

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00384

研究課題名（和文）超多層適応共鳴ネットワークによるエピソード記憶の学習基盤

研究課題名（英文）Learning Platform of Episodic Memory on Adaptive Resonance Theory Multilayer Networks

研究代表者

間所 洋和（Madokoro, Hirokazu）

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：10373218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、表情から推察される情動の程度に応じたエピソードを、階層的に可視化表現するための新しい学習記憶方式の提案を目的とした。コンピュータの記憶装置は量的には進歩したものの、質的には意味記憶の範囲に留まっており、ロボットを含めて知的で親和的な行動に到達できていない。本研究では、時系列データに対して安定性と可塑性を兼ね備えつつ、追加学習が行える適応共鳴理論を基礎として、多層化による深層学習を導入することにより、エピソード記憶を実現する新しいネットワークを構築した。3年間の研究を通じて、カテゴリ数の自動抽出、分類粒度を支配するパラメータの適応的制御、ベンチマークデータセットを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、情動により対応付けられたエピソード記憶を基盤とする新しい情報記憶方式を確立するためのプラットフォームを開発した。また、評価のためのベンチマークデータセットを構築した。一般シーンの画像からコンテキストを生成し理解する研究と顔画像から表情を認識する研究はコンピュータビジョン分野の研究において個別に取り組みられていたが、本研究のように両者を同時に扱い、その発展型としてエピソード記憶へと結び付けた研究は初めての試みであった。本研究成果は、人間共生型のロボットへの応用に加えて、コンピュータや組込み機器においても利用者のエピソードに基づくインターフェースの設計に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a new learning and memorizing system for hierarchically visualizing episodes according to the degree of emotions inferred from facial expressions. Although computer memories have improved quantitatively, its system architecture remains within a semantic memory. Therefore, the system that includes intelligent and friendly behavior used for robots has not been actualized. For this study, we constructed a new network that realizes episodic memory based on a deep learning framework through multi-layered learning. We employed adaptive resonance theory networks that enable stability and plasticity concerning time-series input features and incremental learning. During three years for this project, we have automatically extracted the number of categories, adaptive controlled the parameters that control the classification granularity, and established benchmark datasets.

研究分野：情報工学

キーワード：適応共鳴理論 自己組織化マップ エピソード記憶 パートナロボット カテゴリマップ 表情空間  
分類粒度制御 ビジランスパラメータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人間の記憶は様々な種類に分類されているが、コンピュータと人間の記憶で最も異なるのはエピソード記憶である。エピソード記憶とは、時間的かつ空間的な文脈内に位置づけることのできる出来事、すなわち思い出に関する記憶である。エピソード記憶には、個々の事象に対する経験内容、場面、状況、感情などの情報が含まれている。中でも、感情は記憶の質に強く影響している。コンピュータの記憶装置は量的に著しく進歩したが、質的には信号情報として大量に記録しているに過ぎない。このため、コンピュータと同じ記憶方式のロボットにおいても、知的で高度な行動は未踏課題のひとつである。

エピソード記憶の工学的モデルは、適応共鳴理論を基礎として EM-ART (W. Wang, 2012), ADLART (S. Gao, 2014), FAMML (W. Wang, 2016) 等のネットワークが提案されている。しかしながら、エピソードを装飾する情動に関する情報が考慮されていないため、単純なイベント記録に留まっている。また、各層のエピソードが固定の粒度であるため、コンテキストや情動で粒度が切り替わるエピソードには対応できず、シナリオベースの単純なベンチマークしか用意されていない。更に、3 層程度のネットワーク構成のため、分類粒度の階層化がなく、事前にカテゴリ数を与えないと、正常に動作しないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、表情から推察される情動の程度に応じたエピソードを、階層的に可視化表現するための新しい学習記憶方式を提案することにある。コンピュータの記憶装置は量的には進歩したものの、質的には意味記憶の範囲に留まっており、ロボットを含めて知的で親和的な行動に到達できていない。本研究では、時系列データに対して安定性と可塑性を兼ね備えつつ、追加学習が行える適応共鳴理論を基礎として、多層化による深層学習を導入することにより、エピソード記憶を実現する新しいネットワークを構築する。また、カテゴリ数の自動抽出、分類粒度を支配するパラメータの適応的制御、ベンチマークの確立を到達目標とする。本研究では、時系列データに対して安定性と可塑性を兼ね備えながら追加的に学習と記憶が行える適応共鳴理論に、自己写像特性を用いて空間的な位相関係を可視化する自己組織化マップを加えて、カテゴリマップを生成するネットワークの構築を目的とする。また、多層化により、分類粒度に応じたカテゴリの形成を目的とする。さらに、本研究では、エピソード記憶を用いることにより、利用者の主観に基づく受容度の高いインターフェースや、ロボットと人間との新しいコミュニケーションスタイルの確立を目指しつつ、以下の点を明らかにすることを目的とする。

- ・自己組織化マップに与える時間的な関係と適応共鳴理論における空間的な関係を可視化するとともに、カテゴリマップにおける時空間写像の関係性を明らかにする。
- ・事前にカテゴリ数の設定を必要としない教師なし分類を実現し、対象問題に応じた一意で客観的なカテゴリ数を導き出すメカニズムを構築する。
- ・カテゴリ分類における注目領域と非注目領域の関係性を定量的に記述することにより、背景領域をコンテキストとして利用する際のオブジェクトとの関係性を明らかにする。
- ・適応共鳴理論の階層化による深層学習方式を実装し、粒度別にエピソードを記述する。
- ・結合荷重間の相互情報量からカテゴリ境界を自動抽出し、階層別のカテゴリ数の自動決定とビジュランスパラメータの自動調整を実現する。
- ・安定性と可塑性の学習メカニズムを、カテゴリの粒度から説明するためのパラメータを抽出する。
- ・ベンチマークデータセットを用いた工学的観点からの定量的評価に加えて、認知心理学的知見に基づく主観評価を実施する。
- ・ビッグデータ（集合知）とパーソナルデータ（経験知）を適応的に融合する。

### 3. 研究の方法

提案手法を構成する研究の方法として、最初にエピソード記憶を自己生成するための表情空間マップとコンテキストマップを構築し、シミュレーションを通じて両マップの動作を支配するパラメータについて評価する。特に、分類粒度を制御するビジュランスパラメータは、記憶の粒度に直結するため、カテゴリマップの写像結果から再帰的に評価する。また、フィールドテストに向けて、パートナロボットのプロトタイプを設計する。

続いて、環境内を自律的に移動するための行動様式を生成するプログラムを開発する。また、評価用のプラットフォームとして、視覚機能に重点を置いた自律移動型ロボットを試作開発する。最終的には、試作ロボットを用いて、研究室及び一般家庭を模した実環境においてフィールドテストを実施する。ロボットとユーザのインタラクションを通じて、エピソード記憶の形成について多面的に評価し、ベンチマークデータセットを構築する。以下に、具体的な方法について詳述する。

(1) **表情空間マップの構築 (担当: 佐藤, 間所)**: 表情の動的多様性を定量的に捉えるマップとして、表情変化から満足度や疲労感などの表出頻度の高い表情をカテゴリ化し、その関係性を可視化するための 2 次元マップを構築する。

(2) **コンテキストマップの構築 (担当: 間所, 佐藤)**: 表情空間マップで推定される感情を意味情報として、利用者が日常生活で接する場面を大局的に記述し、利用者の興味や要求を満た

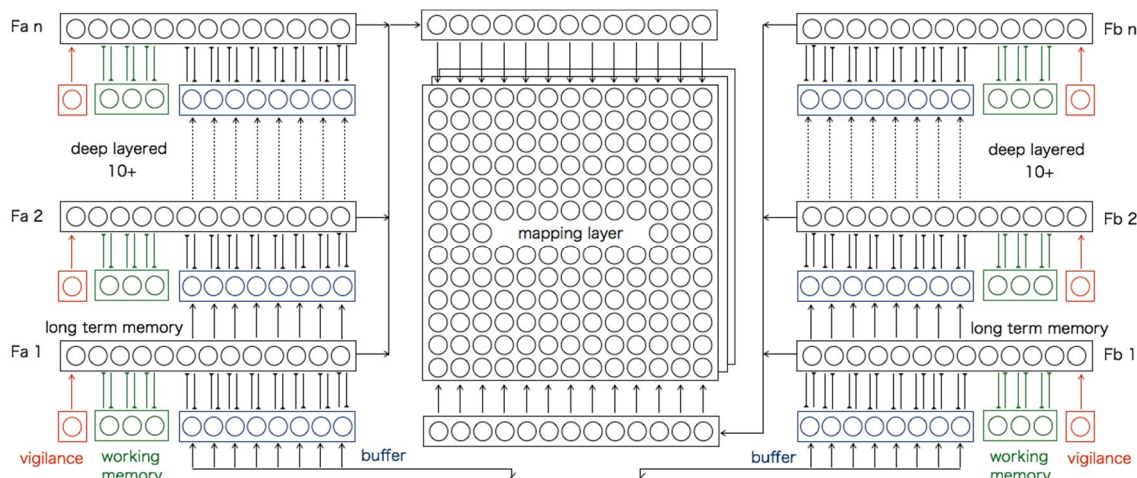


図 1 . 本研究で提案したネットワークの全体構成 .

す情報を可視化するとともに、関連する情報への手がかりを与えるために、図 1 に示す 2 次元マップを構築する .

(3) ART の分類粒度評価 (担当 : 間所) : Gabor Wavelets による方位選択特性を利用して、入力位相変化や時系列情報に対する ART の分類粒度を評価する . また、冗長なカテゴリの発生を抑えつつ、表情変化を最小のカテゴリ数で抽出できるピジランスパラメータを探索する .

(4) パートナロボットの設計と製作 (担当 : 下井, 間所) : 試作するパートナロボットの外觀, 機構, 及びフレームを, 3D-CAD を用いてモジュール単位に設計する . 移動機構を備えるロボットの試作には多額の費用を要するが, 既存のプラットフォームを活用することで, コストを重視したシンプルなロボットを試作する . 感覚機能としては, 視覚センサとしてカメラを 2 台搭載し, 頭部には感圧式のタッチセンサを配置する .

(5) 自律行動様式の生成 (担当 : 間所, 佐藤) : ロボットの視覚から得られるシーン画像の移動に伴う見え方の変化と, 測域センサから得られる距離情報から, 遺伝的プログラミング (Genetic Programming: GP) を用いて, 自律行動様式を行動ツリーとして生成する . ただし, GP ではプロートやイントロンの発生が問題となる . これを回避する方策として, 確率学習モデルの DBN (Dynamic Bayesian Networks) を用いてグラフ構造を最適化する .

(6) 並列動作シミュレーション (担当 : 間所, 下井) : システム記述言語を用いて提案するネットワークを実装記述し, 並列動作シミュレーションを実施する . 特に, 長期記憶として保存されるカテゴリ数が増加した場合のリアルタイム性について詳細に検証する .

(7) フィールドテスト (担当 : 間所, 佐藤, 下井) : コンテキストの評価については, シーン分類結果及びユーザの文脈理解を, 心理学的主観テストにより定量的に評価する . 表情空間マップについては, 基本 6 表情及び律動的な表情表出について, 感性情報学的に評価する . また, オクルージョンやコラプションに対するロバスト性を検証する .

#### 4 . 研究成果

##### 4 . 1 実験環境とベンチマークデータセット

図 1 に示す本研究での提案手法の有用性を評価するためのベンチマークデータセットを, 試作ロボットを用いて取得した . 図 2 に取得したデータのサムネイル画像を示す .

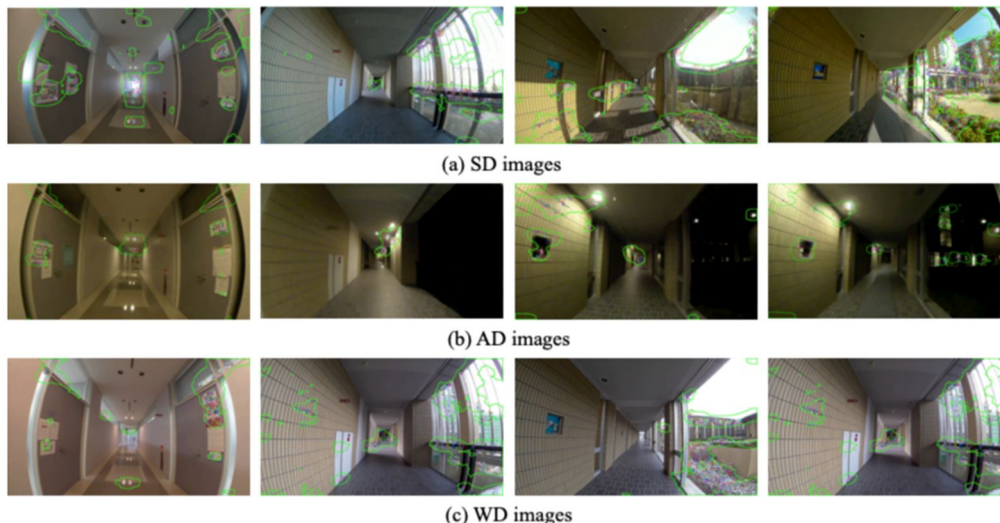


図 2 . 取得した画像のサムネイル画像 .

実験環境は研究代表者らの所属する大学である．キャンパス内の複数の建屋内を，単眼カメラを搭載した当該試作ロボットが移動し，ビデオシーケンスとして取得した．本研究の目的である屋外環境の変化が認識精度に与える影響の評価と，カテゴリマップへの写像結果や混同対照表の結果から，正解ラベルにおける総ラベル数の変化を検証するためのデータセットを構築した．本研究の実験における屋外条件として，データセットの取得とラベリングに伴う負荷を考慮し，夏季の日中，冬季の日中と夜間の3種類の画像データセットを取得した．屋内での画像であるが，ガラスの壁と窓から，屋外の特徴が混在している．この中で，提案手法によるコンテキストマップの生成と写像結果を評価した．

実験結果として，各区間の認識精度を混同対照表のヒートマップを用いて分析した．図3に環境地図と対応する混同対照表を示す．混同対照表は横方向を基準として，識別に成功したフレーム数が対角線上に表示される．それ以外のマス目には，誤認識となったフレーム数が表示され，縦方向のカテゴリ名を参照することで，誤認識したカテゴリを特定することができる．64ラベルまで区間を定量的に細分化した場合，誤認識する区間が最も多い結果となった．さらに，各環境の64ラベルの混同対照表から，大区間2で誤認識が最大となった．各環境を比較した場合，大区間2における快晴時の各区間の誤認識は他の環境より少ない傾向となった．原因として，屋外環境の影響が推測できる．

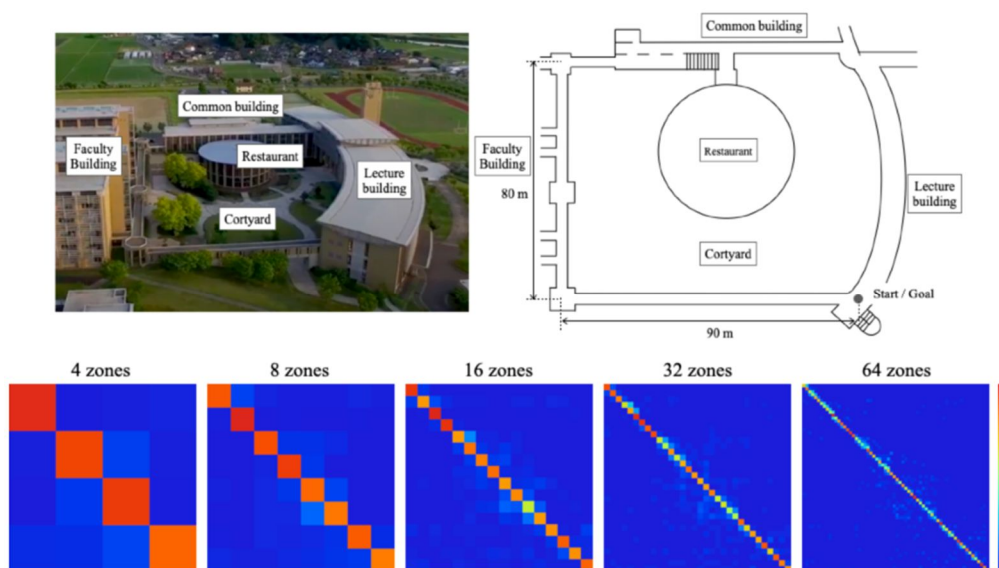


図3．総延長400mの実験環境（上）と混同対照表（下）．

コンテキストマップに先立ち，各条件下での位置認識精度を定量的に評価した．評価結果を図4に示す．ワンリープアウトの交差検定により，時計回りと反時計回りの両方の経路で評価した．位置の分解能とともに，認識率が変化していることが実験結果から確認できる．また，屋外の環境を受けて，認識率が変動することも定量的に示されている．

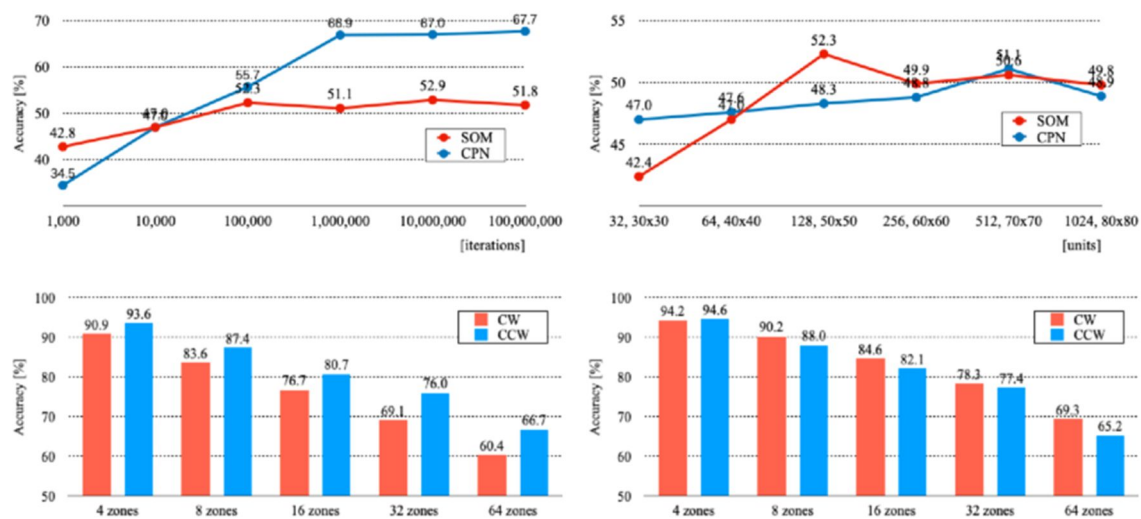


図4．各条件下での位置認識精度．

#### 4.2. コンテキストマップの生成結果

本研究の核心となるコンテキストマップを図5に示す．3条件に対応している．カテゴリマ

アップ内の隣接するクラスタの境界を可視化し、生成された領域に該当する区間を分析した。快晴、積雪時では大区間2,3,4に加え、大区間1内の区間1~6ラベルのクラスタが領域を生成した。大区間1における7~16ラベルのクラスタではカテゴリマップ上では集合して分布する傾向がある。加えて、境界を可視化した際、7~16ラベルのクラスタは小規模の領域を多く生成した。また、夜間時のカテゴリマップの境界の可視化では、2,3箇所程の中領域と広範囲に小規模の領域を生成する傾向がある。快晴、積雪時とは異なり、大区間2,3,4に該当するクラスタも小規模の領域を生成している。夜間時の画像の特徴として、視覚的顕著性が屋内環境に集中しやすい。その結果、屋外の特徴量が大きく影響を与えた他の環境と違い、類似した屋内空間の影響により、カテゴリマップの写像空間における分類の際に微細な領域を抽出したと考えられる。

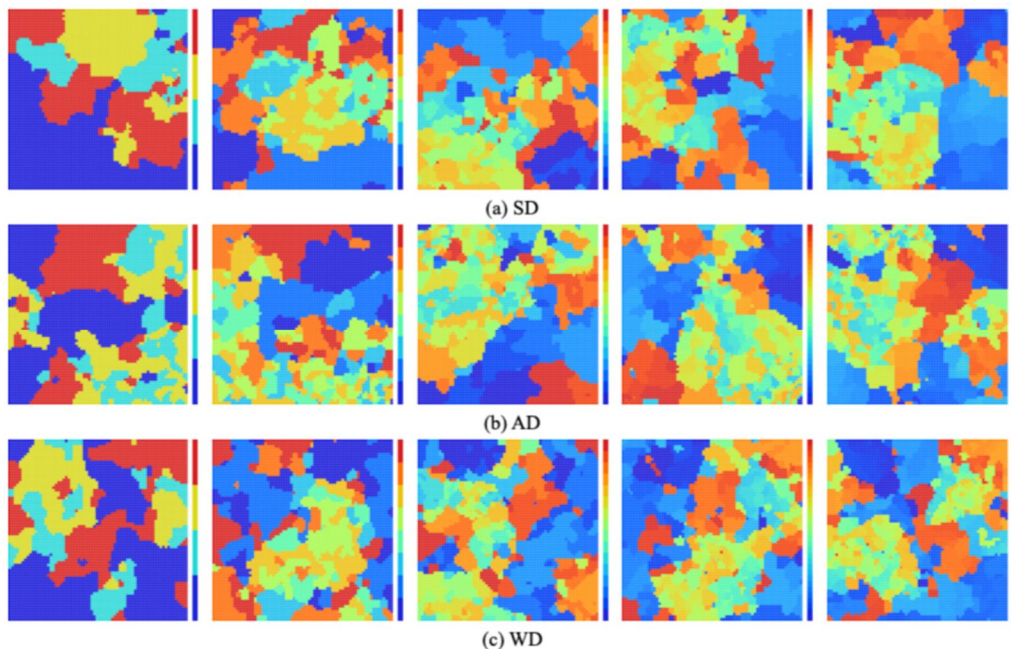


図5. 3条件下でのコンテキストマップ。

#### 4.3. 表情空間マップの生成結果

表情空間マップは、研究代表者らが所属する大学において、20名の学生（男女10名ずつ）から取得した。顔画像を取得することから、事前に学内の倫理審査委員会の承諾を受けて、プライバシーやセキュリティに配慮した。表情画像を含む実験結果は、本報告では割愛するが、20名の被験者の表情から推察される感情価の分布を図6に示す。特に、心理学的指標に基づくアンケートシートから、ポジティブ、ネガティブ、友好的などの指標が抽出されている。また、特異なデータ（図の右下に布置する被験者0）も抽出されたため、アンケート結果を詳細に分析した。このようなラベリングは、教師なし学習を主軸とする図1に示す提案手法から自動的に抽出できる。抽出根拠は、図6に示すカテゴリ境界に基づいている。加えて、本研究では表情との関係性において、視線を追跡した。当該指標は、試作ロボットとのインタラクションとも関連している。

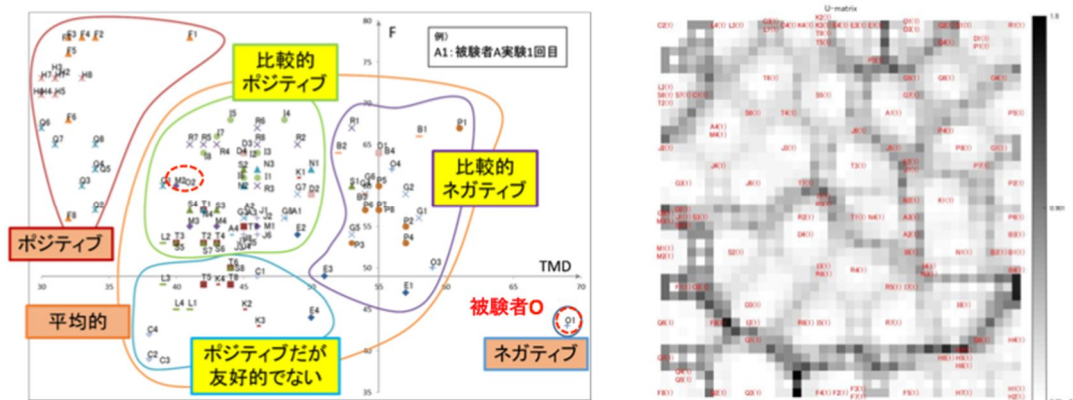


図6. 表情空間マップにおける感情価との対応関係（左）とカテゴリを決定した境界（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Madokoro Hirokazu, Nakasho Kazuhisa, Shimoi Nobuhiro, Woo Hanwool, Sato Kazuhito	4. 巻 20
2. 論文標題 Development of Invisible Sensors and a Machine-Learning-Based Recognition System Used for Early Prediction of Discontinuous Bed-Leaving Behavior Patterns	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1415 ~ 1415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20051415	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 MADOKORO Hirokazu, INOUE Makoto, NAGAYOSHI Takeshi, CHIBA Takashi, HAGA Yumi, KIGUCHI Osamu, SATO Kazuhito	4. 巻 56
2. 論文標題 Prototype Development of Drone System Used for In-situ Measurement of CO2 Vertical Profile and Its Preliminary Flight Test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 37 ~ 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.37	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 Chiba Takashi, Haga Yumi, Inoue Makoto, Kiguchi Osamu, Nagayoshi Takeshi, Madokoro Hirokazu, Morino Isamu	4. 巻 10
2. 論文標題 Measuring Regional Atmospheric CO2 Concentrations in the Lower Troposphere with a Non-Dispersive Infrared Analyzer Mounted on a UAV, Ogata Village, Akita, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 487 ~ 487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos10090487	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 間所 洋和、下井 信浩、佐藤 和人、中正 和久、新村 正明、和崎 克己	4. 巻 J102-D
2. 論文標題 見守りロボットと非拘束センサによる日常生活の簡易モニタリングシステムの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 411 ~ 422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2018JDP7065	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 Madokoro Hirokazu, Sato Kazuhito, Shimoi Nobuhiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Vision-Based Indoor Scene Recognition from Time-Series Aerial Images Obtained Using a MAV Mounted Monocular Camera	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Drones	6. 最初と最後の頁 1~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/drones3010022	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 Madokoro Hirokazu, Sato Kazuhito, Shimoi Nobuhiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Indoor Scene and Position Recognition Based on Visual Landmarks Obtained from Visual Saliency without Human Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics	6. 最初と最後の頁 1~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/robotics8010003	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 K. Sato, M. Sawataishi, H. Madokoro, S. Kadowaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Modeling of Driver 's Distraction State based on Body Information Analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal on Advances in Life Sciences	6. 最初と最後の頁 42~53
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 SHIMO I Nobuhiro, NAKASHO Kazuhisa, CUADRA Carlos, MADOKORO Hirokazu	4. 巻 84
2. 論文標題 Performance test of avalanche measurements fence using piezoelectric limit sensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00244	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 Madokoro Hirokazu, Kainuma Asahi, Sato Kazuhito	4. 巻 126
2. 論文標題 Non-Rectangular ROI Extraction and Machine Learning Based Multiple Object Recognition Used for Time-Series Aerial Images Obtained Using MAV	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 462 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procs.2018.07.280	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 N. Shimoi, K. Nakasho, C. Cuadra, H. Madokoro	4. 巻 7
2. 論文標題 Landslide and Falling Rock Measurement Using Piezoelectric Smart Sensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Science and Engineering Investigations	6. 最初と最後の頁 134 ~ 138
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 H. Madokoro, K. Sato, and N. Shimoi	4. 巻 1
2. 論文標題 Category Maps Describe Driving Episodes Recorded with Event Data Recorders	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning and Knowledge Extraction	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/make1010003	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 N. Shimoi, K. Nakasho, C. Cuadra, M. Saijo, and H. Madokoro	4. 巻 5
2. 論文標題 Avalanche and Falling Rock Measurement Using Piezoelectric Dynamics and Static Sensors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 American Journal of Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 10-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11648/j.ajrs.20170502.11	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 -



〔学会発表〕 計39件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 23件）

1. 発表者名 H. Madokoro, S. Ueda, and K. Sato
2. 発表標題 Semantic Indoor Scene Recognition of Time-Series Aerial Images from a Micro Air Vehicle Mounted Monocular Camera
3. 学会等名 Proc. 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Fukushi, H. Madokoro, and K. Sato
2. 発表標題 Semantic Scene Recognition and Zone Labeling for Mobile Robot Benchmark Datasets based on Category Maps
3. 学会等名 Proc. 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Madokoro, K. Sato, K. Nakasho and N. Shimoi
2. 発表標題 Adaptive Learning Based Driving Episode Description on Category Maps
3. 学会等名 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Savvas G. Vassiliadis監修, H. Madokoro (6章担当)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 146
3. 書名 Piezoelectricity - Organic and Inorganic Materials and Applications	

1. 著者名 間所洋和, 佐藤和人 (2章2節担当)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 528
3. 書名 センサフュージョン技術の開発と応用事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>国際会議「AMBIENT2018」で本学教員が最優秀論文賞を受賞  <a href="https://www.akita-pu.ac.jp/oshirase/oshirase2018/1305">https://www.akita-pu.ac.jp/oshirase/oshirase2018/1305</a>          本学教員がICCAS2018で受賞しました  <a href="https://www.akita-pu.ac.jp/oshirase/oshirase2018/1260">https://www.akita-pu.ac.jp/oshirase/oshirase2018/1260</a></p>
--

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	下井 信浩  (Nobuhiro Shimoi)  (10300542)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授    (21401)	
研究分担者	佐藤 和人  (Kazuhito Sato)  (80390904)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授    (21401)	