

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03228

研究課題名（和文）日常生活に耐えうる携帯機器の所持位置推定とその応用

研究課題名（英文）Robust on-body device localization and its applications

研究代表者

藤波 香織（Fujinami, Kaori）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10409633

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はスマートフォンに代表される携帯機器を所持する際の自由度を上げることを目的とした。その中で、1) 分類器の2階層化とアンサンブル分類器構成により多様な行動の最中における高精度な所持位置認識、2) 新規性検出とクラスタリング技術の利用によるユーザの手に渡った後でそのユーザ独自の所持位置を認識対象に追加する仕組み、3) 既存の分類器と新規ユーザとの相性を用いて分類器を選択したのちに能動学習によりユーザ自身が認識器を強化する仕組み等を考案して有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ズボンや上着のポケット、鞆の中など様々な場所での持ち運びを許容しながらも、内蔵されたセンサからのデータの利用や、振動や音で情報を伝達するアプリケーションの動作に影響を与えないようにするための「所持位置推定システム」の実現に繋がる。特に、従来からの課題であった歩行時以外の様々な行動の最中の認識と、利用者の携帯機器利用パターンに合わせた認識対象の追加が可能になるため、所持位置適応型システムの日常生活の中での適用範囲が広がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to increase the degree of freedom in carrying portable devices such as smartphones. The major achievements in this study are summarized in the following three topics: 1) a two-tiered classifier and an ensemble classifier structure to recognize the device carrying position with high accuracy during various activities, 2) a combination of novelty detection and clustering techniques to register the user's inherent carrying position as the recognition target on-the-fly, and 3) an active learning method that integrates selection of a core classifier that has the largest compatibility with the user in candidate classifiers.

研究分野：ユビキタスコンピューティング

キーワード：携帯機器所持位置認識 行動認識 コンテキストウェアネス スマートフォン 能動学習 機械学習
加速度センサ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

スマートフォン (以下、スマホ) やインフルエンザ警告器、活動量計のような携帯機器は、把持やズボンのポケットや鞆に入れて運ぶために、所持位置により機器に搭載されたセンサや出力機能は影響を受ける。このため、ズボンのポケットでは警告レベルが過小評価になるとともに胸ポケットで聞こえた警告音が聞こえないことや、上着のポケットでは識別不能な行動がある、といった不具合が生じることがある。よって「所持位置」の正確な推定は、システムの信頼性を保つうえで欠かせない。このため、機器搭載のセンサで捉えた所持位置特有の姿勢や動きから所持位置を推定する所持位置推定問題が注目されている。利用するセンサの組み合わせや推定特徴量に関する様々な提案がされてきたものの、歩行や直立を中心とした限定的な状態での推定に留まっており、日常に見られる多くの身体状態 (例、窓拭き、仰臥) の頑健な推定には至っていなかった。また個人差が大きく、現時点で世界最高水準と考えられる申請者らの手法においても汎化推定性能は 90%前後であり、用途を考えると更なる改善が必要であった。

一方、個人から収集したデータに基づき構築 (教師付学習) した個人特化型の所持位置推定器は非常に高精度 (ほぼ 100%) であるが、一般利用者から訓練用データを収集することは簡単ではない。周辺分野では、能動学習の適用による利用者介入の削減や、訓練用データのラベル想起の支援などの利用者負担の軽減技術が存在する。しかし、これらは個人特化行為に利用者が参加した後の支援であり、参加そのものの動機付けに関する研究は見当たらなかった。

また、携帯機器の所持位置にも個人差は見られ、従来からあるような事前に分類対象を決定したうえで分類器を学習する方法では、対応できない所持位置を使用する利用者が存在する可能性がある。加えて、多くの方は数カ所しか使用しないために、はじめから最小公倍数的に多くの所持位置を対象とすることはデータ収集コストや精度の点で望ましくない。このため、利用最中に未対応の所持位置を検出したときに随時、対象に加える方法が望ましいと考えた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、以下を目的として研究に取り組んだ。

- (1) 日常の様々な身体状態でも頑健に所持位置を推定する手法の開発
- (2) 大幅な精度向上のために、積極的に利用者に関わらせて推定器の個人特化を行う手法の開発
- (3) 逐次的に推定対象となる所持位置を追加する機構の開発

3. 研究の方法

以下に主要な取り組みの実施方法を述べる。

- (1) データセット作成 (2-(1)に対応)

まず日常生活で見られる様々な行動や身体状態下で無線加速度センサを身体の 7 箇所 (左右の上腕の外側・手首の外側、左右の太もも、胸部 (みぞおち付近)。図 1 参照) に固定してデータ収集を行った。インターネット上でも身体装着センサを用いて得られたデータセットが公開されているが、行動の種類が少なかったりセンサが少なかったり身体部位に非対称にしか装着されていなかったりと、本研究で使用する条件を満たしていないため、

表 1 に示すような、歩く、走るといった基本行動を始め、珈琲を淹れる、掃除機をかける、皿を洗うなど日常生活に見られる多様な 23 種の身体状態を独自に定義して、12 分ずつ収集した。



図 1 センサの装着箇所

- (2) 階層型アンサンブル分類器によるセンサ位置認識精度向上 (2-(1)に対応)

認識精度を向上するために単一の分類器で 7 クラス (箇所) に分類するのではなく、認識を 2 段階に分けて 1 段階目で行動や身体状態が類似するクラスに分類したのち、2 段階目で個別に 7 クラスに分類する階層化の有効性と最適な構造を明らかにした。まず、

(1) で収集対象にした日常に見られる行動を、静止系行動と運動系行動の 2 クラスに分けたり、手を上に動かす行動、手を下に動かす行動、移動系の行動、着座系の 4 クラスに分けたりするなど、階層の 1 段

表 1 収集した 23 種の行動と略称

歩行(W), 走行(R), 自転車に乗る(BK), 洗顔(WF), 手洗い(WH), 歯磨き(TB), 配膳(ST), 珈琲をいれる(MC), 食事(立位)(E _{std}), 食事(着座)(E _{sit}), 掃除機掛け(VC), 階段上る(US), 階段降りる(DS), コップで水を飲む(着座)(DW _{sit}), コップで水を飲む(立位)(DW _{std}), 皿洗い(WD), PC使用(着座)(PC _{sit}), スマホ使用(立位)(SP _{std}), スマホ使用(座位)(SP _{sit}), 読書(着座)(RB), 白板を消す(EW), 白板に書く(WW), 上着の着脱(WJ)
--

目の構成方法を変更した (図 2). 2 段目の分類器は前述の例ではそれぞれ 2 つ, 4 つ存在し, それぞれが 7 箇所の所持位置分類を行う. 図 2(c)に 2 段目の分類器を構成する単位のバリエーションを示す.

また, 1 段目の分類結果の統合方法についてはグループに対応した所持位置分類器の出力である事後確率を 1 段目の分類時の事後確率を重み付けして加算する Weighted soft-voting アンサンブル分類 (WSVEC) をベースに, アンサンブル対象の上位分類器を選択する Selective WSVEC (SWSVEC), クラス事後確率が最高となる上位グループに対応した所持位置分類器を 1 つ選択する 1-most probable 分類 (1MPC) などを比較した. 図 2(b)は WSVEC を定式化したものであり, N 個の 2 段目分類器がそれぞれ判定した所持位置の確からしさを, 1 段目分類器から得られる行動グループ分類の確からしさを重みとして加え, 最も高い値となるクラス (P_{S_k}) を所持位置と判断する. SWSVEC は確からしさが一定値以上の $M (< N)$ 個の分類器を用い, 1MPC は 2 段目分類器を最も w_i が大きかったものに絞って利用する手法である. オフライン実験プログラムは, 構造の類似性を考慮して, 実験条件毎の差分開発が可能になるよう設計した.

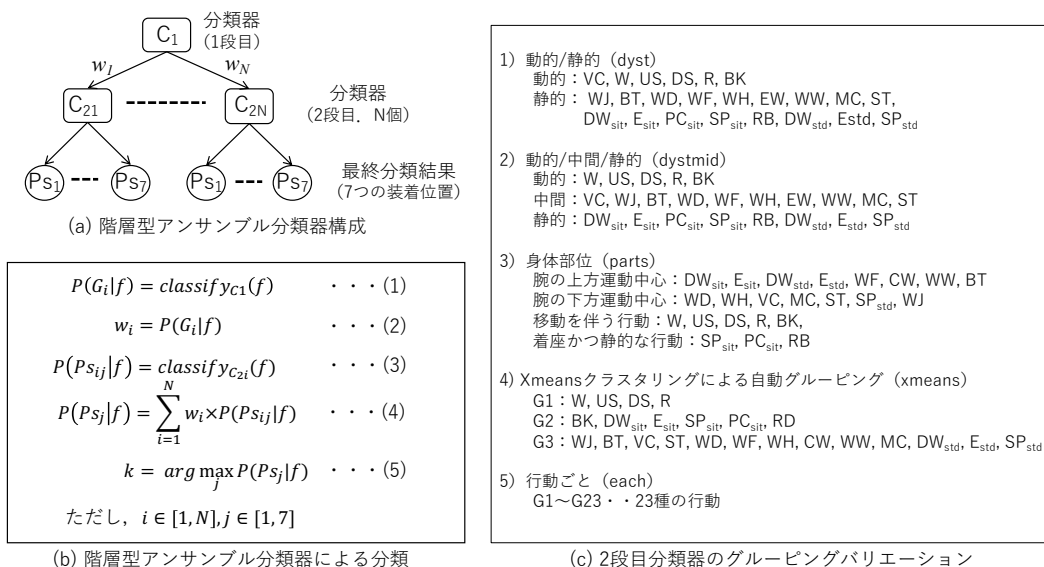


図 2 階層型アンサンブル分類器による所持位置推定

(3) 相性にもとづく所持位置推定器の選択による精度向上 (2-(2)に相当)

従来の行動認識においては多人数から得たデータを元に単一の推定器 (分類器) を学習により構築してそれを全てのユーザが使用するというモデル (One-fits all; OFA) が一般的であったが, 比較的少数の人のデータで構築した多数の分類器の中から「相性」が良いものを選択して使用することで推定精度向上を図る手法 (Compatibility-based Classifier Personalization; CbCP) を提案した (図 3). まず相性を用いる有用性を検証し, 利用者が少ない行動種別のデータ提供で済み効率的な相性判定が可能な手法を 2 種類考案した. 1 つ目は, 全クラスを使った時と 1 つのクラスのみを使った時の相性の差が小さいことを「有効」と定義するもので差分ベースの方法と呼ぶ. 2 つ目は全てのクラスを用いた時の相性値と任意のクラスを用いた時の相性値の相関が高いことを「有効」と定義するもので相関ベースの方法と呼ぶ. 有効なクラスから順にそのデータを相性計算に用いて, 全てのクラスのデータを用いた時と同等の分類精度になるクラス数を検証した. 本研究では分類対象のデータを候補となる分類器に適用したときの F 値を相性とした.

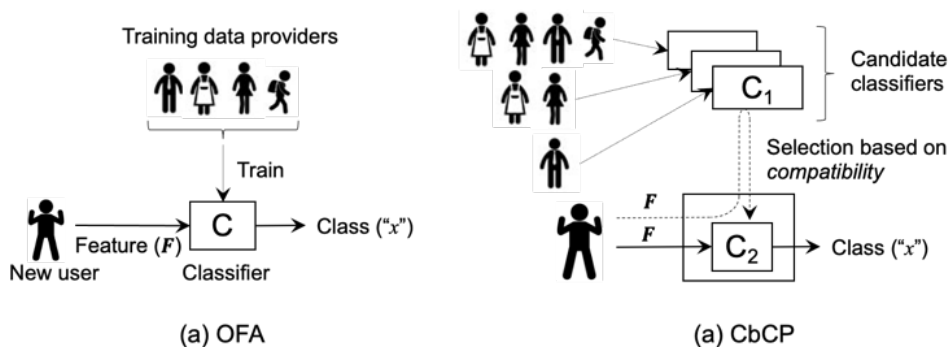


図 3 (a)従来型の分類方式 (OFA) と (b)提案手法 (相性にもとづく分類器選択; CbCP)

(4) 相性にもとづく分類器選択による能動学習の加速 (2-(2)に対応)

能動学習は半教師付学習の一つの手法であり、分類境界付近のサンプルを選択して人間に正解ラベルを問い合わせることで効率的に分類器を強化(個人化)する手法である。能動学習は最初に「核」となる分類器が必要となるが、この核を(3)で決定する相性が良い分類器とすることで、十分に高精度に訓練されるまでの時間を短縮することを狙った。ラベル付け対象のサンプルの選定方法の一つとして一定数のサンプルを保持した後にその中から最も分類境界が不確かなものを選択するプールベースの手法を用いた。一般的な不確実性を表す指標には様々なものが考案されているが、一般にドメイン依存である。本研究では3種類の代表的な指標(Least Confident (LC), Margin Sampling (MAR), Entropy (ENT))を適用した。ベースラインとして問合せサンプルをランダムに選択する手法(Random Sampling (RND))を用いた。評価では、一定の精度(F値=0.95)に達する(収束する)までの問い合わせ回数に着目した。

(5) 新規性検出とクラスタリングによる新規の所持位置の逐次検出と追加 (2-(3)に対応)

図4に示すような機能構成を考案した。新規性検出部(A)はセンサから得られるストリームデータに対して、そのセンサの装着位置が既知か否かを教師付機械学習法の1つである新規性検出(Novelty Detection; ND)技術を用いて判定する。既知と判断された場合には、所持位置認識部に渡され既知のNクラスのいずれかに分類される。一方、未知(新規)と判断された場合には、仮クラス抽出部(D)から取得されるまで未知サンプルプール(C)に保存される。仮クラス抽出部は、未知サンプルプール中の未知データに1つ以上の新規クラス(所持位置)があると仮定して、クラスタリングによりK個のクラス(仮クラス)に分ける。仮クラスはユーザに提示されて当該クラスに属するデータも合わせて新たな所持位置のラベルを付与されると、Bの所持位置認識器は再学習され、一連の新規所持位置追加処理が完了する。

特に、新規性検出部(A)、仮クラス抽出部(D)の実現方法の検討を重点的に実施した。新規検出部では、アンサンブル型NDを提案した。アンサンブル型NDは、アンサンブル分類器の実現方法に着想を得たNDであり、複数の弱検出器が同時に新規性判定を行い、一定数以上が「新規」としたときに最終判定として「新規」とするものである。本研究では、単純な多数決ではなくデータ駆動の決定方法を考案した。また、仮クラス抽出部では、仮クラス数についての情報が無いという条件下で最適なクラス数を決定する手法として、クラス数を事前に設定する必要が無いDBSCAN(Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise)の制御パラメータ ϵ を既に取得している既知クラスのデータから決定する手法を考案した。3つのデータセットを用いてデータセット非依存性を検証した。

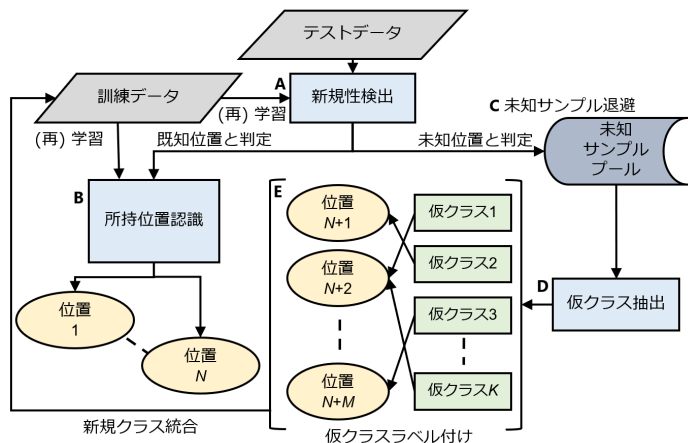


図4 新規所持位置の逐次検出・追加フレームワーク

(6) ゲームフィクションによるデータ収集促進 (2-(2)に対応)

個人特化のためにシステムに関わらせる動機付けとしてゲーム要素を用いたゲームフィクションの導入方法を検討した。仮想キャラクタをベースとし、貢献したデータ量に応じて仮想キャラクタが成長するための食べものを取得できたり、その餌をやる権利を獲得できたり、一定量の餌補給後に異なる容姿に進化したり、複数人で個々の仮想キャラクタの育成状況を共有することで競争意識を持たせる、といった要素を導入した(図5)。なお、収集対象の困難度合いに応じてデータ量のポイントを2倍とすることで、困難な収集のさらなる動機付けも狙った。

Android 端末とクラウドシステムを用いた実験システムを構築し、4名の被験者からなる4日間のユーザ評価を実施した。

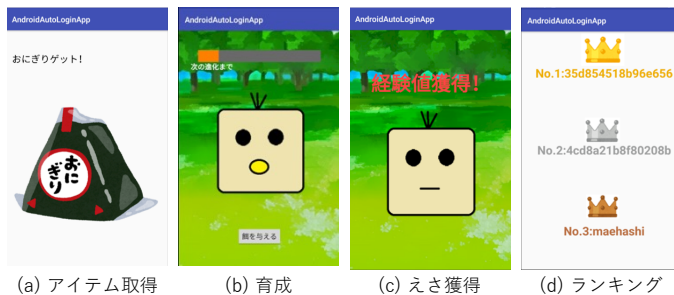


図5 データ収集促進のためのゲーム要素の例

4. 研究成果

上記の(1)から(6)の取り組みに対して得られた成果をまとめる。

(1) データセット作成

22~25才の男女14人(男性9名, 女性5名)から表1にある23種の行動を各12分間収集し, トータルで約64時間分に相当する量のデータを収集することができた。

(2) 階層型アンサンブル分類器によるセンサ位置認識精度向上

表2にグルーピング方法による分類性能の違いを階層構造ごとに示す(一人抜き交差検証で得られたF値の14人の平均)。また, 非階層構造の分類器を用いた場合は0.844となった。これらのことから, dystmidやxmeansのような3群に分けるグルーピング方法がいずれの階層型分類器構成でも, 非階層型より精度が高かった。また, WSVEC・SWSVECの方が1MPCより全般的に高いことから, アンサンブル型の有効性を確認できる。

表2 グルーピング方法および階層構造による分類性能(F値)の違い

階層構造	dyst	dystmid	parts	xmeans	each
WSVEC	0.845	0.848	0.846	0.847	0.843
SWSVEC	0.845	0.848	0.846	0.847	0.843
1MPC	0.843	0.844	0.839	0.844	0.825

(3) 相性にもとづく所持位置推定器の選択による精度向上

データ収集を行う必要があるクラス数を3割程度削減しても全てのクラスを用いて分類器選択を行ったときと同等の精度を得られ, なおかつ相性によらない単一の分類器を用いる一般的な方法と比べて3~6%精度が向上することを確認した。さらに, 階層的な分類器構成は相性を強く反映することができ, より高精度な分類が可能となることを確認した。

(4) 相性にもとづく分類器選択による能動学習の加速

表3にF値が0.95に達するまでに要するユーザへのラベル付け依頼回数を示す。本実験は問合せされたユーザが正しいラベル付けをできるという前提で, データセットに予め付与されているラベルを与えて再訓練を行っている。OFAは相性を用いない単一分類器を核として能動学習を行う従来手法であり, CbCPは3-(3)で提案した利用開始時に相性が良い分類器を核として選択する方法である。OFAにおいて最も収束速度が速かったMargin-sampling(MAR)をCbCP時に用いている。この表より, CbCPに能動学習(MAR)を組み合わせることで, 単一分類器で最も収束速度が速いものと比べて2/3ほどになっていることが分かる。

また, 相性値と問い合わせ回数の散布図から相関係数を求めると-0.531となり, 有意な負の相関を確認した。このことは, 相性値が大きい核を始めに選ぶほど, 問い合わせ回数を減らして高速に高精度な分類器を構築できる可能性を示唆している。

表3 F値0.95に達するまでの問い合わせ回数[回](OFA:相性不使用, CbCP:相性使用)

OFA-MAR	OFA-LC	OFA-ENT	OFA-RND	CbCP-MAR
46.8	53.2	63.6	124.4	31.7

(5) 新規性検出とクラスタリングによる新規の所持位置の逐次検出と追加

図4中Aのアンサンブル型NDにおける「判定閾値」の決定については, 既に所有しているラベルが付いたデータを用いてCross validation(交差検証)の方法で様々な判定閾値を変えたときの検出精度(Normalized Accuracy)の中で最大値となる閾値を採用する手法は, 非アンサンブル型や過半数となる値を採用する単純多数決と比べて精度がそれぞれ27%, 5%向上した。また理論値の99.7%となり, ほぼ理論値となる閾値を選択できることも分かった。

一方, 図4中Dの仮クラス抽出部に関しては上記のアンサンブルNDにおける閾値決定法と同様に交差検証の考え方を用いて ϵ を見積もることで, 検証用データ中に含まれている実際のクラス数と内訳に近い仮クラスを抽出できることを確認した。

以上のことから, 利用開始時には多くの人に共通して用いられる所持位置を認識できるようにしておき, 利用中にそのユーザに特化した所持位置を動的に発見して再学習することで, 逐次的に推定対象を拡大することが可能になると考えられる。

(6) ゲーミフィケーションによるデータ収集促進

図5に示したゲーミフィケーションシステムを用いてデータ収集実験を行ったところ, ゲーム要素を持たせたシステムの方が持たないシステムと比べて, データ収集時間は一人あたり588秒長く, 2.6倍増加した。一方, 実施をためらうようなクラスのデータ収集の動機付け効果は確認されなかった。より大規模で長期的な実験を行い, ゲーム要素毎の効果も検証する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mitsuaki Saito, Kaori Fujinami	4. 巻 21
2. 論文標題 New Position Candidate Identification via Clustering toward an Extensible On-Body Smartphone Localization System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	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） 10.3390/s21041276	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 Trang Thuy Vu, Kaori Fujinami	4. 巻 32
2. 論文標題 Personalizing Activity Recognition Models by Selecting Compatible Classifiers with a Little Help from the User	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2999 ~ 3017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2917	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 Mitsuaki Saito and Kaori Fujinami	4. 巻 32
2. 論文標題 Unknown On-Body Device Position Detection Based on Ensemble Novelty Detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensor and Materials	6. 最初と最後の頁 27-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2585	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19件（うち招待講演 1件/うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Mitsuaki Saito, Kaori Fujinami
2. 発表標題 Applicability of DBSCAN in Identifying the Candidates of New Positions in On-Body Smartphone Localization Problem
3. 学会等名 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsuaki Saito, Kaori Fujinami
2. 発表標題 New Class Candidate Generation Applied to On-Body Smartphone Localization
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Activity and Behavior Computing (ABC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斎藤光明, 藤波香織
2. 発表標題 携帯機器の所持位置認識対象を逐次追加する機構の実利用を想定した評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ヒューマンプロブ研究会 第24回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuaki Saito and Kaori Fujinami
2. 発表標題 Evaluation of Novelty Detection Methods in On-Body Smartphone Localization Problem
3. 学会等名 The 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Trang Thuy Vu and Kaori Fujinami
2. 発表標題 Examining Hierarchy and Granularity of Classifiers in Compatibility-based Classifier Personalization
3. 学会等名 The 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuaki Saito and Kaori Fujinami
2. 発表標題 Extensible On-Body Smartphone Localization: A Project Overview and Preliminary Experiment
3. 学会等名 The 17th International Conference on Pervasive Intelligence and Computing (PICom 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaori Fujinami, Trang Thuy Vu, and Koji Sato
2. 発表標題 A Framework for Human-centric Personalization of Context Recognition Models on Mobile Devices
3. 学会等名 The 17th International Conference on Pervasive Intelligence and Computing (PICom 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤光明, 藤波香織
2. 発表標題 アンサンブル型Novelty Detectionによる未知の携帯機器所持位置の検出
3. 学会等名 情報処理学会 コピキタスコンピューティングシステム研究会 第62回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Trang Thuy Vu, Kaori Fujinami
2. 発表標題 Understanding Compatibility-based Classifier Personalization in Activity Recognition
3. 学会等名 The 1st International Conference on Activity and Behavior Computing (ABC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaori Fujinami
2. 発表標題 Facilitating Unmotivated Tasks Based on Affection for Virtual Pet
3. 学会等名 The 1st International Workshop on Pervasive Persuasive System for Behavior Change (PerPersuasion2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤光明, 豊増聖実, 藤波香織
2. 発表標題 携帯機器の所持場所認識対象の逐次追加のための新規検出の適用性検証
3. 学会等名 第81回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤波香織
2. 発表標題 モバイル端末とAI技術による人間と環境の状態把握
3. 学会等名 第7回はむらイブニングサロン (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Md Atiqur Rahman Ahad, Sozo Inoue, Daniel Roggen, Kaori Fujinami	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer, Singapore	5. 総ページ数 306
3. 書名 Activity and Behavior Computing	

〔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	中島 達夫 (Nakajima Tatsuo) (10251977)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

	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
研究協力者	ブー・トゥイ トラン (Vu Thuy Trang)		
研究協力者	齋藤 光明 (Saito Mitsuaki)		
研究協力者	豊増 聖実 (Toyomasu Seiji)		
研究協力者	皆川 智 (Minagawa Satoru)		

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