

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19769

研究課題名（和文）説明可能AIによるDriver-less作業技能分析手法の実現

研究課題名（英文）Driver-less skill assessment and analysis using explainable AI

研究代表者

前川 卓也（Maekawa, Takuya）

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：50447025

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、説明可能AIを用いて熟練・非熟練者の作業の差異を自動的にあぶり出し、その差異の意味をAIに説明させることを最終目標とし、その実現に向けて基礎的技術の開発とデータセットの収集・公開を行った。具体的には、本研究では以下のような研究項目に取り組んだ。作業行動データからのスキルを含むセンサデータセグメントの自動抽出手法、作業行動分析を可能とする大規模作業行動データセットの構築、作業行動の基礎的分析を可能とする作業行動認識手法。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で行った取り組みの一つとして、産業分野の行動認識・分析のための最大規模のデータセットであるOpenPackデータセットを構築し、公開を行った。作業の際の加速度データやスケルトンデータを収めた50時間以上にわたるデータセットであり、産業行動認識・分析研究の促進に大きな貢献を果たすことが期待される。上記を含む研究成果が当該分野の最難関国際会議であるUbiCompやPerComに多数の論文が採択されるなど、顕著な成果を得た。

研究成果の概要（英文）：The ultimate goal of this study is to use AI to automatically uncover differences between works by skilled and unskilled workers and to have AI explain the meaning of those differences, and we have developed the basic technology and collected and published a data set to achieve this goal. Specifically, we tackled the following research themes in this study: automatic extraction of sensor data segments related to skills from work activity data; construction of a large-scale work activity dataset to enable work behavior analysis; work activity recognition method to enable basic analysis of work activities.

研究分野：ユビキタスコンピューティング

キーワード：行動認識 行動分析 ウェアラブルセンサ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

モノづくりのための CPS(Cyber Physical System)では製造機械から作業員までの情報が全て電子化され、経営判断や製造プロセス効率化に活かされる。特に人間(作業員)による作業は機械のように画一的ではなく、その見直しにより製造効率が大幅に改善する余地がある。既存の多くの取り組みでは、製造ラインの管理者やエンジニアが熟練者と非熟練者の作業を見比べ、その差異に基づいて改善点や作業に潜む熟練者の暗黙知の抽出を行っていた。しかし、製造ラインの多数の作業員ごとにその作業分析を行い改善を行うことはほぼ不可能であった。モノづくり CPSの枠組みで作業の計測・分析・改善のサイクルを(半)自動化することができれば、モノづくりは劇的に変わる。

2. 研究の目的

本研究では、説明可能 AI を用いて熟練・非熟練者の作業の差異を自動的にあぶり出し、その差異の意味を AI に説明させることで、ライン管理者らが従来行ってきた作業分析という知的な作業を自動化する Driver-less 作業技能分析基盤を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的を実現するため、本研究では以下のような研究項目に取り組んだ。

- 作業行動データからのスキルを含むセンサデータセグメントの自動抽出手法
- 作業行動分析を可能とする大規模作業行動データセットの構築
- 作業行動の基礎的分析を可能とする作業行動認識手法

これらの取り組みを通じて、研究成果が当該分野の最難関国際会議である Ubicomp や Percom に多数の論文が採択されるなど、顕著な成果を得た。本報告書では、1 番目および 3 番目に関して詳細に説明する。

4. 研究成果

4.1 作業行動データからの暗黙知の自動抽出手法

本研究では、ライン生産システムに着目し、同じ作業工程を行う熟練作業員と非熟練作業員から収集したウェアラブルセンサデータ(加速度データ)から、技能に関する知識を抽出し、産業技術者による人手による比較分析を支援することを試みた。具体的には、熟練作業員のセンサデータから、スキルに関する知識を含む可能性のあるセンサデータセグメントを自動的に検出し、その瞬間を捉えたビデオ録画とともに産業技術者に提供することを試みた。なお、データ(映像)だけでは、産業技術者がデータに隠されたスキルの意味を理解することは困難であるため、非熟練作業員のセンサデータから対応するセグメントを発見し、熟練作業員のセグメントと一緒に産業技術者に提示した。例えば、熟練作業員のデータからネジ締め作業に対応するセグメントを

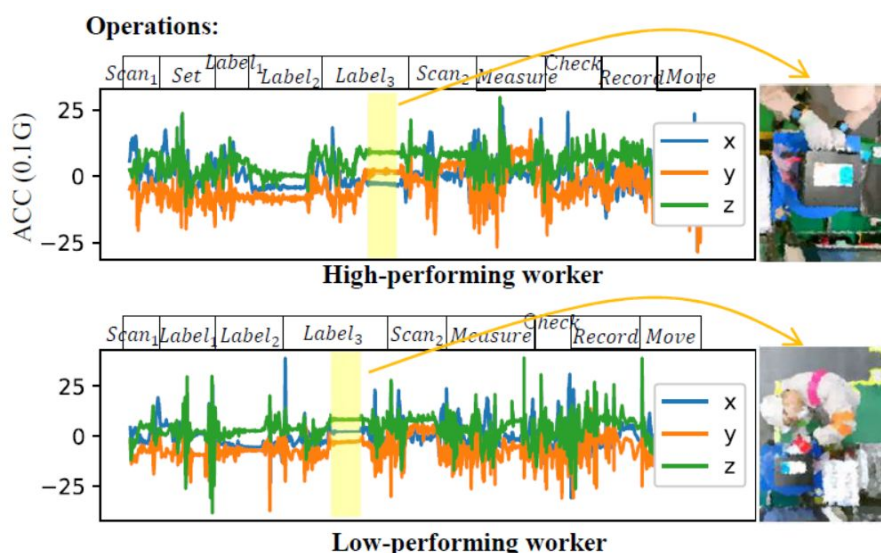


図 1: 作業時のセンサデータから抽出されたスキルに関する知識を含むセグメントの候補(黄色にハイライト)

検出した場合、非熟練作業者のデータからもねじ締め作業に対応するセグメントを見つける。これらのセグメント（録画映像）を比較することで、産業技術者はデータに隠されたスキルの意味を理解することができる。

図1は、提案手法で抽出されたセグメントの例である（黄色でハイライト）。このセグメント（その際の映像）からは、ラベルを貼る際の熟練作業者と非熟練作業者の姿勢の違いが見て取れる。熟練作業者は作業台の高さまで膝を曲げて作業を行う。一方、非熟練作業者は背骨を大きく曲げて作業を行うため、腰痛を患うリスクが高い。産業技術者は、この情報をもとに、非熟練作業者を指導することができる。

この研究には2つの技術的課題がある。第1の課題は、センサデータのみを分析することで、スキルに関する意味のある知識を含むセンサデータセグメントの候補を抽出することである。本研究では、以下の2つの特徴を持つ候補セグメントから、スキルに関する有用な知識を抽出することが可能であると仮定する。

(1) 作業者による作業ピリオドの繰り返しにおいて、それぞれの作業ピリオドのセンサデータは若干異なる。毎回の作業ピリオドに現れるセンサデータパターン（例：特徴的な手の動き）は、対象とする作業プロセスにおいて重要かつ不可欠であると考えられる。(2) 上記のような特徴を持つセンサデータパターンが熟練作業者のデータからしか得られない場合、そのセンサデータパターンがスキルに関連する確率は高い。

上記の特徴を持つ候補セグメントを見つけるために、説明可能な深層学習手法を利用した。深層学習は、産業技術者が作業プロセスごとに手作業で行うような特徴設計を必要としないため、産業技術者は生のセンサデータを深層学習モデルに入力するだけで、目的のセグメントを得ることができる。これが深層学習を用いたアプローチの利点であり、我々の実験では、単純なパターンマッチングのアプローチでは、そのようなセグメントを発見するのは困難であることが明らかになった。

まず、本研究では、1つの作業ピリオドに対応する時系列センサデータを、熟練作業者クラスと非熟練作業者クラスに分類するリカレントニューラルネットワークを構築する。ネットワークは熟練作業者のセンサデータと非熟練作業者のセンサデータを高い精度で識別できるように学習されているため、上記2つの特徴を含むセンサデータパターンを識別できると考えられる。これは、熟練作業者のデータには見られるが、非熟練作業者のデータには見られない（もしくはその逆）センサデータパターンは、分類タスクにおいて重要な手がかりとなるからである。したがって、そのように学習されたネットワークを活用することで、スキルを含む可能性のあるセグメントを自動的に特定することができる。

ブラックボックスであるニューラルネットワークによって特定された重要なセンサデータパターンを特定するために、本研究ではアテンションメカニズムを利用した（図2）。アテンションメカニズムは、時系列の各データポイントの重要度（アテンション）に関する情報を計算するため、スキルに関する知識を含む可能性のあるアテンションの高い候補セグメントを特定することができる。

上記の手順で、熟練作業者から候補セグメントを抽出する。次に、熟練作業者のセグメントに対応する非熟練作業者のセグメントを抽出する。熟練作業者のデータから、ねじ締めに対応する候

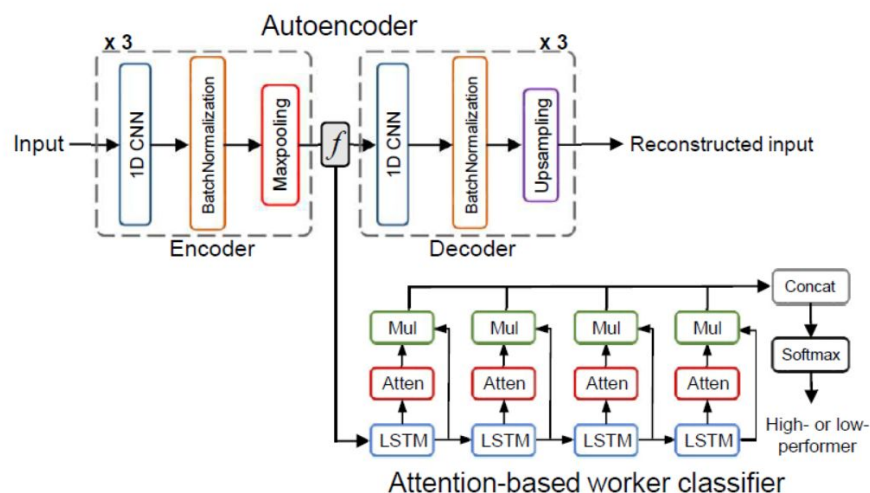


図2：作業に関する知識を含むセグメントを抽出するためのネットワーク

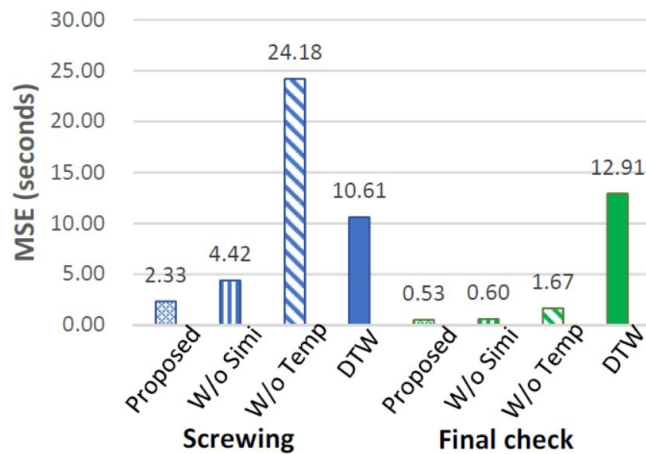


図 3： 対応するセグメントを検出した結果の誤差の比較。

W/o Simi は潜在空間での類似度を使わない手法。W/o Temp は時間的出現位置を考慮しない手法。DTW は単純に信号の DTW 距離を用いて類似したセグメントを見つける手法。

補セグメントが検出されたとする。すなわち、熟練作業者と非熟練作業者では、ねじ締め動作が異なるため、センサデータの類似性を利用して、非熟練作業者からねじ締めのセグメントを見つけることは困難である。この問題を解決するため、アテンション機構を備えるネットワークにオートエンコーダを導入した。オートエンコーダは、元のデータ点の主成分を保持したまま、入力データ点の潜在表現を抽出するため、意味的に類似したセグメント、すなわち同じ操作に対応するセンサデータセグメントを見つけやすくなる。具体的には、潜在空間上での類似度と、そのセグメントの時間的な出現位置をともに考慮して、対応するセグメントを発見する。図 3 は提案手法を用いて対応するセグメントを検出した結果と、正解セグメントとの時間的な誤差の評価結果である。評価結果から、提案手法は小さな誤差で対応するセグメントを検出できていたことが分かる。

また、提案手法が検出したセグメントが実際にスキルに関する知識を含むかどうかの質的な評価を行った。産業技術者が、検出されたセグメントと動画を閲覧し、知識を含むかどうかを判断した。ネジ締めと検品作業のデータセットにおいて、提案手法が抽出した 9 つのセグメントのうち、7 つがスキルに関する知識を含むと判定され、手法の有効性が示された。

4.2 作業行動認識手法

スマートフォンやスマートウォッチなど身体装着型加速度センサを用いた行動認識は、産業ドメインにおいても注目を集めている。工場のライン生産ラインや物流センタでの梱包作業など、工場や物流センタにおける作業は、人間の作業者に大きく依存している。人間の作業者は、機械化が難しい複雑で変則的な作業を担っていることが多く、今後も重要な役割を果たすことが予想される。このような手作業を行動認識技術で定量化することで、作業プロセスの合理化や作業者のパフォーマンス評価などが可能になり、工場の効率化に繋がることが期待される。

図 4 に、実際の工場作業員の左右手首にスマートウォッチを装着して収集した加速度データの例を示す。一連の作業 (period) は複数の作業工程で構成されており、その順序は作業指示書などによってあらかじめ決められている。作業員はその指示に基づいて、同じ作業を繰り返しお

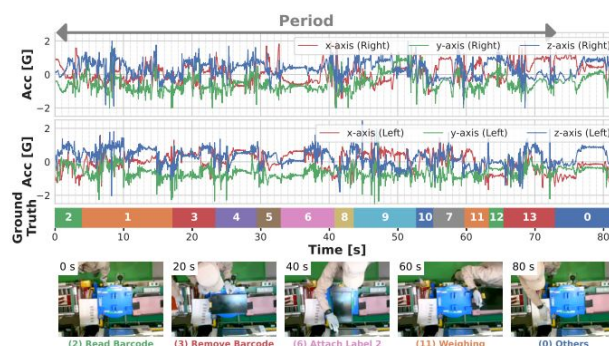


図 4： 作業時の加速度センサデータの例

こなっている。工場などにおける行動認識は、この一つひとつの作業工程を認識することが求められる。ただし、作業工程によって継続時間が大きく異なるため、タイムステップ毎に行動ラベル（作業工程）を推定することが求められる。

工場や物流センタなどに行動認識技術を適用する際の大きな問題として、大量のラベル付きデータの収集コストがある。既存の行動認識モデルは、ニューラルネットワークなどを用いることで高い認識性能を達成しているが、一般に非常に多くの学習データを必要とする。しかし、工場では作業員毎に作業内容が異なる場合が多く、異なる作業員から取得したラベル付きデータの再利用が困難である。また、製品の切り替えや製造プロセスの見直しによって、認識すべき作業工程は絶えず変化する。各作業員からその都度大量のデータを収集しラベリングするコストは、事業者にとって非常に大きな負担である。

図 4 に示すとおり、各行動の加速度データは細かい手の動きに対応する様々な波形で構成されており、複雑である。このような行動を正確に認識するためには、これらの小さな動作をすべて正確に検出することが理想的であるが、その方法では大規模なモデルと膨大な学習データが必要となる。しかし、作業工程の認識にはいくつかの特徴がある。まず、作業工程のセグメンテーションを考えると、各作業工程の最初と最後の動作を正確に検出することが重要であり、必ずしも作業工程を構成する小さな動作を全て捉える必要はない。また、基本的に作業工程にはあらかじめ実行の順序が決められている。順序付けられた行動の認識では、注目する行動の前後の行動に関する情報は、現在の注目する行動を認識するために重要な情報となる。これらの特徴を活用することで、必要とされるラベル付きデータの量を削減することができると考えられる。

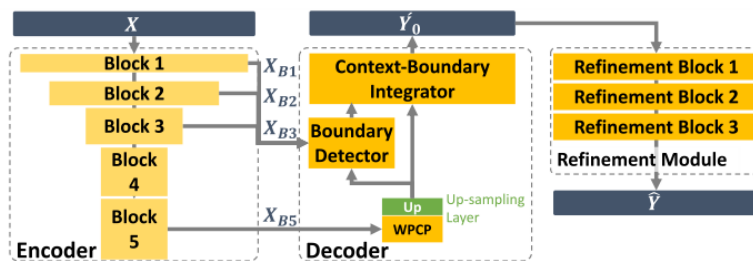


図 5：提案した LOS-Net のネットワーク構成

本研究では、限られた学習データで作業工程の高精度な認識（セグメンテーション）を行うため、重要な特徴を効率的に抽出することができるデコーダと、これを用いた時系列信号のセグメンテーションを行うニューラルネットワーク Lightweight Ordered-work Segmentation Network (LOS-Net) を提案した（図 5）。前述の観点を踏まえ、LOS-Net のデコーダには 2 つの特徴がある。まず、注目点の前後の行動など作業工程の長期的なコンテキストを効率的に抽出するため、Dilated Convolution を活用するモジュール（WPCP module）を導入した。また、連続する行動の境界を正確に検出するため、時間的解像度が高い浅い層の中間出力を活用して境界の推定を行う。抽出した長期的なコンテキストと行動の境界に関する表現を統合することで、各タイムステップの行動を効率的に推定した（boundary detector）。さらに認識精度を高めるために、作業順序に関する事前知識を活用してデコーダの出力を修正するモジュール（refinement module）を導入した。

図 6 に梱包作業の加速度データを用いた際の認識精度（F1 スコア）の結果を示す。LOS-Net が既存手法である ConvLSTM や U-Net を大きく上回っていることが分かる。また、WPCP モジュールの貢献が大きいことも分かる。複雑な作業行動認識には、長期・短期的トレンドを効果的に捉えることが重要であることが示唆された。

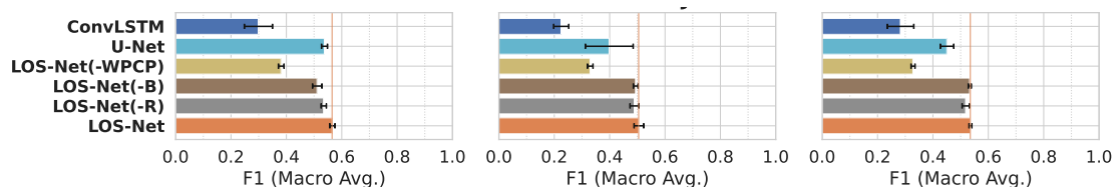


図 6：梱包作業行動認識の認識結果。ConvLSTM は畳み込み層と LSTM 層からなる手法。LOS-Net(-WPCP)は WPCP モジュールを用いない手法。LOS-Net(-B)は Boundary detector を用いない手法。LOS-Net(-R)は Refinement module を用いない手法。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Morales Jaime, Yoshimura Naoya, Xia Qingxin, Wada Atsushi, Namioka Yasuo, Maekawa Takuya	4. 巻 88
2. 論文標題 MGA-Net+: Acceleration-based packaging work recognition using motif-guided attention networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Pervasive and Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 101735 ~ 101735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pmcj.2022.101735	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 Tanigaki Kei, Teoh Tze Chuin, Yoshimura Naoya, Maekawa Takuya, Hara Takahiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Predicting Performance Improvement of Human Activity Recognition Model by Additional Data Collection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies	6. 最初と最後の頁 1 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3550319	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 Yoshimura Naoya, Maekawa Takuya, Hara Takahiro, Wada Atsushi, Namioka Yasuo	4. 巻 6
2. 論文標題 Acceleration-based Activity Recognition of Repetitive Works with Lightweight Ordered-work Segmentation Network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies	6. 最初と最後の頁 1 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3534572	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 Dissanayake Thilina, Maekawa Takuya, Hara Takahiro, Miyanishi Taiki, Kawanabe Motoaki	4. 巻 22
2. 論文標題 IndoLabel: Predicting Indoor Location Class by Discovering Location-Specific Sensor Data Motifs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 5372 ~ 5385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2021.3102916	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yuuki Nishino, Takuya Maekawa, and Takahiro Hara
2. 発表標題 Detecting Repetitive Human Actions by Neural Networks Trained on Composite Data Only
3. 学会等名 Second International Workshop on Behavior analysis and Recognition for knowledge Discovery (BiRD 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥田 隆一郎, 夏 清心, 前川 卓也, 原 隆浩, 井上 創造
2. 発表標題 介護記録の記録漏れを考慮した非周期性行動の予測に関する検討
3. 学会等名 情報処理学会 第76回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 門野 航央, 吉村 直也, 前川 卓也, 原 隆浩
2. 発表標題 産業分野での行動認識における例外的行動が認識結果に及ぼす影響に関する分析
3. 学会等名 情報処理学会 第76回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 直也, 前川 卓也, 原 隆浩, 和田 篤, 浪岡 保男
2. 発表標題 工場・物流センタにおける作業順序を考慮した少量学習データでの作業行動認識手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会 第74回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西野 祐希, 前川 卓也, 原 隆浩
2. 発表標題 Few-shot弱教師あり学習を用いたウェアラブル加速度センサによる動作カウント手法
3. 学会等名 情報処理学会 第74回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jaime Morales, Naoya Yoshimura, Qingxin Xia, Atsushi Wada, Yasuo Namioka, Takuya Maekawa
2. 発表標題 Acceleration-based Human Activity Recognition of Packaging Tasks Using Motif-guided Attention Networks
3. 学会等名 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qingxin Xia, Atsushi Wada, Takanori Yoshii, Yasuo Namioka, Takuya Maekawa
2. 発表標題 Comparative Analysis of High- and Low-Performing Factory Workers with Attention-Based Neural Networks
3. 学会等名 18th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuuki Nishino, Takuya Maekawa, Takahiro Hara
2. 発表標題 WeakCounter: Acceleration-based Repetition Counting of Actions with Weakly Supervised Learning
3. 学会等名 International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Yoshimura, Jaime Morales, Takuya Maekawa, and Takahiro Hara
2. 発表標題 OpenPack: A Large-scale Dataset for Recognizing Packaging Works in IoT-enabled Logistic Environments
3. 学会等名 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024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

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
---------	---------