

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11992

研究課題名（和文）高い作業貢献感を育む組み立て作業支援システムに関する研究

研究課題名（英文）A Study on Assembly Work Support System to Foster High Sense of Work Contribution

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、組立作業者の技能レベルに応じた支援の提供に向け、作業中の困惑状態（迷い状態）を推定する手法と、エージェントの視線誘導による支援手法を開発した。迷い状態推定では、視線や手の位置関係、皮膚電気活動を基に、迷いの有無や部品探索・取り付けの強弱を推定する教師付機械学習モデルを構築した。迷いの有無と種別の3クラス分類で最良F値0.735を達成し、手と視線の位置情報の有効性を確認した。5クラス分類ではF値0.533となった。エージェントの視線誘導では、身体性の有無と誘導効果や印象を評価し、エージェントの有効性を確認したが、エージェント間の印象の差はほとんどなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

組立作業中の「迷い」という主観的な人間の内部状態を視線や手の位置といった外部から観測可能な情報を用いて0.7程度の精度で推定するモデルの構築方法を明らかになった。また、部品探索効果を上げるためのエージェントの視線誘導方法が明らかになった。このことは、今後、多品種少量生産の組立作業中に適切な支援を行うシステムの実現につながり、労働力不足の解消に貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：This study developed a method to estimate the state of confusion during assembly work to provide support tailored to workers' skill levels. A subtle support method using gaze guidance by an agent was also investigated.

A supervised machine learning model was constructed based on the positional relationship between gaze and hand and electrodermal activity to estimate confusion. The best F1-score of 0.735 in 3-class classification (presence/absence of confusion and type) confirmed the effectiveness of histogram information of hand and gaze positions. The 5-class classification yielded an F1-score of 0.533.

For gaze guidance by agents, the effectiveness of the agent compared to conditions without an agent (only video-based instruction) was confirmed, considering the presence of physicality, i.e., robot and CG agent, and its impact on guidance and impressions. It was also found that there was little difference in impressions between the two types of agents.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：内部状態推定 組立作業 機械学習 エージェント 認知負荷

### 1. 研究開始当初の背景

近年、パソコンやモーターなど様々な機器の生産において、一人または複数の作業員によって製品を組み立てから完成まで行う作業方式である「セル生産方式」が導入されている。この方式は多くの技能を要するため、非熟練者でも容易に業務に従事できるよう、作業順序や作業箇所、注意点のような情報を効果的に伝達する作業支援システムの研究が盛んである。

そこでの研究の目的は低認知負荷な情報伝達による生産性向上であり、拡張現実感 (AR) 技術における支援情報の表現やその実世界への重畳技術などの研究が進められてきた。AR 技術による認知的支援により、紙や動画の作業指示と比べて作業効率の向上やヒューマンエラーの低減が報告される一方で、「機械に操られている」、「自分の技能が信用されていない」といった貢献感の欠如によるとみられる不快感を与えた例も報告されている。このような感情は作業員の意欲を低下させ、生産効率低下や作業精度悪化、さらには事故や違反にもつながりかねないが、個人の生産効率の最大化が目的である従来の作業支援システムでは考慮されてこなかった。これらの知見は、作業員の技能レベルに応じて支援方法を変えることで、作業効率を高く保ちながら心地よく作業に取り組める環境の実現可能性を示唆しているが、その設計原理は明らかではなかった。

本研究では、組み立て作業の従事者が生産活動に対する高い貢献感を持ち意欲的に作業に取り組めるようなスマート組み立て作業支援システムの設計原理の一端を明らかにすることを目指した。

### 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) 技能レベル推定の前段階となる作業中の困惑状態 (迷い状態) 推定手法の開発
- (2) エージェントによる支援手法の開発

### 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) 迷い状態推定モデルの訓練および評価用データセット作成 (2-(1)に対応)

迷い状態の推定機能は、教師付き機械学習により実現することとした。推定モデルの訓練や性能評価において正解ラベルが付いたデータ (ラベル付きデータセット) が必要であり、その収集を行った。組立作業支援の研究で用いられることが多い LEGO ブロックを用いた模擬組立タスクを 4 種類設定した。各タスクは部品の「探索/取り出し」(以下、探索) と「取り付け」の 2 つのステップと呼ばれる単位作業が 10 ステップずつ交互に現れるという前提を設けた。20 代の大学学部生および大学院生計 16 名 (男性 9 名、女性 7 名) がデータ収集に参加し、同一のタスクを連続して 3 回繰り返し、4 種のタスクを行った。被験者はステップを終えるごとに表 1 の基準に従い自身が感じた迷いの程度を 0 から 4 の 5 段階で申告した。レベル 0 は「迷い無し」、レベル 1 を「迷い弱」、レベル 2~4 を「迷い強」とグループ分けした。迷いの有無のみを分類する際はレベル 1~4 を「迷い有り」とした。迷いの種別は、実験タスク中のステップの構成が探索・取り付けが交互に現れることから、実施したステップの番号を元にラベル付けした。ただし実利用では必ずしも交互ではないため、ステップ番号はあくまでデータセット作成時のみ迷い種別を表す情報となる。

作業環境として図 1 に示すように 15 個の部品箱、作業手順書を提示するモニタ、完成図、作業台を配備し、計測装置として装着型視線計測装置 (Pupil Lab 社 Pupil Core)、リストバンド型生体情報計測装置 (Emphatica E4)、卓上での様子を撮影するカメラ (Web カメラ) を用いた。

表 1 迷いのレベルの主観的評価基準

レベル	評価基準
0	とても分かりやすく、すらすらできた。
1	やや分かりにくいですが、確認は少なかった。
2	分かりにくく、確認も多かった。
3	とても分かりにくく、ミスもあった。
4	とても分かりにくく、やりきれなかった。

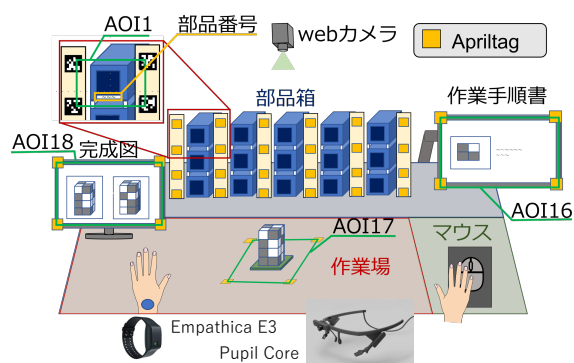


図 1 模擬組立作業環境

(2) 迷い状態推定アルゴリズム開発 (2-1) に対応)

収集できたデータ量 (時間) は、ディープラーニングベースの推定を行うには不十分であるため、比較的少量で推定可能な伝統的な機械学習アプローチ、すなわち特徴量を算出したうえで推定モデルに入力するアプローチを取った。特徴量は、(a) 視線および手の位置関係由来、(b) 皮膚電気活動 (Electrodermal activity (EDA)) 由来の 2 群に大別した。なお、視線の位置は視線計測装置から出力される XY 座標をそのまま用いるのではなく、部品箱、作業手順書領域、完成図領域、作業台領域に対して予め設定した 18 個の矩形領域 (関心領域; Area-Of-Interest (AOI)) への滞在情報を用いることとした。これにより、頭部の変動や計測誤差に頑健で「迷い」の本質的な特徴のみを捉えることを狙った。手の位置に関して同様に Web カメラで取得し手の画像から重心位置を検出し、それが部品箱全体、作業台領域、マウス領域のいずれにあるかという情報を用いた。特徴量として、AOI 間の遷移を表す遷移行列 (306 次元)、遷移を有向グラフと見なしたときに得られるグラフ特徴量 (108 次元)、視線と手の位置関係をヒストグラムで表現した特徴量 (視線位置 (7 次元)、手の位置 (3 次元)、視線と手の共起 (19 次元)) の合計 433 次元を使用した。なお、分類対象クラスは 5 つあるが、始めに「迷い無し (UC)」、「探索の迷い (C\_SRCH)」、「取り付けの迷い (C\_MNT)」の 3 つに分類したうえで、探索または取り付けの迷いが検出された場合には、個々の迷い種別に対応した分類器 (C<sub>21</sub> および C<sub>22</sub>) でさらに強弱 (ST/WK) を分類するといった階層的な分類器構成 (図 2) を導入し、非階層型との比較を行った。

一方、EDA 由来の特徴量は 4Hz でサンプリングした時系列データから固定長のウィンドウを作成し、ウィンドウ内の平均の傾きのように波形を表現する特徴量と平均や分散などの統計量を表す特徴量の合計 11 次元を使用した。

いずれのセンサを用いた分類手法においても、特徴量を入力とし、分類した迷い種別および強度を出力する分類器は標準的な Random Forest (RF) や Support Vector Machines (SVM)、多層パーセプトロン (Multi-Layer Perceptron (MLP)) 等を使用し、10 分割交差検証 (ALL)、一人 (一タスク) 抜き交差検証 (LOPO/LOTO-CV)、個人およびタスク特化型交差検証 (PerPerson (PP)/PerTask (PT)-CV) といった利用シナリオで交差検証方法を用いてオフライン評価した。

(3) 迷い状態推定システム開発 (2-1) に対応)

視線および手の位置関係を使用した推定処理においては、オフライン評価だけでなく実際に作業ステップごとに推定結果を実時間で出力するシステムを実装した。視線計測装置およびウェブカメラから検出された位置情報はデータベースに蓄積され、ステップごとに取り出されて上述の特徴量を計算した上で、迷い分類器に与えられる。分類器の出力に対して、「棄却オプション機構 (Reject-option mechanism)」と呼ばれる、分類結果に付与される事後確率から計算される指標 (棄却指標  $R$ ) が一定の閾値 ( $th$ ) を下回った場合には信頼できない結果と見なし採用しない (棄却する) という処理を加えることで、誤った推定結果を後続のアプリケーションで使わない仕組みを導入した (図 2)。3 種の棄却指標を考案し、予備実験にて 1 段目の分類結果である 3 クラスごとに適切な棄却指標と閾値が異なることを確認したため、これを用いて 12 人の被験者によるユーザスタディを行った。

(4) エージェントによる視線誘導手法開発 (2-2) に対応)

エージェントの頭部および視線の向き/動きにより部品探索をさりげなく支援する手法を検討した。その際、実体があるエージェント (ロボットエージェント) と仮想空間内に存在するエージェント (CG エージェント) の 2 種類のエージェント (図 3) を開発し、探索効率や見られている感覚の有無を調査した。調査には 12 人 (男性女性 6 名ずつ) の大学学部生および大学院生が参加し、動画のマニュアルを参照しながら (a) 動画のみの説明、(b) 動画とロボットエージェントによる支援、(c) 動画と CG エージェントによる支援、の 3 条件でレゴブロック組立タスクに従事した。なお、教示対象は実験者が遠隔操作でエージェントに入力する形の Wizard-of-Oz 法により実験を行った。実験では、タスクの遂行時間や動画視聴における操作 (巻き戻し、早送り) などの数値データに加え、NASA-TLX による認知負荷、RoSAS によるエージェントに対する印象評価データを収集した。

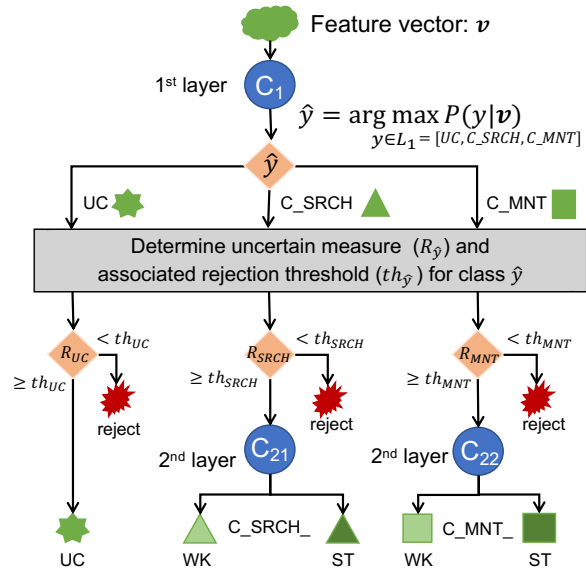


図 2 視線と手の位置関係を用いた分類における分類器の階層構造と棄却オプションの適用

#### 4. 研究成果

上記の(1)から(4)の取り組みに対して得られた成果をまとめる。

##### (1) データセットの作成

約3700件のラベル付きデータを収集した。レベルごとの内訳は表2に示す通りである。

##### (2) 迷い状態推定性能

図4に、視線および手の位置関係由来の特徴量を用いた階層型分類における第1階層の精度(マクロF値)を示す。なお、特徴量をヒストグラム特徴、ヒストグラム特徴以外の視線特徴、全ての3群に分けた際の精度も示す。10分割交差検証(ALL)で全ての特徴量を用いた場合は0.735となった。PPとLOPOの差の方がPTとLOTOの差より大きいことから、個人差の方がタスク差より大きいことが明らかになった。

図5にALLでの分類器訓練時の特徴量重要度の上位20件を示す。この図よりヒストグラム特徴量の有効性と、共起ヒストグラムの有効性が分かる。

5クラス分類時のクラスごとおよびマクロ平均のF値(無作為分類、非階層型分類、階層型分類)を図6に示す。この図より、弱い迷い(\_WK)は非階層型の方がやや精度が高いが、強い迷い(\_ST)では階層型の方が有効であることが分かった。また、マクロ平均においても階層型の方がやや良好であった。

なお、EDA由来の特徴量を用いた分類では、RF分類器によるALL-CVで0.604となり視線や手の情報を用いた場合と比較して低い精度となった。

##### (3) エージェントによる視線誘導

エージェントを用いた2つの条件(動画+ロボット、動画+CG)は、動画のみの条件と比べて課題遂行時間と操作回数両方が有意に減少した。すなわち、ロボットならびにCGエージェントの視線誘導による、作業への探索支援の有用性が確認された。

また、NASA-TLXでは、ロボットおよびCGを用いた条件では動画のみの条件と比べて、身体的負荷が低く、知的・知覚的負荷は高くなった。このことから、エージェントの支援により部品探索のための記憶のような知的・知覚的負荷が軽減されたと考えられる。一方、支援により部品が素早く見つけられるようになったが、ノンストップでせわしなく組み立てを行うこととなり、身体的負荷が増加したと考えられる。このことから、単なる探索支援だけでは、全体的な認知負荷を軽減させることは難しいといえる。RoSASでは2種のエージェントに対する印象を評価したが、「暖かさ」、「能力」、「不快感」の中でいずれの条件も「能力」が最も高くなった(6段階中4以上)が、「不快感」の因子のみロボット条件の方が有意に高い値となった(値自体は1.7以下)。CG型はエージェントの身体やその動作の表現の自由度が高いため、実用上ではCG型エージェントを使うのが良いと考えている。

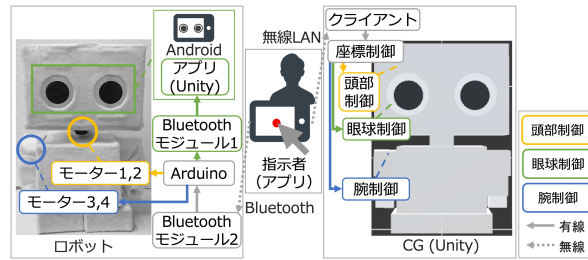


図3 視線誘導エージェントシステム (左: ロボット型, 右: CG型)

表2 データセット内訳

	0	1	2	3	4	計
迷い無	2144	-	-	-	-	2144
迷い(探索)	-	844	53	10	1	908
迷い(取付)	-	381	167	58	33	639

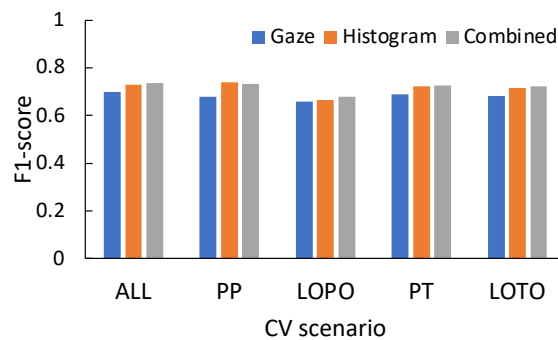


図4 視線および手の位置関係由来特徴量を用いた分類精度(迷い無し, 部品探索時および取付時の迷いの3クラス分類)

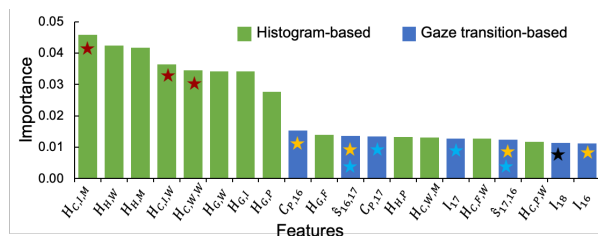


図5 第1階層分類器における特徴量の重要度(上位20件)

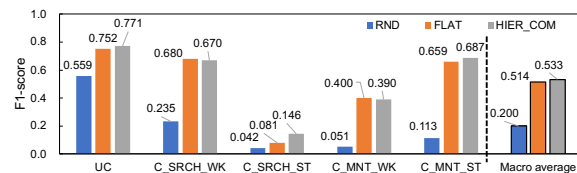


図6 5クラス分類時のクラスごとの精度 (RND: 無作為分類, FLAT: 非階層型分類, HIER\_COM: 階層型分類)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Akinobu Watanabe, Tensei Muragi, Airi Tsuji, and Kaori Fujinami
2. 発表標題 Recognition of the States of Confusion During Assembly Work Based on Electrodermal Activity
3. 学会等名 The 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaori Fujinami and Tensei Muragi
2. 発表標題 Recognizing Confusion in Assembly Work Based on a Hidden Markov Model of Gaze Transition
3. 学会等名 The 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣川赳丸, 市原祿朗, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 Eyebient Display: 視線誘導と日常物を用いたアンビエントディスプレイ作成システム
3. 学会等名 HAIシンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山中瑞稀, 村儀天星, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 教示動画視聴時の視線誘導エージェントによる部品探索支援
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村儀天星, 渡邊昭信, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 組立作業中の迷いの有無と種別検出のための手と視線の連動性の活用
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣川昶丸, 市原祿朗, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 Eyebient Display: 視線誘導による日常物のアンビエントディスプレイ化機構
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊昭信, 村儀天星, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 皮膚電気活動計測による組立作業時の迷いの認識
3. 学会等名 第21回情報科学技術フォーラム (FIT2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村儀天星, 渡邊昭信, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 組み立て作業における視線遷移の特徴に着目した「迷い」の検出と分類法
3. 学会等名 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会 第75回研究発表会 (UBI75)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村儀天星, 渡邊昭信, 国方詩織, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 組み立て作業における手と視線の移動に着目した「迷い」の検出と分類
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村儀天星, 渡邊昭信, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 手と視線の運動性の活用と分類の階層化による組立作業中の迷いの検出と分類
3. 学会等名 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会 第78回研究発表会 (UBI78)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山中瑞稀, 村儀天星, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 組み立て作業におけるエージェントによる視線誘導の影響調査
3. 学会等名 情報処理学会ヒューマンコンピュータインタラクション研究会 第203回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村儀天星, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 手と視線の遷移を用いた組立作業中の迷いの種別とレベル判定システム
3. 学会等名 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会 第81回研究発表会研究報告
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 村儀天星, 辻愛里, 藤波香織
2. 発表標題 手と視線の遷移を活用した組立作業中の迷いの有無と種別判定システム
3. 学会等名 情報処理学会第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Mizuki Yamanaka, Airi Tsuji, and Kaori Fujinami
2. 発表標題 Gaze-Guiding Agents That Support Parts Search While Watching Instructional Videos for Assembly Tasks
3. 学会等名 The 2023 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2023)
4. 発表年 2023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	辻 愛里 (Tsuji Airi)  (10774284)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・助教  (12605)	

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