

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01230

研究課題名(和文) 多重追突事故防止を目指す予防安全型車群制御の実現：車群走行状態推定システムの開発

研究課題名(英文) Development of Vehicle Platoon Estimation System for Mitigation of Multiple Vehicles Rear-End Collision

研究代表者

鈴木 宏典 (SUZUKI, Hironori)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：20426258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多重追突事故防止を目的とした車群制御システムの開発を行った。動的推定手法として有用性の高いUKFを用いて車群を構成する各々の車両の走行状態を推定し、この推定結果を基に、先行車の1.5s先の減速意図を予測した。予測減速意図は、ウインドシールドディスプレイを通じて後続車に伝達されることとし、被験者実験の結果、これが追突リスクの低減に極めて有用であることを示した。また、この支援の効果は後方車群にも伝播し、車群全体としての追突リスクの低減、すなわち多重追突事故防止への貢献が高いことを示唆する車群制御システムを構築することができた。

研究成果の概要(英文)：Rear-end collisions occasionally cause severe multiple-collision accidents. Avoiding the rear-end collisions is one of the critical issues since this type of collision has been the most significant factor among all types of traffic accident for many years. This research aims to develop a driver assistance system that informs the inferred intention of preceding car's deceleration behavior to the following vehicle through an interface based on a wind shield display (WSD). Assuming four vehicles forming a longitudinal platoon, a system was developed in which the deceleration intent of the 3rd vehicle is inferred and informed to the 4th vehicle driver by the WSD. A driving simulator (DS) experiment was carried out to evaluate the performance including the collision risk of the 4th vehicle with and without the system. A series of the experiments showed that the proposed system was significantly effective to mitigate the collision risk even under emergency deceleration scenarios.

研究分野：交通予防安全工学、運転支援システムの評価

キーワード：状態推定 多重追突事故防止 運転支援 アンセンティッドカルマンフィルタ パーティクルフィルタ

1. 研究開始当初の背景

(1) 計測技術の高精度化に伴い、自動車の追突事故防止や運転者の負荷軽減を目的とした運転支援システムが国内外の自動車メーカーにより開発され、一般の市販車にも普及してきた。また、多くの外界センサを利用した自動運転技術の開発も進展する中で、自動車の走行状態を把握する多くのデータが蓄積され、容易に利用できるようになってきており、この利用促進は現在でも加速的に進展している。

(2) このような背景のもと、車両1台の追突危険リスクを定量的に評価してこれを適切なインタフェースを通じてドライバに呈示し、追突を未然に防ぐ行動を促す多くの先行研究が行われていた。また、研究代表者は、多重追突事故防止の観点から、車両1台だけではなく車両複数台がまとまって追突危険リスクを低減させることが必要であるという立場を取り、「ショックウェーブの伝播抑制」という新しいアプローチで複数台の車両(以下、車群とする)の追突危険リスクを評価する手法を構築し、その妥当性を評価してきた。同時に、運転支援システムの導入によるドライバ運転行動の変化及び、車群や交通流全体に及ぼす影響評価も行ってきていた。

(3) 車群や交通流の挙動は、当然のことながら、個々のドライバの運転行動の積み重ねで生じる。多重追突事故防止の観点において車群の追突危険リスクを定量化し、オンライン車群管制を実現するためには、車群を構成する各々の車両の走行状態を動的に把握する必要性があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、以下の事項を研究目的として設定した。

(1) 車群を構成する車両の走行状態、すなわち、各々の車両の車間距離と速度をリアルタイムに推定する手法を開発すること。

(2) 推定した車群走行状態を基に、先行車や先々行車の1.5 s後の減速意図を予め予測する手法を開発すること。

(3) 予測された減速意図を後続車に呈示するためのインタフェースを開発し、これを呈示した際の追突リスクの低減効果を検証すること。

(4) 減速意図の呈示が車群全体に与える効果を検証すること。

3. 研究の方法

(1) 車群走行状態推定システム

本研究では、ドライバの減速意図を「将来の減速度」に置き換え、周辺車両の状態量を推定し、それらの情報から対象となる車両の

数秒後に生じる加速度を予測する。追従走行する車群を想定した車両4台の関係を図1に示す。ここで、 v_i, d_i, a_i は、先頭車両から数えて*i*台目車両の速度、車間距離、加速度である。

本研究では、2台目車両において自車速度と前後方向の車間距離(v_2, d_2, d_3)が計測可能であると仮定し、フィードバック推定手法の一つである unscented Kalman filter (以下 UKF) を用いて1台目車両から3台目車両までの車両状態量(v_2, d_2, v_3, d_3, v_1)を推定する。

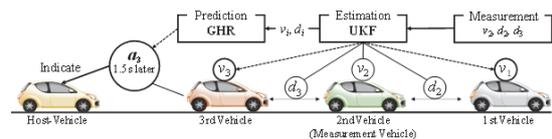


図1 車群追従走行システム

速度は式(1)で更新する。 v_1 は1階のトレンドモデル、 $v_{2,3}$ は差分方程式とし、この時の加速度 a_i は車両追従モデルで定義する。このモデルは、現在の状態量から反応時間後の加速度を予測するものであるため、15ステップ前の観測値から現在の加速度を得る。時間間隔は $\Delta t=0.1$ sとした。

$$v_i(k) = \begin{cases} v_i(k-1) & (i=1) \\ v_i(k-1) + a_i(k-1)\Delta t & \end{cases} \quad (1)$$

車間距離は式(2)で定義される差分方程式で更新する。

$$d_i(k) = d_i(k-1) + [v_{i-1} - v_i]_{(k-1)} \Delta t \quad (2)$$

(2) アンセンティッドカルマンフィルタ(UKF)の適用

ここでの推定問題は、状態変数 $\mathbf{x}_k = [v_2, d_2, v_3, d_3, v_1]^T$ を観測変数 $\mathbf{y}_k = [v_2, d_2, d_3]^T$ から推定することである。システム誤差を \mathbf{v}_k 、観測誤差を \mathbf{n}_k とすると、状態方程式及び観測方程式は式(3)で定義される。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{F}[\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}] + \mathbf{v}_{k-1} \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{G}[\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k] + \mathbf{n}_k \end{cases} \quad (3)$$

ここで、システム誤差及び、観測誤差の共分散行列はそれぞれ0.1、0.2~0.3を与えた。 \mathbf{F} は式(1)~(2)の速度と車間距離の更新式であり、 \mathbf{G} は式(4)で定義される単純な係数行列である。

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(3)の状態空間モデルに対して、UKFを適用する。表1にUKFによる推定手順を示す^①。

「 $\hat{\cdot}$ 」を推定値、「 \sim 」を一期先予測値とし、まず時間更新を行う。式(5)～(9)では、シグマポイント σ と呼ばれるサンプル点を発生させ、シグマベクトル Φ_k 、 Ω_k を計算し、各シグマポイントで得られた時間更新値について重み付きの平均をとることで更新された状態変数及び観測変数の一期先予測値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 、 $\hat{\mathbf{y}}_k$ を得た後、観測前の誤差の共分散 \mathbf{M}_k^{xx} を計算する。 N は状態変数の数、シグマポイントの広がり決定する拡散パラメータは $\lambda=5$ 、 \mathbf{Q}_k はシステム誤差の共分散である。

観測値更新では、式(15)、(16)において観測誤差の共分散を \mathbf{R}_k とし、観測変数の共分散 \mathbf{M}_k^{yy} 及び状態変数と観測変数の共分散 \mathbf{M}_k^{xy} を計算し、式(17)でカルマンゲイン \mathbf{K}_k を算出した後、式(18)、(19)によって観測後の状態変数の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ と誤差の共分散 \mathbf{P}_k を得る。

このように、UKFでは、拡張カルマンフィルタで必要となるヤコビアン行列の計算は必要なく、複雑なモデル構造への導入が可能となる。

表1 UKFによる推定アルゴリズム

(time update)	
$\sigma_{i,P} = \left(\sqrt{(N+\lambda)\mathbf{P}_{k-1}} \right)_i$	(5)
$\hat{\Phi}_{0,k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \hat{\Phi}_{i,k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \sigma_{i,P} (i=1, \dots, N),$	
$\hat{\Phi}_{i,k-1} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - \sigma_{i-N,P} (i=N+1, \dots, 2N)$	(6)
$\tilde{\Phi}_k = \mathbf{F}(\hat{\Phi}_{k-1})$	(7)
(mean before measurement) $\tilde{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=0}^{2N} h_i \tilde{\Phi}_{i,k}$	(8)
(variance before measurement)	
$\mathbf{M}_k^{xx} = \sum_{i=0}^{2N} h_i [\tilde{\Phi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{x}}_k][\tilde{\Phi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{x}}_k]^T + \mathbf{Q}_k$	(9)
$h_i = \frac{1}{2(N+\lambda)}$	(10)
$\sigma_{i,M} = \left(\sqrt{(N+\lambda)\mathbf{M}_k^{xx}} \right)_i$	(11)
$\tilde{\Omega}_{0,k} = \tilde{\mathbf{x}}_0, \tilde{\Omega}_{i,k} = \tilde{\mathbf{x}}_k + \sigma_{i,M} (i=1, \dots, N),$	
$\tilde{\Omega}_{i,k} = \tilde{\mathbf{x}}_k - \sigma_{i-M} (i=N+1, \dots, 2N)$	(12)
$\tilde{\Psi}_k = \mathbf{G}(\tilde{\Omega}_k)$	(13)
$\tilde{\mathbf{y}}_k = \sum_{i=0}^{2N} h_i \tilde{\Psi}_{i,k}$	(14)
(measurement update)	
$\mathbf{M}_k^{yy} = \sum_{i=0}^{2N} h_i [\tilde{\Psi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{y}}_k][\tilde{\Psi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{y}}_k]^T + \mathbf{R}_k$	(15)
$\mathbf{M}_k^{xy} = \sum_{i=0}^{2N} h_i [\tilde{\Phi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{x}}_k][\tilde{\Psi}_{i,k} - \tilde{\mathbf{y}}_k]^T$	(16)
$\mathbf{K}_k = \mathbf{M}_k^{xy} (\mathbf{M}_k^{yy})^{-1}$	(17)
(mean after measurement) $\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{y}}_k)$	(18)
(variance after measurement) $\mathbf{P}_k = \mathbf{M}_k^{xx} - \mathbf{K}_k \mathbf{M}_k^{xy} \mathbf{K}_k^T$	(19)

(3) 1.5s先の先行車加速度の予測

推定値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ を式(20)の追従モデルに入力し、反応時間分先の加速度 $a_3(k+T)$ を予測値として得る。本研究では、加減速操作はドライバの意図が車両に反映されるものであるという考えを基に、この $a_3(k+T)$ の負の成分を予測されるドライバの減速意図と定義する。

$$a_i(k+T) = \begin{cases} \alpha w \frac{v_i^n}{d_i^m} (v_{i-1} - v_i)_{(k)} & (i=2) \\ \alpha w \frac{v_i^n}{d_i^m} (v_{i-1} - v_i)_{(k)} + \alpha(1-w) \frac{v_i^n}{d_{i-1}^m + d_i^m} & \\ (v_{i-2} - v_{i-1})_{(k)} & (i=3) \quad (0 \leq w \leq 1) \end{cases} \quad (20)$$

(4) インタフェース設計^{②③}

本研究では、DSの特性を活かし視認負荷の増大を防ぐため、ウインドシールドディスプレイ(Wind-shield Display : WSD)を模した周辺視野への呈示方法を提案する。提案するインタフェース案を図2に示す。DS車両のフロントガラス左右方向(Aピラー)からバーが出現し、予測される減速度の大きさによりバーの色が変化する。呈示されるバーの色は3パターンとし、強い減速度ほど追突リスクが高い状況であることを考慮して3つの閾値を設け、低い減速度から順に、黄色($-1.50 < a_3 < -0.50$ m/s²)、橙色($-2.50 < a_3 < -1.50$ m/s²)、赤色($a_3 < -2.50$ m/s²)と変化させることでドライバに減速を促す。



図2 先行車減速意図呈示インタフェース

(5) 検証実験

検証実験は、ドライビングシミュレータ(以下、DS)を用いて行った。まず、図1に示す車群走行状態、すなわち、3台の車両の車間距離及び加速度がUKFによりどの程度正確に推定されているか、を確認する実験を行った。

その後、これとは別に、DSを用いた実験を新たに行い、図2に示した先行車の1.5s後の予測減速意図を呈示するインタフェースが、後続車の追突リスク低減にどの程度の効果を発揮するかを検証する実験を行った。

最後に、図1に示す4台目の後方に5台目車両を設け、4台目に対する支援が5台目どの程度波及するのかを検証するための新たなDS実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 速度と車間距離の推定

一例として、1 台目と 3 台目の速度及び 2 台目と 3 台目の車間距離の推定結果を図 3 に示す。1 台目と 3 台目の速度はともに、直接計測器で観測されたものではないが、UKF によるフィルタリング作用によって、正確にその状態を推定できた。ただし、1 台目の速度はそのモデルの構造上、位相の遅れが生じているが、これは排除することはできない。2 台目と 3 台目の車間距離も計測誤差がフィルタリングされ、高い精度で推定できた。

平均的な誤差は、速度で約 0.5m/s、車間距離で約 0.5m であったことから、提案したシステムによって高い精度で車群の走行状態を推定できることが明らかとなった。

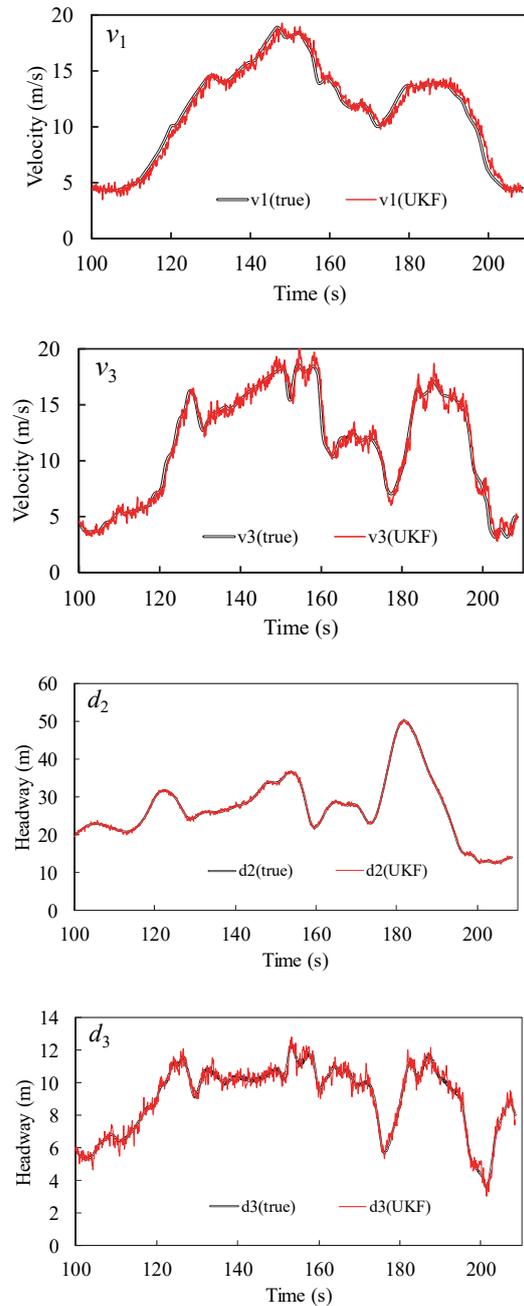


図 3 速度と車間距離の推定結果

(2) 1.5s 後加速度の予測

図 4 に 3 台目と 2 台目の 1.5s 後の加速度の予測結果の一例を示す。実測値 (黒) と予測値 (赤) は、完全には一致しないものの、その傾向を捉えており、システム側で予測された将来の先行車の減速意図として十分な精度を確保している。

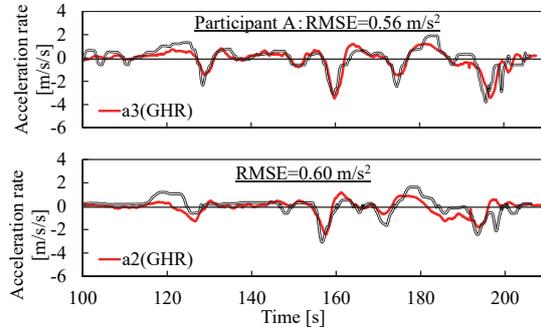


図 4 1.5 先の減速意図の予測結果

(3) 予測減速意図呈示の効果

図 5 は、1.5s 先の減速の意図のみを後続車 (4 台目車両) に伝達した場合の、後続車の加速度を示す。呈示の有無に関わらず、最大減速度はほぼ変化が見られなかった。

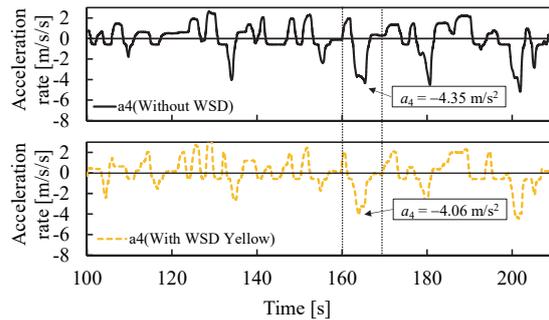


図 5 予測減速意図呈示の効果 (意図のみ)

しかし、1.5s 先の減速意図とその減速度合いを呈示した場合、図 6 に示すように最大減速度は有意に低減し、追突リスクが顕著に緩和された。

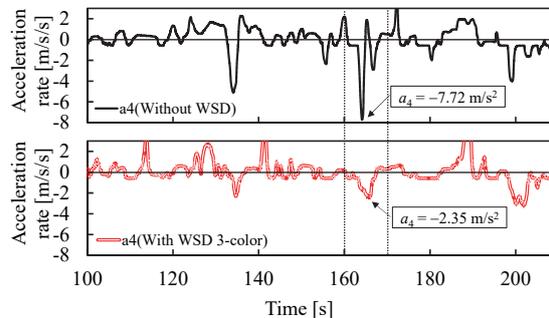


図 6 予測減速意図呈示の効果 (減速度合い)

また、多くの被験者がシステムにより安全な走行ができたと回答しており、先行車のブレーキランプが点灯するよりも 1.5s 前に後続車に対して減速意図を伝達する有用性が極めて高いことが実証された。

(4) 5 台目車両への影響

4 台目の後方に、実際には支援を受けていない 5 台目車両を追従させた時の、5 台目の加速度を図 7 に示す。実際には支援を受けていないにも関わらず、4 台目の支援により 5 台目の最大減速度も有意に低減しており、4 台目に対する支援が後方車群にも波及し、車群全体としての安全性が向上したことが示唆された。

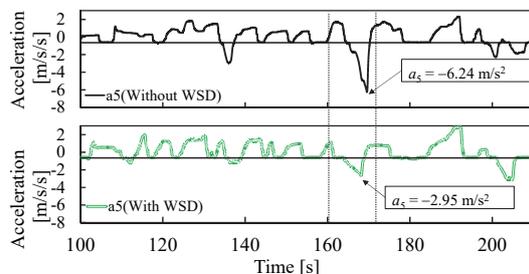


図 7 5 台目への影響

(5) まとめ

今回、多重追突事故防止を目的とした車群制御システムの開発を行った。動的推定手法として有用性の高い UKF を用いて車群を構成する各々の車両の走行状態を推定し、この推定結果を基に、先行車の 1.5s 先の減速意図を予測した。予測減速意図は、WSD を通じて後続車に伝達されることとし、被験者実験の結果、これが追突リスクの低減に極めて有用であることを示した。また、この支援の効果は後方車群にも伝播し、車群全体としての追突リスクの低減、すなわち多重追突事故防止への貢献が高いことを示唆するシステムのプロトタイプの開発に成功した。

<引用文献>

- ① Haykin, Saimon, Kalman filtering and neural networks, John Wiley & Sons, 2001
- ② 高田 翔太、平岡 敏洋、川上 浩司、ウィンドシールドディスプレイを用いた衝突回避減速度の視覚情報提示に関する実験的考察、自動車技術会論文集、Vol. 44, No. 3, 2013, 937-942
- ③ 高田 翔太、平岡 敏洋、野崎 敬太、川上 浩司、自発的な行動変容を促す安全運転評価システム (第 3 報) - システムに対する能動的理解が利用動機づけに与える影響 -、自動車技術会論文集、2014、Vol. 45, No. 2、411-417

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 4 件)

- ① 石倉 嵩也、鈴木 宏典、車群走行状態の動的推定に基づく減速予見情報呈示システムの開発と効果検証、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 83, No. 854、2017、1-15

DOI:10.1299/transjsme.17-00111

- ② 鈴木 宏典、石倉 嵩也、中辻 隆、先行車の減速意図予測を目的とした車群追従走行の動的推定、統計数理研究所共同利用研究レポート 393、査読無、2017、23-30
- ③ Hironori Suzuki、Prediction of Driver's Brake Pedal Operation in Vehicle Platoon System Model - Development and Algorithm Proposal, International Journal of Simulation Systems, Science & Technology, 査読有、Vol. 17, No. 35, 2016, 6. 1-6. 7
DOI 10.5013/IJSSST.a.17.35.06
- ④ 鈴木 宏典、石倉 嵩也、生駒 哲一、ジレンマゾーンにおける交差点通過または停止要因の分析と意図推定、自動車技術会論文集、査読有、Vol. 47, No. 4、2016、937-942

[学会発表] (計 5 件)

- ① Hironori Suzuki、Takaya Ishikura、Yoshitaka Marumo、Intent Inference of Driver's Deceleration Behavior to Mitigate Risk of Rear-End Collision、Proceedings of 2017 Road Safety & Simulation International Conference (RSS2017)、2017、Paper No. 247
- ② Hironori Suzuki、Takaya Ishikura、Yoshitaka Marumo、Mitigation of Rear-End Collision Risk Based on Intent Inference of Preceding Car's Deceleration Behavior, Proceedings of 2017 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering, 2017、194-197
- ③ Hironori Suzuki、Takaya Ishikura、Takashi Nakatsuji、Inferring Driver's Deceleration Intent in Vehicle Platoon System by Using Feedback Estimators, Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC' 16)、2016、335 - 340
- ④ 鈴木 宏典、石倉 嵩也、車両追従モデルを融合した状態推定法に基づく減速意図の予測、自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集 20166348、2016、1809-1812
- ⑤ Hironori Suzuki、Prediction of Driver's Brake Pedal Operation in Vehicle Platoon System Model - Development and Algorithm Proposal, Proceedings of IEEE 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, 2016、289 -294
DOI 10.1109/ISMS.2016.26

[図書] (計 1 件)

- ① 鈴木 宏典、技術情報協会、ドライバ状態の検出、推定技術と自動運転、運転支援システムへの応用、2016、450

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/nittraffic/ResearchActivity>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 宏典 (SUZUKI, Hironori)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：20426258

(2) 連携研究者

生駒 哲一 (IKOMA, Norikazu)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：40281282