

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01457

研究課題名（和文）ネットワーク交通流ブレイクダウン予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of a network traffic breakdown prediction method

研究代表者

吉井 稔雄（YOSHII, TOSHIO）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：90262120

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：交通事故や自然災害などの突発事象に起因する非日常の激しい交通渋滞（以下“ブレイクダウン”）の未然防止に向けて、ブレイクダウン発生予測手法構築を目的として以下の研究を行った。（1）ネットワーク交通流状態をマクロに捉える指標としてエリアトラフィックステートを定義し、交通密度と交通量の関係を示すMFD推定手法を確立した。OD交通量の変化や交通事故発生によるMFD形状変化を把握した。（2）ネットワークブレイクダウン予測手法の構築に向けて、ブレイクダウン発生有無の判定手法を開発した。（3）プローブ車両のDR画像を収集し、画像解析を行って急ブレーキ発生の予測、ならびに死角を検出するモデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交通事故や自然災害などの突発事象に起因する非日常の激しい交通渋滞（以下“ブレイクダウン”）を未然に防ぐことを目的とし、空間モニタリング技術、交通流解析手法、ならびにAIによる情報解析技術を組み合わせることで、道路ネットワーク交通流におけるBreakdown発生予測手法の構築を目指す研究で、同予測手法が確立されれば、東日本大震災後に東京で発生した大渋滞（Gridlock現象）などの交通ネットワークブレイクダウン現象を未然に防ぐことが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In order to prevent severe and extraordinary traffic congestion (hereafter referred to as "breakdown") caused by sudden events such as traffic accidents or natural disasters, the following research was conducted with the aim of developing a breakdown occurrence prediction method.

(1) We defined the Area Traffic State as an indicator to macroscopically capture the state of network traffic flow and established a method for estimating the MFD (Macroscopic Fundamental Diagram), which shows the relationship between traffic density and traffic volume. Changes in the shape of the MFD due to variations in OD traffic volume and the occurrence of traffic accidents were identified. (2) To develop a method for predicting network breakdowns, we devised a method for determining the occurrence of breakdowns. (3) We collected DR images from probe vehicles and performed image analysis to develop a model that predicts sudden braking occurrences and detects blind spots.

研究分野：交通工学

キーワード：交通流 ブレイクダウン ネットワークネットワーク 画像処理 予測手法 事故リスク

### 1. 研究開始当初の背景

交通流解析は、大きく分けてマクロとミクロ 2 種類の解析手法があり、ミクロ解析手法では車両追従モデル、マクロ解析手法では交通流の流体近似による交通流解析が行われている。本研究では、後者による解析手法を対象とし、MFD を用いてネットワーク単位に拡張した交通流解析を行う。MFD を用いた交通流解析は、2007 年に Daganzo<sup>[1]</sup>によって提唱された後、その状態変化の Hysteresis 解析手法や対象エリアを分割することによって交通流を捉える手法などの多数の提案がなされている。さらに、研究代表者ら<sup>[2]</sup>は、同 MFD を活用したランプメータリング手法の提案を行っている。しかしながら、“交通事故発生等による道路ネットワークの性能低下によって、あるいは OD 交通量などの動的変数に依存して形状が変化する”との MFD の不安定性を理由として、未だ実用に供する巨視的交通流解析手法が確立されるには至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、東日本大震災時に首都圏で発生した Gridlock による Breakdown 現象など、極めて深刻な大渋滞の発生を、適切な交通制御の実施によって未然に回避することを目的として、フィジカル空間モニタリング技術、交通工学の知見と AI 技術を組み合わせて、予測時点の直後に Breakdown が発生する確率を算定する手法を構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) ネットワーク交通流状態

ネットワーク交通流状態をマクロに捉える指標としてエリア交通流状態 (Area Traffic State) を定義し、巨視的に交通密度と交通量の関係を示す MFD 推定手法を構築する。さらに OD 交通量の変化や交通事故発生による MFD 形状変化を把握する。

#### (2) ネットワークブレイクダウン予測手法

ネットワークブレイクダウン予測手法の構築に向けて、ブレイクダウン発生有無の判定手法を開発する。

#### (3) インシデント検出

プローブ車両の DR 画像を収集し、画像解析を行って急ブレーキ発生の予測、ならびに死角を検出するモデルを開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) Area Traffic State の算定方法

エリア交通流状態は対象エリア内を走行したプローブ車両走行軌跡を用いて一定時間単位に算出する。以下、本稿では 5 分単位とし、集計する最小の空間サイズは 4 次メッシュ (1/2 地域メッシュ=500m×500m) とする。エリア単位での総走行台キロと総走行台時を、それぞれエリア流率とエリア密度として式(1)、式(2)にて定義する。なお、各時間帯におけるエリアの平均速度は式(3)にて算出される。

$$q(t) = \sum_{i \in A} q_i(t) \quad (1)$$

$$k(t) = \sum_{i \in A} k_i(t) \quad (2)$$

$$V(t) = \frac{q(t)}{k(t)} \quad (3)$$

$q(t)$  : 時間帯  $t$  におけるエリア流率 [台・km/5 分]

$k(t)$  : 時間帯  $t$  におけるエリア密度 [台・時/5 分]

$q_i(t)$  : 4 次メッシュ  $i$  における時間帯  $t$  の総走行台キロ [km]

$k_i(t)$  : 4 次メッシュ  $i$  における時間帯  $t$  の総走行台時 [時間]

$A$  : 対象とするエリアに含まれる 4 次メッシュの集合

$V(t)$  : 時間帯  $t$  の平均速度 [km/h]

#### (2) 正規化エリア流率と正規化エリア密度

現在、プローブデータは普及段階にあり、時間の経過とともに車両数が増加している。このため、同じ交通流状態であっても、プローブ混入率が増加することから、エリア流率とエリア密度も時間の経過とともに大きくなる。そこで、この問題を緩和するために、すべてのエリア流率とエリア密度について、以下の式(4)~(7)を用いて月単位、エリア単位に正規化を行う。まず、式(4)、(5)にて、各エリアごとの 1 か月平均のエリア流率とエリア密度を算定し、式(6)、(7)にて各時間

帯のエリア流率とエリア密度を正規化する。正規化された時間帯 $t$ のエリア流率とエリア密度をそれぞれ正規化エリア流率、正規化エリア密度と定義する。また、両集計量で表現されるネットワーク交通流状態をエリア交通流状態として定義する。

$$q_{ave} = \frac{\sum_{t \in M} q(t)}{\sum_{t \in M} 1} \quad (4)$$

$$k_{ave} = \frac{\sum_{t \in M} k(t)}{\sum_{t \in M} 1} \quad (5)$$

$$Q_t = \frac{q(t)}{q_{ave}} \quad (6)$$

$$K_t = \frac{k(t)}{k_{ave}} \quad (7)$$

$q_{ave}$  : 1ヶ月平均のエリア流率[台・km/5分]

$k_{ave}$  : 1ヶ月平均のエリア密度[台・時/5分]

$M$  : 1ヶ月平均の時間帯の集合

$Q(t)$  : 時間帯 $t$ における正規化エリア流率[ ]

$K(t)$  : 時間帯 $t$ における正規化エリア密度[ ]

### (3) ブレイクダウン発生の判定

本研究におけるブレイクダウン発生の判定手法としては、巨視的渋滞が発生し渋滞領域が出現する日と巨視的渋滞が発生しておらず渋滞領域が出現しない日の分類手法を構築する。

#### ① K-means による時系列クラスタリング

正規化エリア流率、正規化エリア密度は5分単位のデータであることから、1日ではそれぞれ288個、計576のデータが存在する。各エリアについて、全観測日の正規化エリア流率と正規化エリア密度、計576の要素をもつベクトルを作成し、それぞれのエリアごとに同ベクトルに対するK-meansによるクラスタリングを行う。ここで、距離計算にはDTW、クラスタの重心を求める計算にはDBA、クラスタ数の決定にはエルボー法を用いる。なお、実観測データに基づく分析においては、エルボー法による最適なクラスタ数が多いエリアで2となったことから、最適なクラスタ数を2に設定した。

DTW(Dynamic Time Warping)とは時系列データ同士の類似度を測る際に用いられる手法である。DTWでは2つの時系列の各点の距離を総当たりで求めた上で2つの時系列が最短となるパスを見つけ、DTW距離を求める。DTWの特徴としては、時系列データ同士の長さや周期が違っても類似度を求めることができることが挙げられる。本研究において、クラスタリングに用いる1日毎のエリア交通流状態は日によって一部の時間帯に欠損値がある場合があり、長さの異なる時系列データをクラスタリングすることから、距離計算にDTWを採用した。

DTW距離の計算方法について例を上げて説明する。図1に示すように、時刻 $t_1, t_2, t_3$ において $x_1, x_2, x_3$ の値を取る時系列データ $X$ と $y_1, y_2, y_3$ の値を取る時系列データ $Y$ がある場合、動的計画法を用いてDTW距離を求める。すなわち、2つの時系列データ、 $x_i$ と $y_j$ の距離を $d_{(i,j)}$ とすると、 $i$ の昇順、 $j$ の昇順に式(8)を用いて順次 $l_{(i,j)}$ を算出すれば、 $l_{3,3}$ の値がDTW距離となる。図2には、動的計画法によるDTW距離算定手順を示す。

$$l_{i,j} = d_{i,j} + \min \left\{ \begin{array}{l} l_{i-1,j} \\ l_{i,j-1} \\ l_{i-1,j-1} \end{array} \right\} \quad (8)$$

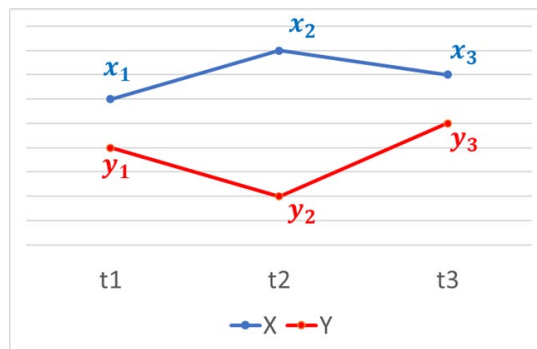


図1 時系列データ X と時系列データ Y

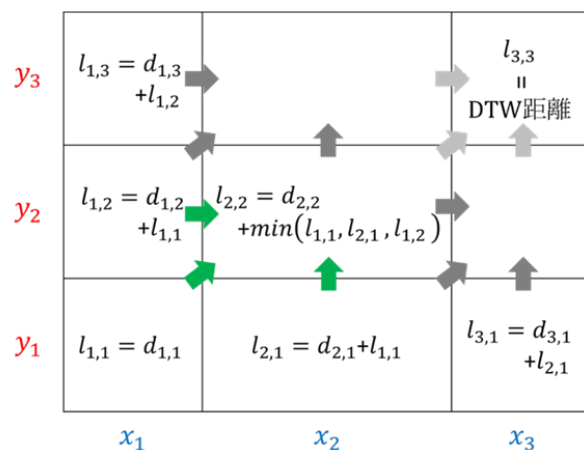


図2 DTW 距離算定手順

DBA(DTW Barycenter Averaging)は、適当な仮の重心（ベクトル）を初期ベクトルとして、それを反復的に更新することで複数の時系列データの重心ベクトルを求めるアルゴリズムである。重心ベクトルの求め方としては、まず複数の時系列データと重心の初期ベクトルとの間で DTW 距離をそれぞれ計算する。このとき、DTW 距離の計算過程で得られる 2 点間の対応付けを保持しておく。次に、初期重心ベクトルの各要素の値をそれぞれが対応付けられた点の重心に移動する。重心ベクトルの位置を移動したことにより、重心ベクトルと複数の時系列データとの DTW の結果が変化する。この手順を重心ベクトルが収束するまで繰り返す。本研究では、収束するまでの反復回数を最大 10 回として重心ベクトルを算出した。

② K-means による非時系列クラスタリング

前節に示した時系列クラスタリングを行った場合には、渋滞開始時刻がずれるなど、特定のエリア交通流状態出現時刻が異なることによって、ベクトル間に大きな差異が生じることとなる。そこで、この時間帯の違いによる差異による影響を緩和するために、非時系列クラスタリング手法を用いて渋滞領域出現の有無を判定する。

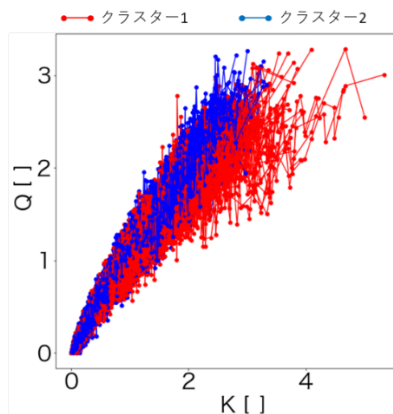


図3 非時系列クラスタリングの結果の例（その1）

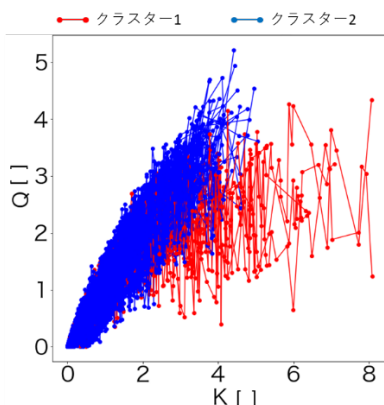


図4 非時系列クラスタリングの結果の例（その2）

具体的には、1日のエリア交通流状態を正規化エリア密度の昇順で並べ替えた後、正規化エリア密度の昇順での正規化エリア流率と正規化エリア密度、計576要素をもつベクトルに対してクラスタリングを行う。図3、図4には、クラスタリングの結果の例を示す。図3の結果では、クラスター間のエリア交通流状態の差が小さく、正規化エリア密度が大きいにもかかわらず正規化エリア流率の小さなエリア交通流状態が出現していない。一方の図4の結果では、クラスター1に属する観測日において正規化エリア密度が大きいにもかかわらず正規化エリア流率が小さくなっているエリア交通流状態が出現している。そこで、本研究による判定手法では、次節に記す方法により、クラスター1に属する観測日に巨視的な渋滞領域が出現していると判断する。

### ③ 渋滞領域出現有無の判定

各観測日における渋滞領域出現の有無については、前節に示した非時系列クラスタ分析によって分類された2つのクラスター間の差異に基づいて以下の方法で判定する。

図5に示すように、各クラスターに属するすべての観測日について、正規化エリア密度が最大となる点の重心を算定し、両クラスターで算定された重心間の正規化エリア密度の値の差の絶対値 ( $\Delta K_{max}$ ) を算定する。対象として設定したすべてのエリアについて  $\Delta K_{max}$  を算定し、その分布を作成する。同分布の平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  の値を用いて閾値を設定し、同閾値と各エリアにおける  $\Delta K_{max}$  値を比較して、 $\Delta K_{max}$  値が閾値を上回った場合には、同エリアのクラスター1に属する観測日において巨視的渋滞が発生したと判定する。

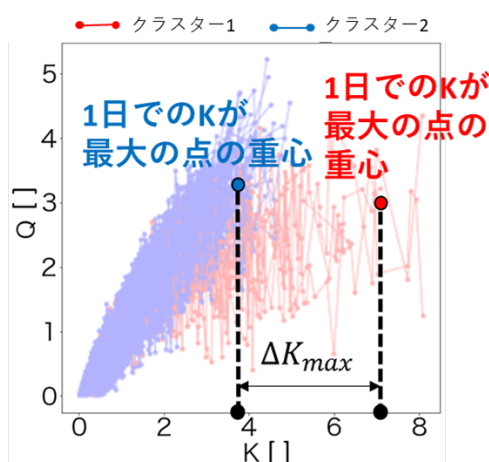


図5 渋滞領域有無の判定方法

### (4) まとめ

本研究では、巨視的渋滞領域に属するエリア交通流状態出現の検出手法を考案した。

渋滞領域出現の検出には、正規化エリア密度の昇順に並べ替えた正規化エリア流率と正規化エリア密度、計576要素をもつベクトルを対象にクラスタリングを行い、同ベクトルを2つのクラスターに分類した後、両クラスター間の乖離に基づいて巨視的渋滞出現の有無を判定する。

今後は、巨視的渋滞の判定方法を確立した後、巨視的渋滞の発生を予測する手法を開発する。

### 参考文献

- [1] C.F. Daganzo : Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches, Transportation Research B 41, 49-62, 2007.
- [2] T. Yoshii, Y. Yonezawa & R. Kitamura : Evaluation of an Area Metering Control Method Using the Macroscopic Fundamental Diagram, The 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal, July 11-15, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TSUBOTA Takahiro, YOSHII Toshio, KURAUCHI Shinya, XING Jian	4. 巻 77
2. 論文標題 EFFECT OF TRAFFIC ACCIDENT INFORMATION PROVISION ON EXPRESSWAY NETWORK CONSIDERING INFORMATION TYPES	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)	6. 最初と最後の頁 I_985 ~ I_993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.77.5_I_985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高田 啓介、森本 裕治、吉井 稔雄、坪田 隆宏	4. 巻 42
2. 論文標題 エリア交通流状態を用いた巨視的渋滞発生の検出手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 交通工学研究発表会論文集	6. 最初と最後の頁 519 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jsteproceeding.42.0_519	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Hanwei, Uchiyama Hideaki, Ono Shintaro, Kawasaki Hiroshi	4. 巻 0
2. 論文標題 MOTSLAM: MOT-assisted monocular dynamic SLAM using single-view depth estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	6. 最初と最後の頁 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IROS47612.2022.9982280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hanwei Zhang, Hideaki Uchiyama, Shintaro Ono, Hiroshi Kawasaki	4. 巻 0
2. 論文標題 Monocular dynamic SLAM using single-view depth estimation and multiple object tracking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第25回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2022)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉井稔雄, 川本透, 白柳洋俊, 坪田隆宏	4. 巻 -
2. 論文標題 見通しを考慮した生活道路交差点における交通事故リスク要因分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3, Vol.77	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 服部 友哉, 塩見 康博	4. 巻 8
2. 論文標題 都市高速道路合流部における車線利用率と旅行時間の関係に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_159 ~ A_168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.8.2_A_159	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 宮柱太一, 羽倉輝, 栗達, 河合由起子, 小野晋太郎
2. 発表標題 車載カメラ画像からカーブミラーを検出する深層学習モデルの性能比較
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林光隼, 栗達, 小野晋太郎
2. 発表標題 安全な自転車走行を目的としたデプス推定とセマンティックセグメンテーションによる死角領域の予測
3. 学会等名 火の国情報シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張 ハンウェイ, 野口 遥平, 小野晋太郎, 川崎 洋
2. 発表標題 深度推定により算出した車間距離を用いた急ブレーキ検出
3. 学会等名 第20回ITSシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張 ハンウェイ, 内山 英昭, 小野晋太郎, 川崎 洋
2. 発表標題 単眼カメラの動的SLAMを用いた運転環境の可視化
3. 学会等名 第20回ITSシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本想, 花房比佐友, 塩見康博
2. 発表標題 強化学習を用いた高速道路における制限速度制御手法の構築
3. 学会等名 第66回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松元佑樹, 西内裕晶
2. 発表標題 ETC2.0プローブ情報を活用した道路網の機能階層性と道路の安全性に関する研究
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 安隆浩, 倉内慎也, 吉井稔雄, 西内裕晶, 佐野可寸志
2. 発表標題 交通事故リスクに関するコミュニケーションが経路選択行動に与える影響の分析
3. 学会等名 土木学会第64回土木計画学研究発表会・秋大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西内裕晶, 大藤武彦, 兵頭知, 倉内慎也, 吉井稔雄
2. 発表標題 道路情報板を活用した交通事故リスク情報提供とドライバーの意識に関する分析
3. 学会等名 第34回日本道路会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安隆浩, 倉内慎也, 吉井稔雄, 西内裕晶, 佐野可寸志
2. 発表標題 交通事故リスクに関するコミュニケーションが経路選択行動に与える影響の分析
3. 学会等名 土木学会 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 兵頭知, 西内裕晶, 大藤武彦, 倉内慎也, 吉井稔雄
2. 発表標題 道路情報板を活用した交通事故リスク情報提供によるドライバーの事故リスク情報態度・安全運転意識変化の継続効果の検証
3. 学会等名 土木学会 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部友哉, 塩見康博, 佐野正彦, 松永弘明
2. 発表標題 ミクロ交通流シミュレーションを用いた都市高速における動的車線マネジメントに関する研究
3. 学会等名 第19回ITSシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野正彦, 松永弘明, 入江喜朗, 高本聡, 橋本洋介, 塩見康博
2. 発表標題 都市高速における追従応答性を考慮した車両制御技術の適用可能性に関する研究
3. 学会等名 土木学会 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hanwei Zhang, Hiroshi Kawasaki, Tsunenori Mine, Shintaro Ono
2. 発表標題 Analysis of the Conditions for the Occurrence of Sudden Braking using Drive Recorder Videos -- Using the Distance between Vehicles Estimated by Deep Learning --
3. 学会等名 第19回ITSシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hanwei Zhang, Hideaki Uchiyama, Shintaro Ono, Hiroshi Kawasaki
2. 発表標題 Monocular Visual Odometry for Dynamic Environments using Deep Depth Estimation with Clustering Techniques
3. 学会等名 第24回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Celso Luis FERNANDO, Toshio YOSHII, Takahiro TSUBOTA, Hirotoishi SHIRAYANAGI
2. 発表標題 Effect of the Multicollinearity of Interaction Terms on the Performance of the ANN Model
3. 学会等名 The 14th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本 裕治, 吉井 稔雄, 坪田 隆宏, 飯星 明
2. 発表標題 ネットワーク交通流ブレイクダウン判定方法の構築
3. 学会等名 第41回交通工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Tsubota, Mamoru Shimmizu, Toshio Yoshii, Hirotoishi Shirayanagi
2. 発表標題 Deep learning model for predicting traffic accident risk on an expressway
3. 学会等名 2021 International Symposium on Transportation Data & Modelling (ISTDM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Celso Luis Fernando, Toshio Yoshii, Takahiro Tsubota, Hirotoishi Shirayanagi
2. 発表標題 A Factor Extraction Method using Deep Learning Technique on Traffic Accident Risk
3. 学会等名 2021 International Symposium on Transportation Data & Modelling (ISTDM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坪田 隆宏 (TSUBOTA TAKAHIRO) (00780066)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授  (16301)	
研究分担者	塩見 康博 (SHIOMI YASUHIRO) (40422993)	立命館大学・理工学部・教授  (34315)	
研究分担者	西内 裕晶 (NISHIUCHI HIROAKI) (40548096)	高知工科大学・システム工学群・教授  (26402)	
研究分担者	川崎 洋 (KAWASAKI HIROSHI) (80361393)	九州大学・システム情報科学研究院・教授  (17102)	
研究分担者	小野 晋太郎 (ONO SHINTARO) (80526799)	福岡大学・工学部・准教授  (37111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------