

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18952

研究課題名(和文) 区間モデルを用いたロバスト多基準意思決定支援

研究課題名(英文) Robust Multiple Criteria Decision Aiding Using Interval Models

研究代表者

乾口 雅弘 (INUIGUCHI, MASAHIRO)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：60193570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：多基準意思決定問題の決定支援では、決定者の選好情報に基づく好みのモデル化が必要になる。現実問題では、情報や知識の不十分性から評価が不明確で、選好情報が一貫していないことも少なくない。本研究では、曖昧さを反映するために区間モデルを用い、その推定法を考案するとともに有用性を確認する。従来見過ごされてきた区間モデルのいくつかの問題を理論的に考察するとともに、通常の一対比較情報の下で有用な区間モデルが提案法により推定できることを明らかにした。また、曖昧さを考慮した代替案の順序付けにおいては、区間を用いない従来法より提案法の方がよい推定結果を与えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複数の基準を考慮して望ましい解を求める問題を考える。決定支援に必要な意思決定者の選好は、従来、決定論的なモデルで表されてきた。しかし、人の評価の曖昧さを鑑みれば選好を区間モデルで表すことが考えられる。決定論的なモデルでは、平均的な評価による支援となる一方、区間モデルでは、可能な評価を考慮した決定支援が可能となる。従来法と同じ情報の下での区間モデルの定め方を提案するとともに、不確実性の下での最大リグレット最小化や最小利得最大化などを想定した場合には、提案法の方が良い推定を与えることを示した。また、従来見過ごされてきた意外で根本的な問題点を指摘し、その解決に役立つ理論的な結果を示した。

研究成果の概要(英文)：For decision aiding under multiple criteria, we need to model the decision maker's preference using preference data. In realworld problems, given preference data is often inconsistent and vague due to the insufficiency of information and knowledge. In this research, adopting an interval model to represent the vagueness, we propose estimation methods for the interval model and examine their usefulness. Several overlooked problems in the literatures are revealed and investigated theoretically. It is demonstrated that a useful interval model is estimated by the proposed estimation methods from the conventional pairwise comparison data. Moreover, the advantage of the proposed interval methods over the conventional methods is shown in the estimation of alternative ranking with consideration of vagueness.

研究分野：システム計画数理

キーワード：階層的意決定法(AHP) 区間解析 正規性条件 一対比較 Dempster-Shafer理論 UTA 線形計画法 選好モデリング

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報技術や知能化技術の目覚ましい発展により、必要で有益な情報が容易に入手でき、より快適な社会生活が実現してきているなか、人の好みに応じた意思決定支援を行うことはいっそう肝要となる。ここでは、複数の評価基準の下で望ましい解を求める問題である多基準意思決定問題を取り上げ、その意思決定支援手法について考究する。

多基準意思決定問題では評価基準が唯一でないため、解選択を支援するには意思決定者の好みのモデル化が必要になる。人の評価の曖昧さや選好情報の不十分性があるにも関わらず、従来、確定的な数学モデルにより決定者の好みが表示され利用されてきた。しかし、曖昧さや不十分性により確信して判断できない場合には、代替案の優劣を無理に決めずに保留し、必要に応じて追加情報を求める方がより安全な決定支援となる。また、意思決定者がいくつかの代替案のいずれが良いとも言い難く、いずれも受け入れられる状況では、その寛容性が表せる幅をもったモデルを用いることが相応しい。

このような観点から、評価の曖昧さや情報の不十分性を区間モデルや集合モデルで表現して決定支援する方法が活発に研究され始めている。これらの方法では、曖昧さや不明確性をモデルに取り込めるので、決定者に過度に精密な選好情報を要求しない利点がある。しかし、これらのモデルでは、通常、確定的な数学モデルでは起こりえない意外な問題が生じることや、多くの計算が必要になるといった問題があった。これらは従来見過ごされていたり、未解決であったりするので、克服する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、評価構造を階層的に表し、代替案や評価基準の対比較により解選択を支援する階層分析法(AHP)と、一対の代替案のいずれを好むかなどの質的な選好情報から加法的効用関数を求めるUTA法とを取り上げ、評価の曖昧さや情報の不十分性を反映した区間モデルによる決定支援手法を考究する。既にAHPに区間モデルが導入されているが、一対比較行列から求められる区間重要度は評価の曖昧さや知識の不明確性を十分に反映していない、整合した区間一対比較行列の下で下側モデルの区間幅が意外にも上側モデルより大きくなる、区間重要度に総和が1という正規性条件が妥当性に疑問が残る、といった問題が、研究代表者により明らかになっている。これらは、通常の実数モデルでは起こりえない区間モデルに起因する根本的な問題であり、今まで見過ごされてきた。これらの問題の解決をめざすとともに、意思決定者の曖昧さをより反映した決定支援を可能とする新しい区間AHPを探究する。

一方、UTA法に対して、選好情報に整合するすべての加法的効用関数を用いるロバスト順序回帰が提案され、選好情報の不十分性を反映した決定支援手法が提案されている。しかし、得られる代替案間の支配関係が弱く解が十分に絞り込まれない、また、支配関係を求めるには代替案ごとに線形計画問題を解く必要があり効率的でないという欠点がある。そこで、選好情報に整合するすべての加法的効用関数の集合から区間モデルを切り出し、決定を支援する方法を検討する。単純に区間関数モデルを適用すると、区間効用間の相互依存性が生じ容易に扱えない。これに対し、効用の増分を区間で表現するモデルにより相互依存性を回避する。この方法では、ロバスト性は多少犠牲にするが、区間演算を活用してより効率的に代替案間の支配関係の成否が議論できると期待される。

以上の通り、本研究では、見過ごされやすい区間モデルの性質に注意を払い、これに対処する新たな視点から、評価の曖昧さや情報の不十分性を反映した区間モデルによる決定支援手法の確立を目指すとともに、ファジィモデルなど同様な性質をもつ多くの手法にも役立つ本質的な成果を得ることを目標とする。

3. 研究の方法

以下の(1)、(2)、(3)は独立に研究できる。

- (1) 区間AHPにおける従来の区間重要度推定法では、通常の一対比較行列から、評価の曖昧さを十分に反映した区間重要度が推定できない。また、求められた区間重要度の幅にアンバランスが生じやすいなどの問題がある。そこで、評価の曖昧さが十分に反映でき、幅のバランスよい区間重要度推定法を考案する。種々の推定法を検討し、真の区間重要度と推定された区間重要度との一致度、代替案比較における安全性、代替案の順序付けにおける正しさの面で比較する。なお、この問題は、通常の一対比較行列という二つの重要度の比の形で与えられる僅かなデータから区間重要度を推定する問題で、高い精度での推定は困難であると考えられる。本研究では、これによりどこまで正しく推定できるか、通常的重要度推定法による評価とは異なった意味のある代替案評価が得られるか否かを調査する。
- (2) 区間AHPでは、通常、AHPと異なり、整合した区間一対比較行列から区間重要度が一意に求められない。すなわち、総和が1という正規性を仮定しても区間重要度は正のスカラー倍の範囲でしか一意に定められない。これは、区間重要度の正規性条件が緩く、区間重要度を一意に定められないことによる。このため、整合した区間一対比較行列の下で下側モデルの区間幅が上側モデルより大きくなるという意外な結果を導く。そこで、正規性条件を満たす区間重要度モデルと、正規性条件が自然に与えられるDempsterとShaferの証拠理論との関係を調べ、正規性条件を満たす区間重要度モデルの意味を明らかにする。
- (3) 区間順序回帰として、UTAに区間モデルに導入した区間UTAを考える。安易に区間関数を用

いて扱えば、区間効用間の相互依存性の問題が生じる。そこで、区間効用間の相互依存性を回避できる方法として、効用の増分を区間で表現するモデルを提案する。選好情報から加法独立な区間効用モデルを同定する方法を議論し、その問題が線形計画問題に帰着できることを示す。これにより得られた区間 UTA モデルの妥当性を数値実験により検討し、より妥当なモデルが得られるように改良する。また、区間 UTA モデルの拡張も検討する。

4. 研究成果

研究目的で述べた(1), (2), (3)について、以下の成果を得た。

- (1) 区間 AHP における区間重要度推定法について次の成果を得た。
 - A) 通常の一対比較行列の下で従来法より妥当な区間重要度ベクトルを導く推定法として、従来の推定問題の最適性を緩和し準最適解集合により区間重要度を推定する緩和法を提案した。緩和パラメータを適切に設定すれば、区間の幅のバランスが良く、真の区間重要度と推定された区間重要度との一致度や代替案比較における安全性の面で良好な結果が得られることを、数値実験により明らかにした。また、妥当な緩和パラメータを定めるため、数値実験により一対比較行列の整合性指標と適切なパラメータ値との関係を求め、これによりパラメータを定める方法を提案し、学術雑誌に掲載した。
 - B) パラメータ設定を必要としない推定法として、与えられたデータを覆う最小範囲に基づく推定法や、一対比較行列の推移閉包に基づく推定法を考究した。初期の数値実験で、一対比較行列の推移閉包に基づく推定法では、あまり良い推定精度が得られなかった。一方、最小範囲最大化による推定法では、パラメータを適切に設定した緩和法にはやや劣るものの、真の区間重要度と推定される区間重要度との一致度や代替案比較における安全性において良好な結果が得られることが、数値実験により明らかになった。
 - C) 区間重要度の中心値を通常の AHP で推定し、幅を区間重要度の推定法を考察し、中心を幾何平均法、幅を最小範囲最大化法で推定する方法が、真の区間重要度と推定される区間重要度との一致度や代替案比較における安全性において、最小範囲に基づく推定法より良い結果を示すことを明らかにした。
 - D) 一対比較行列が何回も観測し、整合した区間一対比較行列に近づけば、推定される区間重要度が真の区間重要度に収束するか否か、推定法として満たすべき性質を考察したところ、緩和法、最小範囲最大化法とも収束しないことが明らかになった。評価関数を幅総和の最小化から(区間)一対比較行列からの偏差最小化に変更することにより、収束性が改善することを明らかにした。さらに、最小範囲最大化法では、第 2 段で推定したい区間重要度に関する相対偏差を最小化すれば、真の区間重要度への収束が理論的に保証できることが明らかになった。
 - E) 最小範囲に基づくいくつかの区間重要度推定法を新たに提案し、それらの有用性について数値実験による考察を行った。各基準の重要度が区間で表され、最大リグレット最小化基準や最小利得最大化(マキシミン)基準により代替案が順序付けられる場合には、平均最小範囲推定法による順序推定が、通常の AHP による順序推定より良い精度を示すことが分かった。なお、非一意性に対処するため区間重要度の中心の和が 1 であるという条件を加えている。これにより、従来法と同じ選好情報から区間重要度を推定する方法でも十分有用な推定ができることが実験により示された。
- (2) 区間重要度の正規性に関しては、次の成果が得られた。
 - A) 整合した区間一対比較行列に対応する正規な区間重要度ベクトルが一意に定まらないことは、一対比較行列だけでは正規な区間重要度ベクトルが一意に定まらないことを意味する。そこで、正規性が自然に定められ、不精密な確率が表される Dempster と Shafer の証拠理論を用いて、通常の一対比較行列から確率分布に対応する基本確率割当を推定する問題を考え、正規な区間重要度ベクトルを推定する問題との関係を考究した。一対比較行列だけでは、基本確率割当も正規な区間重要度ベクトルも一意に定められないので、与えられた一対比較行列からの乖離度が等しい解集合を求める問題とした。その結果、中心の総和が 1 以上という条件を加えた正規な区間重要度ベクトルの推定問題が、基本確率割当の推定問題と等価となることを明らかにした。
 - B) 区間の中心の総和が 1 以下の正規な区間重要度ベクトルに対応する基本割当関数がどのようなものであるか考察し、それを明らかにした。これにより、正規な区間重要度ベクトルの半分は、Dempster と Shafer の証拠理論における通常の belief 関数の集合に対応し、残り半分は通常の belief 関数の精密性を割り引いた変種 belief 関数の集合に対応することが明らかになった。さらにこれらの 2 種類の集合は一対一に対応することも分かった。この成果により、正規な区間重要度ベクトル(区間確率)と Dempster と Shafer の証拠理論の関係が、世界で初めて明確化されたと考えられる。
 - C) A), B) の成果により、区間重要度の中心の和が 1 であるという条件を加えた問題は、基本確率割当関数の焦点要素(正の確率を取る基本事象の集合)の基数がただか 2 となる特殊な belief 関数の集合しか考えていないことになる。また、区間重要度の中心の和を 1 以上とすると、通常の belief 関数の集合を考えると対応し、区間重要度の中心の和を 1 以下とすると、変種 belief 関数の集合を考えると対応する。A), B)

の成果は、一対比較行列より通常の belief 関数の形で重要度を推定する際に、正規な区間重要度の推定法に belief 関数を特定する条件を加えていけば良いことが分かる。さらに、正規なファジィ重要度が入れ子状の通常および変種 belief 関数の集合族に対応することを示唆している。

(3) 区間 UTA に関しては、次の成果が得られた。

- A) 区間 UTA 法に関しては、区間効用の増分を区間で表現するモデルを考え、選好情報から加法独立な区間効用モデルを同定する問題が線形計画問題に帰着できること、および、選好情報に無差別関係が含まれない場合は、線形計画問題を解いた後は、代替案間の支配関係は求められた区間モデルで容易に評価できることは直前の研究成果により明らかにしていたので、この方法で推定される区間効用モデルの妥当性を検討した。この区間効用モデルにより、代替案間に関して明確に支配関係が成立するか否かが推定できる。代替案間の支配関係の成立確率との整合性を数値実験により推定したところ、推定された区間効用関数モデルではうまく整合しない部分があることが明らかになった。
- B) モデル推定に用いる評価関数として、区間効用の増分の最小値の最大化以外に、区間効用の増分の総和の最大化、基準ごとの区間効用の増分の最小値の総和の最大化、区間効用の増分の中心値の相互差の最小化などを考え、種々の選好情報を与えて、区間効用モデルで推定される代替案間の支配関係が高い確率で得られる一致度、低い確率でしか得られない危険度、逆の関係が高い確率で得られる逆転度、および、区間効用モデルではいずれの支配関係も得られないにも関わらずいずれかの支配関係が高い確率で得られる躊躇い度の多角的な観点から調べたところ、それぞれ一長一短があるものの、安全性の面から区間効用の増分の最小値の最大化を用いるのが無難であることが分かった。
- C) 決定者が非加法的効用関数を持つ仮定した場合にも、区間効用モデルが推定の簡便性を損なうことなく適用できるように、属性値空間をファジィ分割し、各区分で異なった加法的効用関数をもつ非線形モデルを考えた。線形計画問題を解くことによりモデル同定できることを明らかにした。相互効用独立な効用関数を仮定して選好情報を与え、数値実験を行った結果、加法的区間効用モデルと比較して、常にこの方法の方が良いとは限らないことが分かった。また、このモデルでは、パラメータが多くなる欠点がある。この結果より、加法的区間効用モデルでもある程度の非線形性に対応できると考えられる。
- D) 代替案間の支配関係の成立確率との整合性をいっそう高めるには、一つの加法的な区間効用モデルだけでは十分であるとは言い切れない。たとえば、三つの異なる加法的区間効用モデルを用いるなど、複数モデルを用いる方法について考察した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Masahiro Inuiguchi, Shigeaki Innan | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Improving Interval Weight Estimations in Interval AHP by Relaxations | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics | 6. 最初と最後の頁 1135 ~ 1143 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jaciii.2017.p1135 | 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24件（うち招待講演 0件/うち国際学会 19件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 Relations between Normalized Interval Vector and Belief Functions |
| 3. 学会等名 The 16th International Conference on Modeling Decisions for Artificial Intelligence (MDAI 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi, So Komatsu |
| 2. 発表標題 The Improved Interval Weight Estimation Method from a Pairwise Comparison Matrix and the Advantages of Interval Evaluations |
| 3. 学会等名 The 11th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 Interval Weight Estimation Methods Satisfying Desirable Properties in Interval AHP |
| 3. 学会等名 The 2019 Joint World Congress of the International Fuzzy Systems Association and the Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 Ranking Alternatives with Tolerance and Reduction in the Setting of Interval AHP |
| 3. 学会等名 The 11th Workshop on Uncertainty Processing (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi, Hiroki Inoue |
| 2. 発表標題 A Fuzzily Partitioned Interval Function Model for Ordinal Regression |
| 3. 学会等名 4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi, Yuji Mukai, Roman Slowinski, Salvatore Greco |
| 2. 発表標題 Interval UTA Method Handling Highly Probable Preferences between Alternatives estimated by stochastic multicriteria acceptability analysis |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference on Modeling Decisions for Artificial Intelligence (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Issei Torisu, Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 Increasing Convergence of the Quality of Estimated Interval Weight Vector in Interval AHP |
| 3. 学会等名 2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Maho Yamaguchi, Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 Estimation Methods of Interval Weights Centered at Geometric Mean from a Pairwise Comparison Matrix |
| 3. 学会等名 2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi, Shigeaki Innan |
| 2. 発表標題 Non-parametric Interval Weight Estimation Methods from a Crisp Pairwise Comparison Matrix |
| 3. 学会等名 Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masahiro Inuiguchi |
| 2. 発表標題 An Evidence Theoretic Approach to Interval Analytic Hierarchy Process |
| 3. 学会等名 The Sixth International Symposium on Integrated Uncertainty in Knowledge Modelling and Decision Making (国際学会) |
| 4. 発表年 2018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 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|