

## 学位論文審査の結果の要旨

報告番号	先端科学技術甲第182号	氏名	樋口 滉規
論文題目	単純因果帰納モデル pARIs の合理分析 および因果探索アルゴリズムへの応用		
論文審査委員会	委員(主査)D○合 高橋 達二 教授 (情報学専攻) 委員(副査)D○合 柴山 拓郎 教授 (情報学専攻) 委員(副査)D○合 篠原 修二 准教授 (情報学専攻) 委員(副査)D○合 鳥居 拓馬 准教授 (情報学専攻)		

### 研究の背景

人類は、その種が誕生して以来、厳しい自然環境の中で適応・生存することに成功し、現在の繁栄を迎えている。そのような成功の要因の一つに、人間が因果関係を効率的に学習(すなわち、帰納的に構築)し、それを活用する能力がある。学習した因果関係を活用することにより、原因の観察に基づいて未来を予測することや、結果から原因を診断すること、原因の発生を操作することによって未来を操作することが可能となる。

Hattori & Oaksford (2007) が提案したDFHモデルは人間の因果帰納を説明する有力なモデルとして知られている。彼らはDFHが人間の因果帰納と適合することを示し、かつ、現実環境の特性を考慮した場合にはDFHが高い母集団推定性能を有することをコンピュータ・シミュレーションによって示したが、彼らが行った合理分析には幾つかの問題があり、それらを修正した上で結果を再分析する必要があった。

一方、pARIsモデルはDFHをアップデートしたモデルとして提案され、DFHモデルよりも更によく人間の因果帰納に適合することが示されていたが、その性質については明らかになっていない点が多くあり、合理分析による詳細な検証が必要であった。従来pARIsやDFHの計算上の役割は共変動(相関関係)の検出と見なされてきたが、これらのモデルは稀少性仮定(一般に事象の生起が稀であるとする仮定)した場合に確率論的な非独立性の検出においてより有力である可能性があり、この観点から因果帰納モデルの性質を分析することで人間の因果帰納の新たな性質を明らかにできる可能性があった。また、pARIsやDFHが一对の事象の因果的な強度の推定を説明するモデルである一方で、人間は現実において複数の事象間の複雑な因果構造の推定をすることができ、これらの因果帰納モデルではそのような状況における人間の因果帰納を説明することができないという課題があった。

### 研究の目的

本研究には大きく三つの目的がある。一つ目の目的は、単純因果帰納モデルpARIsが人間の因果帰納を説明する有力なモデルであることをメタ分析を介して明らかにすることである。二つ目の目的は、認知科学研究の方法論である合理分析の手続きにしたがい、現実環境が有する複数の自然な仮定の下でpARIsが母集団の共変関係を高い精度で近似することをコンピュータ・シミュレーションを用いた網羅的な分析によって明らかにすることである。三つ目の目的は、pARIsが原因および結果事象の生起が稀少であるという仮定の下で非独立性の優れた近似であることを確率論に基づく新たな指標の定義とコンピュータ・シミュレーションによる検証によって明らかにすることである。四つ目の目的は、二事象間の因果強度のモデルであるpARIsを複数事象間の因果構造の推定問題、すなわち因果探索の枠組みへと拡張するために、pARIsを用いたベイジアン・ネットワークの構造推定アルゴリズムを提案した上でコンピュータ・シミュレーションによってその有効性

を明らかにすることである。

## 研究の内容

本研究では、単純因果帰納モデルpARIsについて、認知科学研究の方法論である合理分析を介して詳細な分析を行った。具体的には、pARIsが従来提案されてきた42種類のモデルよりも人間の因果帰納と良く適合することを、過去に報告された複数の認知科学実験の結果を統計学的な整合性を保ちつつ統合するメタ分析によって定量的に示した。また、予め母集団パラメータから人工データを生成し、その人工データから母集団パラメータを推定するパラメータ・リカバリーの手法に基づくコンピュータ・シミュレーションを行うことで、pARIsが母集団の共分散の従来有力なモデルとされていたDFHやその他のモデルよりも高い精度で推定することを定量的に示した。また、モデルがより多くのサンプルに対して母集団を推定可能であることを示す定義可能性の評価や、母集団における共分散の有無に対する二値分類性能など多様な観点から詳細な分析を行った。これにより、pARIsの性能および性質を明らかにした。また、Hattori & Oaksford (2007) が行った合理分析が抱えていた複数の問題を指摘した上で修正を行い、結果を再分析することによって彼らの合理分析を補完した。

これらの研究の成果は次の論文でまとめられている。

Kohki Higuchi, Kuratomo Oyo, Tatsuji Takahashi

Causal intuition in the indefinite world: Meta-analysis and simulations

Biosystems, 2023, 104842. (採択決定)

<https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.104842>

また、pARIsを始めとする因果帰納モデルの計算上の目的は従来は母集団における共分散の近似とされていたが、計算上の目的は事象の生起が稀少であるとする仮定の下での非独立性の近似であるとする仮説を立て、コンピュータ・シミュレーションに基づき検証を行った。結果は、pARIsが稀少性仮定の下で非独立性の近似のための有力なモデルであることを示した。この結果は、pARIsが人間の因果帰納と最も良く適合するモデルであるというメタ分析の結果を踏まえた場合に、人間の因果帰納が非独立性の検出に基づくものである可能性を示唆するものである。

最後に、従来は一組の原因と結果の間の因果関係のためのモデルであったpARIsの理論的な範囲を拡張するため、複数の事象間の因果構造を取り扱うための理論である因果ベイジアン・ネットワークに対してpARIsの応用を行った。具体的にはベイジアン・ネットワークにおける構造推定のための新たなアルゴリズムを開発し、パラメータ・リカバリーの手法に基づくコンピュータ・シミュレーションを介して提案アルゴリズムの性能の検証を行った。シミュレーションの結果は、特に事象の稀少性を仮定した場合やスモールサンプルからの推論において、提案アルゴリズムが従来の代表的なアルゴリズムよりも優れた推定性能を有することを定量的に示した。これは提案したアルゴリズムがpARIsの環境に対する適応的な利点を継承していることを意味する。

以上、本論文において著者が検討して得た結論に記された事柄は、人間の因果帰納の記述モデルに関して詳細な分析を行うことで人間の認知における因果帰納プロセスの解明に寄与したという点において認知科学的な観点から有用である。また、従来は一組の原因・結果間の因果強度を対象としていた因果帰納モデルpARIsの理論的な範囲を拡張し、複数の事象間の因果構造の問題に適応可能にした上で、ベイジアン・ネットワークにおける軽量の構造推定アルゴリズムの提案を行った点で極めて有用であると判断できることから、本論文の価値は工学的、工業的な観点からも十分に評価できる。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。