

氏名	小林正樹
学位の種類	博士(情報学)
学位記番号	博甲第10422号
学位授与年月日	令和4年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	図書館情報メディア研究科
学位論文題目	人間+AIクラウドの相互作用によるクラウドソーシングの品質管理に関する研究

主査	筑波大学 教授 博士(工学) 森嶋厚行
副査	筑波大学 准教授 博士(心理学) 森田ひろみ
副査	筑波大学 准教授 博士(工学) 若林啓
副査	筑波大学 教授 博士(工学) 鈴木伸崇
副査	筑波大学 教授 博士(工学) 天笠俊之

## 論文の要旨 (2,000字程度)

本論文は、人と計算機処理の協調による効率的な課題解決を実現するために、人間+AIクラウド(群衆、Crowd)におけるクラウドソーシングの品質管理の問題に取り組んだ論文である。

クラウドソーシングとは、依頼者の課題を解決するために、インターネットを介して匿名で不特定多数の作業員(人間ワーカー)に仕事(タスク)を分散して依頼する枠組みである。クラウドソーシングサービスにタスクを登録し、人間ワーカーに対して画像や文章へのタグ付けや評価を依頼することで、現時点で計算機処理を行うためのアルゴリズム等が確立されていない処理を実現できる。一方で、クラウドソーシングサービスを通してソフトウェア開発を依頼する試みも行われている。特に、Kaggleに代表されるデータ解析コンペティションプラットフォームでは、依頼者がデータや課題を公開し、参加者がその課題に対するデータ分析や予測モデルの開発に取り組む。各参加者が提案した手法の性能を競い合うことで、依頼者の想定外の優れた成果を得られる可能性を秘めている。

本論文ではこれらの二つを組み合わせ、クラウドソーシングプラットフォーム上で伝統的な人間ワーカーに加えて、クラウドソーシングによって開発されたAIソフトウェアである「AIワーカー」が存在する世界を想定し、その世界におけるAIと人間の力を組み合わせたクラウドソーシングタスク結果の品質管理について論じている。具体的には、不特定多数の人間ワーカーおよびAIワーカーで構成される人間+AIクラウドにおける効率的なタスク処理の実現に向けたタスク結果の品質管理のために、次の3つの課題について取り組んでいる。(課題1)人間+AIクラウドへのタスク割り当ての基本アルゴリズム:タスク集合と要求精度、人間ワーカーおよびAIワーカーが与えられた時に、依頼者の要求精度を満たすように、各ワーカーへタスクを割り当てることを理論的に保証するアルゴリズムを開発している。(課題2)人間ワーカーのタスク結果品質に応じたタスク結果集約のための追加タスクの発行の最適化:人間ワーカーの品質が必ずしも高くない状況を想定し、追加タスク等を生成することで、多数決によるタスク集約結果の品質向上を図る。(課題3)個々の人間ワーカーから、より正確なタスク結果を引き出すための手法の効果検証:多数決などの集約手法とは異なり、個々の人間ワーカーからより正確なタスク結果を得るためのタスク設計手法について、現実のクラウドワーカーによる実験と評価を

行っている。

本論文は、上述した課題設定を述べた第1章を加えて全6章で構成されている。第2章では、本研究の関連研究について整理されている。第3章では、人間+AIクラウドにおける自動的なタスク割り当てについて述べている。リクエストが設定した要求精度を満たすように人間ワーカおよびAIワーカに対してタスクを割り当てることを目的として、自動的な割り当てを実現するために、人間+AIクラウドタスク割り当て問題 (HACTAP) を定義し、リクエストの要求精度を満たしながら、AIワーカへのタスク割り当て数を最大化するための2つの手法(CTA、GTA)について説明している。まず、品質の保証という観点からCTAおよびGTAの理論解析結果が示されている。続いて、ベンチマークデータセット及び水害被害判定タスクを用いて、単一のAIワーカの全体的な性能を評価する手法、及び単一のAIワーカを対象とした能動学習を行う手法と提案手法の比較実験結果が示されている。

第4章では、第3章で提案した枠組みを拡張し、人間ワーカのタスク結果の品質が必ずしも高くない状況において、必要な場合にだけ追加の人間ワーカタスクを発行し、人間ワーカのタスク数の増加を抑えながらタスク結果品質を改善する手法を提案している。実験ではAIワーカが相互にタスク結果を共有することで、タスク結果品質を改善しながら効率的にタスクを処理する仕組みが構築可能であることが示されている。

第5章では、人間+AIクラウドにおける人間ワーカから得られるタスク結果の品質管理について議論している。4章では多数決によるタスク結果の集約手法により最終結果として得られるタスク結果品質を改善する問題について扱ったが、本章では個々の人間ワーカから得られるタスク結果そのものの品質を向上させる問題について扱っている。具体的にはShahらが提案した自己補正に着目している。自己補正は同じワーカに1つのタスクで2度の回答の機会を与えることで、ワーカ自身が自分の誤答を補正できるのが特徴である。Shahらの論文では、タスク結果の品質改善についてのシミュレーションによる評価のみが行われており、現実のクラウドソーシングにおいても効果が得られるかは不明であった。そこで、本論文では現実のクラウドワーカが自己補正を適用したタスクに取り組む実験により、自己補正がタスク結果やワーカにもたらす効果を検証している。

第6章では、本研究の結論を述べている。第一章で述べた研究目的を踏まえて各章で取り組んだ研究とそこから得られた結果について総括し、残された課題、および成果を踏まえた望ましい発展の方向について、展望が示されている。

## 審査の要旨 (2,000字以上)

### 【批評】

本論文は、近年大きな注目を集めているクラウドソーシングアプローチの枠組みにおいて、人間ワーカとAIが混在した人間+AIクラウドを想定し、そこでのクラウドソーシングタスク結果として得られるデータの品質管理について取り組んだ意欲的な研究である。人間とAIは得意とする作業が異なり、これらを効率よく組み合わせる問題は、理論的にも実用的にも重要な課題である。

近年のAIの進化スピードは速く、最近まで人間にしかできないと考えられていた仕事今日はAIで可能になっているということがあり得る。したがって、人間とAIをどう組み合わせれば効率がよいかについては、その解は常に変化するものである。本論文では、クラウドソーシングサービスを通じて、人間ワーカだけではなくブラックボックスのAIプログラムにアクセスするという新規性のあるアイデアに基づき、その枠組みの中で、クラウドソーシングにおける重要課題であるデータ品質

管理にアプローチしている。本論文は6章構成になっている。次に各章ごとに批評を述べる。

第1章では、クラウドソーシングやAI開発に係わる現在の状況を述べている。特に、クラウドソーシングによるAI開発が一般的なアプローチになってきていること、クラウドソーシングがAIと人間の力を効果的に組み合わせるヒューマン・イン・ザ・ループアプローチの重要な構成要素になっていることなどを説明し、その後本研究における研究項目について説明している。著者が提案する人間+AIクラウドモデルの必要性についてはより説得力のある主張が可能と思われるが、本研究の動機については十分理解できる。

第2章では、本論文のトピックに関連する、クラウドソーシングの品質管理、能動学習、複数の機械学習モデルの統合、人と計算機の協調による課題解決、フィードバックを伴うタスク設計、マイクロタスクを通じたワーカーの能力向上について、先行研究があげられている。それぞれの先行研究と第1章で述べられた各研究項目の関連についての記述に改善の余地があるが、既存の人間-AI連携手法に対する本論文の成果の新規性を説明するために必要な研究については十分に列挙されている。

第3章では、人間+AIクラウドにおいて、人間ワーカーによるタスク結果の品質と同程度であることを保証しながら可能な限りAIによって作業を行うための手法が提案されている。ここでは、AIはクラウドワーカーによって開発され、中身がわからないブラックボックスAIワーカーとしてモデル化されている。この設定においては、アクティブラーニングを行いながらAIワーカーを教育し、要求品質を満たすのを待ってAIワーカーにタスクを割り当てるという既存手法を活用した方法では必ずしも効果的にAIを活用できないことが指摘され、それに代わる手法として、タスク集合の部分集合であるタスククラスタを導入した複数の手法が提案されている。本章ではアルゴリズムが明示されているだけでなくそれらの理論的解析も行われている。その後、シミュレーションおよび実環境における実験の結果が示されており、提案手法が、要求品質を満たしつつも、既存手法と比較してより多くのタスクをAIワーカーに割り当てることが可能であることが示されている。実環境における実験は現在は特定のタスクでしか行われていない。複数の異なるタスクを利用すればより説得力が上がったと考えられるが、理論的には問題なく、主張は正しいと判断できる。

第4章では、クラウドソーシングで一般的なデータ品質向上手法である、同一タスクの複数結果の集約を第3章の手法に導入する方法について議論している。単純な手法では、各タスクごとに一定個数のタスク結果を集約し、その後第3章の手法を適用することになるが、本章では、AIワーカーの回答を利用することによって動的に集約するタスク結果の個数を求め、人間ワーカーが回答しなければならない総タスク数を削減する。シミュレーション結果では有望な結果が出ているものの理論保証や実環境における実験結果があればより説得力のある章になったと思われる。

第5章では、個々の人間ワーカーのタスク結果の品質向上を目指して、Shahらによって2016年に提案された「他ワーカーの結果を見てタスクを行う Self-Correction」がワーカーの能力にもたらす短期的・長期的効果を実験的に検証した結果を報告している。その結果、短期的効果(データ結果の品質向上)および長期的効果(人間ワーカーの能力向上)が共に認められることを明らかにしている。また、異なるタスクに関する学習の転移の有無についても実験検証を行ったが、それに関しては転移しないとの結果が報告されている。実験により Self-Correction が品質向上に効果があることは明確に示されており評価できる。AIワーカーの利用については他の研究での成果の言及にとどまっており、もう少し踏み込んだ議論があるとよりよいと思われる。

第6章は本研究全体の結論である。本論文の貢献および今後の課題について整理されている。今後の課題については、提案アプローチの適用対象が現時点では分類タスクに限定されているため、より広い種類のタスクに拡張すること、AIワーカーに関連する報酬設計や公募の方式などについて課題が

あること等が述べられている。

全体として、第6章に触れられているようにまだまだ多くの課題が残っているものの、本研究は現在の社会的・技術的動向を踏まえた問題設定として人間+AI クラウドという新しい分野を開拓し、限定された問題設定においては理論的・実験的な成果をもたらしている。

これらを総合的に判断すると、本論文は情報学の学位論文として十分な内容を有すると認められる。

#### **【最終試験結果】**

令和4年1月18日、図書館情報メディア研究科学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもと、本論文について著者に説明を求めた後、関連事項について質疑応答を行った。引き続き、「図書館情報メディア研究科博士後期課程（課程博士）の学位論文審査に関する内規」第23項第3号に基づく最終試験を行い、審議の結果、審査委員全員一致で合格と判定された。

#### **【結論】**

よって、著者は博士（情報学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。