

論文審査の結果の要旨

論文提出者 星野 崇宏

本論文は構造方程式モデルにおける既存の同時推定法の諸問題点を指摘し、それらの問題を解決するための段階推定法を統一的観点より提案し、その方法の統計的性質についての研究を行ったものである。構造方程式モデルは観測変数と潜在変数、潜在変数間関係を推定するために行動科学において非常によく利用されている。構造方程式モデルの推定では、全母数の同時推定法が、一致性などの優れた性質を有する方法であるとして、母数を分割して段階的に推定する方法より良いとされて来た。しかし実質科学的な研究分野、特に心理学などの行動科学分野や社会科学分野においては、同時推定よりも段階推定が積極的に利用されるべき応用研究が多くあると思われる。本論文では、段階推定に関して、次の3つの問題点を指摘し、その問題を解決するための新しい方法を提案し、理論的考察を行っている。

第一の問題点は、構造方程式モデリングでの同時推定法では、構造方程式と測定方程式の母数を同時に推定するために、構造方程式の設定によって測定する潜在因子の定義が変化するという問題である。これに対して様々な研究者が構造方程式と測定方程式を別々に推定することを推奨しているが、これまで、明確な推定法が提案されておらず、さらに統計学的な性質も明らかにされてこなかった。第2章は、この問題に解決を与えるものである。

第2の問題点は、従来良く行われてきた段階推定法の持つ問題である。従来は、統計理論や計算能力が不十分であり、潜在変数(因子スコア)の推定値を求め、その推定値を所与として、構造方程式のパラメータを推定する方式をとることが多かった。しかし、この方法はしばしば非常に大きな推定の偏りを与える。この偏りを是正する修正法が第3章に説明される。

第3の問題点は、無作為割り当てが不可能な実験や調査のデータから因果関係を取り出す方法として十分満足できる方法がない点である。行動科学においては、教育レベルや生育環境などの、研究者が操作不可能な要因の効果に関心があることが多い。従って、共変量の分布を調整することで、無作為割り当てが行われない研究において本来の因果効果を推定する方法が重要な意味を持つてくる。それにもかかわらず、共変量を取り除いた上で、処理間の因果効果を推定する有効な方法は、統計学的根拠を欠くくらいであった。第4章以下は、この点について、新しい理論体系を用意し、実際的な方法をも提案するものである。以下は、各章ごとに、章の内容を紹介する。

第2章では、一点目の問題意識から、構造方程式モデルにおいて測定方程式と構造方程式部分の母数を別々に推定する段階推定法の提案が行われた。特にいくつかの条件の下で、構成概念を測定する測定方程式の母数を第一段階として推定する場合、その推定量が一致推定量であり、漸近正規性を有することが示された。また、母数に制約がある場合の擬最尤推定量の漸近分布や、複合仮説における擬尤度比の漸近分布も導出された。さらに構造方程式が測定方程式に影響を与える問題の原因を特定し、同様のシミュレーション研究によって、本方法が最尤推定法よりもモデルの誤設定に対して頑健であることが示された。

第3章では、二点目の問題意識から、因子スコアの推定値を所与とする、従来の簡易な段階推定法が偏りのある推定法であることを示し、その原因が特定された。そして、因子共分散の一部を置き換えると

いう方法を用いて、因子スコアを用いて構造方程式の母数を正しく推定する段階推定法を提案し、その一貫性が証明された。また、様々な状況を想定したシミュレーション研究によって、因子スコアを用いた従来の推定法が、たとえ被験者数を多くしても偏りが非常に大きいことを示し、これに対して本論文で提案された方法は実用上十分に精度で推定が可能であることが示された。

第4章では、従属変数に影響を与える共変量の影響を除去し、純粋な要因の効果である因果効果を推定するための方法として傾向スコア(Propensity Score)を用いた調整法が近年注目されているが、この方法についてのこれまでの到達点を展望している。この展望で明らかにされたように、既存の傾向スコア調整法は不十分であり、構造方程式モデリングを含む複雑なモデルには利用することができない。傾向スコア調整法は段階推定法の一つとしてとらえ、一般的なパラメトリックモデルに対して適用でき、かつ統計学的性質の良い手法の開発が行動科学の発展に非常に有用であると考えられる。

そこで第5章では、一般的なパラメトリックモデルにおいて傾向スコアによる共変量の調整を可能にする重み付き対数尤度最大化法が提案された。共変量の値によって従属変数が観測される確率が決定される場合、欠測を無視した最尤推定量はバイアスのある推定量となり、一貫性もないのに対して、“weak unconfoundedness”条件、つまり従属変数と割り当て変数は共変量を所与とすると独立であるという仮定が成立する場合には、提案された一般化傾向スコアを用いた重み付け対数尤度を最大化する推定量は一貫性と漸近正規性を有することが証明された。

実際には一般化傾向スコアの真値は未知であり、一般には割り当てと共変量から推定されるが、上記の重み付け対数尤度において、一般化傾向スコアの推定値を利用した段階推定を行って得られる推定量は、一般化傾向スコアの真値が分かっている場合の重み付き対数尤度最大化推定量と漸近的に同一の分布に従うことも示された。つまり、一般化傾向スコアの推定に伴う変動は、従属変数の周辺分布の母数推定には影響を与えないという数理統計学上も興味深い結果が得られている。さらに本論文では重み付き対数尤度最大化推定量を用いた検定法も開発されている。これらの結果は、本論文前半で利用した擬最大尤度法の議論を変形することで得られるという点で、前半部分と関連がある。

第6章においては、第5章で提案された一般的な方法を具体的に多群の構造方程式モデリングに応用し、潜在変数上での因果効果の推定と検定を可能にする方法を構成し、さらに具体的に行動科学のデータに適用し、有用な知見を得ている。

以上、本論文の成果をまとめると、第一段階において関心のない局外母数を推定し、その推定値を所与として第二段階として本来関心のある母数を推定するという統一的な方略に立脚し、新しい段階推定法を提案することで、行動科学研究における構造方程式モデリングの推定において、理論上にも実際の観点からも大きな貢献をしていることは評価に値する。

よって、本論文は東京大学大学院総合文化研究科課程博士(学術)の学位請求論文として合格であると認定された。

なお、本論文の第2章、第4章の内容の一部は、それぞれ「心理学研究」「品質」誌にすでに掲載されている。