

| | |
|----------|---------------------------------------|
| 氏名(本籍) | 小山 佳秀(岡山県) |
| 専攻 | 信頼性情報システム工学専攻 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 博甲第101号 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当者 |
| 学位授与の年月日 | 平成27年3月24日 |
| 学位論文題目 | 非可逆モデルに基づく新確率比を用いた構造変化検出に関する研究 |
| 論文審査委員 | (主査) 服部 哲郎 (副査) 堀川 洋 (副査) 今井 慈郎 |

論文内容の要旨

進行中の時系列予測では、(1)予測モデルの構築段階、(2)構築された予測モデルに基づいて観測しながら、観測されたデータと予測モデルとの乖離検出(構造変化発生検出)を行う段階、そして、構造変化検出後、速やかに以降の時系列データに対する予測モデルの再構築、という3段階が考えられる。

このような現在進行中の時系列予測は、種々の分野で用いられており、在庫管理、設備管理における意思決定局面への適用などがある。この内、(2)の構造変化検出は、例えば設備管理において、時間と共に劣化する資本設備を取替える適切な更新時期を見出す上で重要となる。

本学位論文は、この構造変化検出に関するものであり、特に、従来の逐次確率比検定(SPRT: Sequential Probability Ratio Test)の適用においては、構造変化が一旦生じた場合、元の状態に復元しないという構造モデルが陽に入っていないことに着目し、その改良案としての新確率比(NSPR: New Sequential Probabilistic Ratio)による方式に関する研究成果をまとめたものである。

すなわち、第1章の「序論」では、新確率比の着想に至る研究上の動機や背景等について記述している。

第2章の「統計解析における数学的諸定義」では、従来の構造変化検出法として標準的なChow Testや逐次確率比検定(SPRT)の説明及び、それらを理解するための統計学における諸定義を記述している。

第3章の「非可逆構造変化モデルによる新確率比」では、逐次確率比検定(SPRT)方式が、構造変化が生じていないという帰無仮説 H_0 と、構造変化が生じているという対立仮説 H_1 とを同等な独立事象として扱い、データ観測の都度、ベイズの定理によって、それらの事象の事前確率を推定かつ更新して行く、ベイズ推定方式と等価であることを示している。

そして実際には、それらの事象は毎回独立的に発生するものではなく、どこかの時点で構造変化が発生すると元の状態に復元しないという考えから、非可逆モデルを導入した構造に基づく新確率比(NSPR)を提案し、その帰納的表現式も導出している。

第4章の「構造変化検出精度の比較実験」では、SPRTとNSPRの方式について、次の様な比較実験結果と評価を記述している。すなわち、2変数を説明変数とした2種類の重回帰式に基づいて、構造変化点を一定に保ちつつ、ノイズを含めた人工的時系列データを種類毎に200個(合計400個)発生させてから、それらのデータに対するSPRTとNSPRの構造変化点検出実験を行い、直観的に妥当と思われる評価式によって定量的評価を行った。更に、それらの評価値を比較し、NSPRの優れていることを記述している。

続く第5章の「最適停止問題と新確率比」では、コストを考慮した時系列モデル更新時期決定を最適停止問題(Optimal Stopping Problem)として定式化して扱う方式と新確率比による方式との関係を説明している。これにより、コストを導入した制約条件の付加した場合において、新確率比を使用し、最適停止問題による構造変化検出方式の拡張を図ることが可能であることを示している。

第6章の「結論」では、以上の研究成果をまとめ、なお追究すべき今後の研究課題について述べている。

審査結果の要旨

進行中の時系列予測では、(1)予測モデルの構築段階、(2)観測されたデータと予測モデルとの乖離検出(構造変化発生の検出)を行う段階、(3)そして構造変化検出後、速やかに以降の時系列データに対する予測モデルの再構築、という3段階が考えられる。

この現在進行中の時系列予測は、在庫管理、設備管理における意思決定局面への適用など、種々の分野で用いられている。この内、(2)の構造変化検出は、例えば設備管理において、時間と共に劣化する資本設備を取替える適切な更新時期を見出す上で極めて重要となる。

本学位論文は、この構造変化検出に関するものである。特に、従来の逐次確率比検定(SPRT: Sequential Probability Ratio Test)においては、構造変化が一旦生じた時、元の状態に復元しないという非可逆構造が陽に含まれていないことに着目し、SPRTの改良案として、新確率比(NSPR: New Sequential Probabilistic Ratio)による方式を提案するとともに、以下の様に、その新確率比と有効性等について研究成果をまとめたものである。

すなわち、第1章の「序論」では、新確率比の着想に至る研究上の動機や背景等について記述している。第2章の「統計解析における数学的諸定義」では、従来の構造変化検出法として標準的なChow Testや逐次確率比検定(SPRT)の説明及び、それらを理解するための統計数学における諸定義を記述している。第3章の「非可逆構造変化モデルによる新確率比」では、逐次確率比検定(SPRT)方式が、構造変化が生じていないという帰無仮説 H_0 と、構造変化が生じているという対立仮説 H_1 とを同等な独立事象として扱い、データ観測

の都度、ベイズの定理によって、それらの事象の事前確率を推定かつ更新して行く、ベイズ推定方式と等価であることを示している。そして実際には、それらの事象は毎回独立的に発生するものではなく、どこかの時点で構造変化が発生すると元の状態に復元しないという考えから、非可逆モデルを導入した構造に基づく新確率比(NSPR)を提案し、漸化式も導出している。第4章の「構造変化検出精度の比較実験」では、SPRTとNSPRの方式について、次の様な比較実験結果と評価を記述している。すなわち、2変数を説明変数とした2種類の重回帰式に基づいて、構造変化点を一定に保ちつつ、ノイズを含めた人工的時系列データを種類毎に200個(合計400個)発生させてから、それらのデータに対するSPRTとNSPRの構造変化点検出実験を行い、直観的に妥当と思われる評価式によって定量的評価を行っている。更に、それらの評価値を比較して、NSPRの優位性を立証している。続く第5章の「最適停止問題と新確率比」では、コストを考慮した時系列モデル更新時期決定を最適停止問題(Optimal Stopping Problem)として定式化した後で、最適解定理を構成的に証明し、その最適解定理に基づく方式と、新確率比による方式との直接的関係性を記述している。これにより、コストを導入した制約条件の付加した場合において、新確率比を使用し、最適停止問題による構造変化検出方式の拡張を図ることが可能であることも示している。第6章の「結論」では、以上の研究成果をまとめ、なお追究すべき今後の研究課題について述べている。

以上の内容はジャーナル誌論文や、国際会議論文として発表されており、その新規性と有用性から、博士の学位論文に相応しいものと判定する。

最終試験結果の要旨

2015年2月16日において、1時間30分の公聴会后、最終試験を行った。最終試験では、学位論文に記述された基本的事項やその関連について詳細な質疑応答が行われた。

例えば、時系列データにおける変化点検出法についての具体的質問や、「新確率比(NSPR)」とは何か、既存の「逐次確率比検定(SPRT)」との本質的差異は何か、また、新確率比の優位性はどこにあるのか、などの質問がなされた。

これらに対して、学位論文の3章と4章に述べられている着眼点や実験結果による説明がなされた。特に、新確率比の発想の着眼点については、情報理論で用いられるバイナリ通信路に基づいた説明がなされた。すなわち、構造変化が生じているという事象(事象A: 対立仮説の意味する事象)と、構造変化が生じていないという事象(事象B: 帰無仮説の意味する事象)との2事象を入力信号、観測データ値を受信信号とみなした場合の、事後確率の比がSPRTに相当する、という説明があった。

先ず、データ観測前の、入力信号に対応する2事象(A, B)の生起確率を各々1/2とする(初期値)。1回目の観測データ受信の時には、観測データ値が予測モデルに適合するか(予測当たり)、否か(予測外れ)を判断し、通信路における推移確率とBayesの定理を用いて

事後確率を求め、それを2事象(A, B)の生起確率と推定する。2回目の観測データ受信時には、1回目に得られた2事象(A, B)の推定生起確率を用いて事後確率を求め、1回目と同様に、2事象(A, B)の推定生起確率を更新する。それ以降は同様に更新を行いながら、2事象の推定生起確率の比を求めると、この比がSPRTと一致する。従ってSPRTでは、上記の2事象が独立的に扱われていることが分る。

本学位論文の著者は、上記の2事象を独立事象とすることに問題意識を持ち、一旦構造変化すると元の状態に復元しない非可逆の構造モデル導入を図ったこと、そしてそれに基づく新たな逐次確率比(NSPR)を導入した上で、有効性の実験的検証を行い、SPRTに対するNSPRの優位性が見られたこと、などの説明があった。

更に、最適停止問題における、期待値としての評価関数の帰納的定式化の意味や、最適解定理における証明などについての質疑や討議も行われた。

いずれに対しても的確な質疑応答がなされたと判断し、最終試験は合格と判定する。