G}{\tau_G s + 1} |\dot{\kappa}^*(t) u^2| \quad (4)$$

ただし、 a_x^* は加減速度指令値、 K_G は加減速ゲイン、 τ_G は一次遅れ時定数である。

本システムでは、式(3)によって算出される規範操舵角を利用し、操舵支援トルクを式(5)のように定義する。

$$T_a(t) = K_a (\delta_{sw}^*(t) - \delta_{sw}(t)) + K_b (\dot{\delta}_{sw}^*(t) - \dot{\delta}_{sw}(t)) \quad (5)$$

ただし、 K_a, K_b はそれぞれ操舵角偏差ゲインと操舵角速度偏差ゲインである。

提案する運転支援システムの有効性検証をおこなった。コース図を図2に示す。シミュレーションは制御なし、操舵支援制御、操舵支援制御と加減速制御の3条件でおこなった。ただし、カーブ進入時の車両速度は50 km/hである。

はじめに G-G diagram に着目する。G-G diagram とは車両の前後・横運動の遷移を示した図である。G-G diagram が円弧を描くように推移していることから、加減速制御により、エキスパートドライバと同様の車両の横運動に連携した加減速を実現できているとわかる。次に、道路中心との横偏差のグラフを見ると、制御なしと比較して操舵支援制御を加えることで規範ドライバモデルと同様の曲線路の内側を走行する運転へと変化していることがわかる。このことから、操舵支援制御による操舵誘導の効果が確認できる。また、加減速制御を加えることで、車両のふらつきが小さくなり、滑らかな運転を行っていることがわかる。次にドライバトルクに着目する。加減速制御によりドライバトルクが小さくなることが確認できる。これは、加減速制御により車両速度が低くなり、操舵支援トルクによる操舵負担量が増加した結果、ドライバによる操舵負担量が減少したこと起因する。また、その結果少ない操舵負担量で規範軌跡を追従でき、アシストトルクが減少している。以上より、提案する運転支援システム(操舵支援制御と加減速制御)によりドライバの運転が安全で滑らかな規範ドライバの運転に近づいていることが確認できる。また、図2のコースにおいて熟練ドライバの運転計測を実施し、規範ドライバモデルの運転との良好な定性傾向一致を確認している。

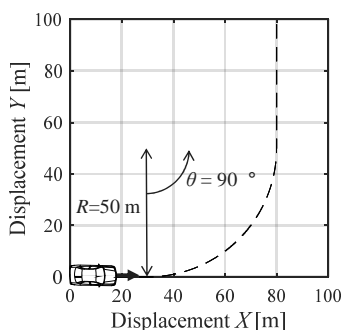


Fig.2 Simulation scenario

【DS 実験結果と考察】

簡易ドライビングシミュレータを用い、提案したシステムの有効性の検証をおこなった。実験参加者は、平均年齢 23 歳の学生ドライバ 10 名である。事前にシナリオ及び安定的に運転するための操舵支援トルクが加わることを説明した。また、走行ごとに支援の有無について説明した。また、ドライビングシミュレータへの慣れとして本番と同様のコースを複数回走行する練習走行をおこなった。また本研究では提案するシステムがドライバの操舵行動に与える影響について着目するため、ドライバによるアクセル・ブレーキ等の加減速操作は不要とした。演算周期は 0.001s である。以上の条件のもと、制御なし、操舵支援制御、操舵支援制御と加減速

制御の 3 条件で実験をおこなった。

全被験者の実験結果のうち代表例として被験者 S7 の結果を図 3 に示す。まず車両の道路中心との横偏差に着目する。道路中心との横偏差のグラフを見ると、制御なしと比較して操舵支援制御を加えることで道路中心から大きく逸脱することなく、カーブを走行していることがわかる。このことから、操舵支援制御による操舵誘導の効果が確認することができる。また、操舵支援制御により、カーブ中の車両のふらつきが低減していることがわかる。これは、操舵支援制御に加減速制御を加えた際により顕著であることが確認できる。次に、トルク入力に着目する。図 3 の下段 3 段は各条件におけるドライバトルクと操舵支援トルクの関係を示しているが、提案する運転支援システム(操舵支援制御と加減速制御)は最もトルク干渉が小さく、小さな操舵入力で運転を行うことができていると確認できる。最後に、G-G diagram に着目すると G-G diagram が円弧を描くように推移していることから、加減速制御により、エキスパートドライバと同様の車両の横運動に連携した加減速を実現できていることが確認できる。

【DS 実験結果解析】

はじめに、道路中心へのコーストレース性能及び操舵のトルク干渉について検証する。各被験者の道路中心との横偏差の RMS 値を図 4 に、ドライバトルクと操舵支援トルクの差の RMS 値を図 5 に示す。ただし、積分区間は曲線路進入の 30 m 手前から曲線路脱出の 30 m 先の地点までとした。まず、コーストレース性能について検証する。図 4 より、非制御時と比べ、操舵支援制御によりコーストレース性能が向上していることが確認できる。また、加減速制御を加えることで、コーストレース性能がより向上していることが確認できる。次に、操舵のトルク干渉について検証する。ドライバトルクと操舵支援トルクでは両者の差が小さいほど操舵支援の誘導感が小さいことを示すが、加減速制御を加えることでその誘導感が低減していることがわかる。これらの効果は、加減速制御により車両速度を下げることで、操舵負担量における機械アシストの割合が大きくなり、少ないドライバの負担で目標経路を追従できているためと考えられる。これは、加減速制御により横加速度が小さくなり、セルフライニングトルクが減少することで、より小さな入力でドライバが運転することができることに起因すると考えられる。

以上をまとめると、本研究では、曲線路走行時において逐次目標曲率生成に基づく規範操舵ドライバモデルと、その操舵行動に連携した規範加減速モデルを同時に演算可能な規範ドライバモデルを提案した。次に、人間と機械の操舵分担率に注目し、操舵支援ト

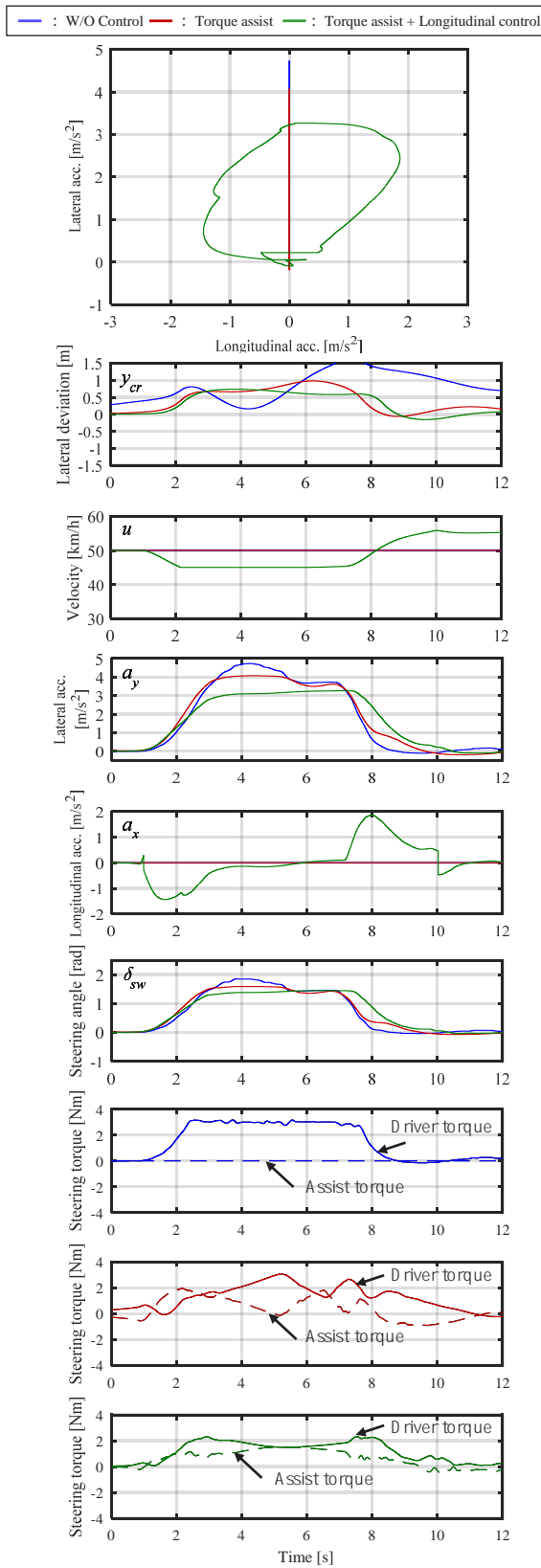


Fig. 3 Experiment result (Subject S7)

ルックの設計パラメータとして、規範舵角と角速度の偏差に対するフィードバックゲイン K_a , K_b について、2次系の力学モデルに基づき合理的にゲインの値を決定する方法を述べた。最後に、曲線路進入・脱出場面を対象に操舵支援制御と加減速制御を組み合わせたシェアード・コントロール型運転支援システムを提案し、その有効性をシミュレーション及びDS実験により検証した。

DS実験の結果、操舵支援制御によってドライバの曲線路進入・脱出時の安定性が向上し、触覚的操舵支援によりドライバの操舵角が滑らかなものへと変容することを確認した。また、加減速制御を加えることで、操舵トルク支援の強さを緩和しつつ曲線路追従成績とその安定性が確保できることを明らかにした。この実験結果から、加減速を加えることで、シェアード・コントロールの受容性向上につながる効果があると示唆される。

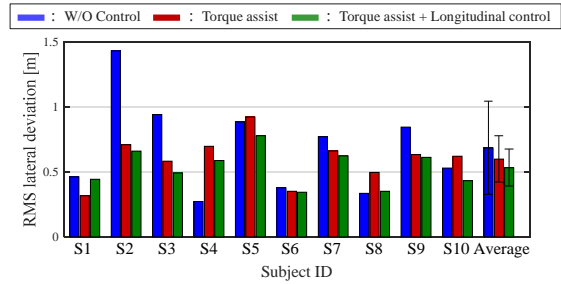


Fig. 4 Degree of course tracking performance

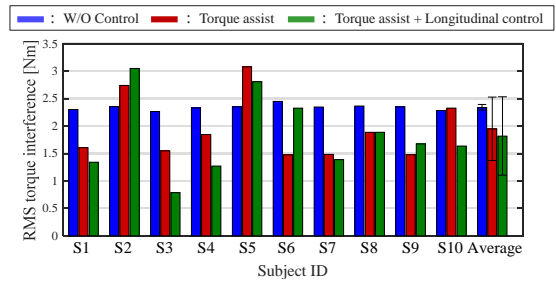


Fig. 5 Degree of torque interference

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 3 件)

- (1) Yohei Fujinami、Pongsathorn Raksincharoensak、Dirk Ulbricht and Rolf Adomat、Study on Risk Predictive Driver Assistance System for Collision Avoidance in Intersection Right Turn、Journal of Robotics and Mechatronics、Vol.30、No.1、2018、pp.5-14.
URL:
<https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot003000010015/>
doi: 10.20965/jrm.2018.p0015

- (2) 吉川尚杜、加藤篤、ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク、岡本裕之、大島康平、曾根原努、直接ヨーモーメント制御による超小型電気自動車の耐転覆性能向上に関する研究、自動車技術会論文集、Vol.48、No.2、2017、pp.363-369
URL:
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeronbun/48/2/48_20174208/article/-char/ja
<https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.48.363>

- (3) 齊藤 裕一、三本喬之、ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク、潜在リスク予測ドライバモデルに基づくブレーキ制御支援システムの設計と有効性評価、自動車技術会論文集、Vol.47、No. 6、pp.1417-1424、2016.
URL:
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaeronbun/47/6/47_20164642/article/-char/ja
<https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.47.1417>

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 相川弘幸、ポンサトーン ラクシンチャラーンサク、井上慎太郎、曲線路走行時における操舵のシェアードコントロールと加減速支援制御、第 26 回日本機械学会交通・物流部門大会、大阪、2017.
- (2) Shintaro Inoue、Toshiki Kinoshita、Masahiro Mio、Pongsathorn Raksincharoensak、Masao Nagai、Hideo Inoue、Study on Haptic Steering Shared Control between Driver and ADAS by Using Risk Potential Optimization Theory、4th International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic Accidents(FAST-zero'17).
- (3) Yuichi Saito, Takayuki Mitsumoto, Pongsathorn Raksincharoensak,

Effectiveness of a Risk Predictive Shared Steering Control Based on Potential Risk Prediction of Collision with Vulnerable Road Users, 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016, IFAC-PapersOnLine

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316320560>, Volume 49, Issue 19, 2016, Pages 84-89.

- (4) 小澤 拓巳, 井上慎太郎, 井上 秀雄, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 軌跡追従走行時における人間と運転支援系のシェアード・コントロールに関する研究, 自動制御連合講演会, 神戸.2015.11.14

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~pong>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
ポンサトーン ラクシンチャラーンサク
(RAKSINCHAROENSAK、Pongsathorn)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：30397012

- (2) 研究分担者 なし
()

研究者番号：

- (3) 連携研究者 なし
()

研究者番号：

- (4) 研究協力者 なし
()