

氏名（本籍）	志賀元紀（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 292 号
学位授与日付	平成 18 年 3 月 25 日
専攻	電子情報システム工学専攻
学位論文題目	離散情報源に対するエントロピーの推定精度に関する研究 (A study on entropy estimation accuracy for discrete information sources)
学位論文審査委員	(主査) 教授 岸田邦治 (副査) 教授 田中嘉津夫 教授 速水 悟 助教授 横田康成

論文内容の要旨

情報理論において、エントロピーは、情報源から得られる情報量の期待値として、確率論の立場から定義されている。エントロピーは、平均符号長の下限になることが示されているため、情報理論において、最も重要なパラメータとして知られている。さらに、多変量解析や自然言語処理や信号・画像処理などの確率的な事象を扱う多くの分野において、エントロピーを用いた解析法やエントロピー最大化原理に基づく解析法に関する研究が活発に行われている。このように、エントロピーは、基本的かつ重要なものとして広く知られている。

ところで、脳・神経系では、スパイク列と呼ばれるインパルス状の電気信号を用いて、神経細胞同士が情報交換することにより、様々な情報処理を実現している。こうした情報処理機構を解明するためには、情報がスパイク列にどのように埋め込まれているか、つまり、情報のスパイク列への符号化法を明らかにすることが重要である。この課題を達成するために、まず、情報理論の立場から神経細胞が発生するスパイク列を解析することが必要不可欠である。近年、Steveninck らは、神経細胞が発生するスパイク列のエントロピーを推定した。そして、推定精度問題を議論し、神経細胞の伝達するエントロピーが従来予想より大きくなる可能性を示した。こうしたことから、エントロピーの推定誤差を明らかにし、さらに、高い推定精度をもつエントロピー推定量が渴望されるようになった。

離散情報源のエントロピーは、情報源記号の生起確率の関数として定義されている。一般的に情報源記号の生起確率が未知であるため、エントロピーは、観測信号を用いて推定される。最も広く知られるエントロピー推定量は、観測信号から情報源記号の生起確率を最尤推定し、その推定値をエントロピーの定義式に代入するものである。このエントロピー推定量は、様々な解析に広く用いられるが、バイアス誤差や平均 2 乗誤差などの推定誤差を最小にしないことが明らかになっている。こうしたことから、バイアス誤差を改善す

るエントロピー推定量や平均2乗誤差を最小にするエントロピー推定量がそれぞれ提案されている。しかし、パラメータの推定問題において、バイアス誤差と平均2乗誤差が、しばしば、トレードオフ関係に制約されるにも関わらず、エントロピー推定では、そのトレードオフ関係について、ほとんど議論されてこなかった。

本論文では、バイアス誤差を一定値に制約する条件下で平均2乗誤差を最小にする新たなエントロピー推定量を導出した。その導出の際、従来提案された広範な推定量が属する、1変数関数の和で表されるエントロピー推定量のクラスを扱うことにした。そして、バイアス誤差を制約条件として平均2乗誤差を最小にする、つまり、ラグランジュの制約付き最適化問題の解として、新たなエントロピー推定量を与えた。さらに、1変数関数の和で表されるエントロピー推定量のバイアス誤差と平均2乗誤差を導出した。そして、数値実験より、新たなエントロピー推定量のバイアス誤差と平均2乗誤差の具体例を示し、バイアス誤差と平均2乗誤差がトレードオフ関係に制約されることを明らかにした。

さて、生体から発生する信号は、生体の疲れや順応が原因になり、長時間の記録を困難にする場合が多い。こうした状況で、エントロピーの推定精度を高めるためには、エントロピー推定を独立な標本から繰り返して行い、得られた複数の推定値の集合平均を最終的な推定結果にする手法が用いられる。こうした手法において、平均2乗誤差を最小にするには、推定の試行回数が1回の場合、平均2乗誤差を最小にする推定量が最も望ましい。一方、もし仮に独立な推定を無限回できるならば、この場合、各推定にバイアス誤差がゼロとなる推定量、つまり不偏推定量を選択すれば、最終的な推定値の平均2乗誤差をゼロにすることができる。しかし、通常、推定の試行回数は有限回である。そこで、最終的な推定値の平均2乗誤差を最小にするには、各1回の推定のバイアス誤差と平均2乗誤差がトレードオフ関係に制約されるため、バイアス誤差と平均2乗誤差を適切に配分する必要がある。

そこで、本論文では、エントロピー推定を独立な標本から繰り返し、得られた複数の推定値の集合平均を最終的な結果にする推定法の平均2乗誤差を導出し、各1回の推定におけるバイアス誤差と平均2乗誤差の最適な配分比を明らかにした。さらに、その配分比を用いることにより、平均2乗誤差を最小にする新たなエントロピー推定量を提案している。

論文審査結果の要旨

神経系、特に脳ではスパイク列と呼ばれるインパルス状の電気信号を用いて、神経細胞同士が情報交換することにより、様々な情報処理を実現している。こうした情報処理機構を解明するためには、情報がスパイク列にどのように埋め込まれているか、つまり、情報のスパイク列への符号化法を明らかにすることが重要である。この課題を達成するために、まず、情報理論の立場から神経細胞が発生するスパイク列を解析することが必要不可欠である。近年、Steveninckらは、神経細胞が発生するスパイク列のエントロピーを推定した。そして、推定精度問題を議論し、神経細胞の伝達するエントロピーが従来予想より大きくなる可能性を示した。こうしたことから、エントロピーの推定誤差を明らかにし、さらに、高い推定精度をもつエントロピー推定量が渴望されるようになった。

離散情報源のエントロピーは、情報源記号の生起確率の関数として定義されている。一般的に情報源記号の生起確率が未知であるため、エントロピーは、観測信号を用いて推定される。最も広く知られるエントロピー推定量は、観測信号から情報源記号の生起確率を最尤推定し、その推定値をエントロピーの定義式に代入するものである。このエントロピー推定量は、様々な解析に広く用いられるが、バイアス誤差や平均 2 乗誤差などの推定誤差を最小にしないことが明らかになっている。こうしたことから、バイアス誤差を改善するエントロピー推定量や平均 2 乗誤差を最小にするエントロピー推定量がそれぞれ提案されている。しかし、パラメータの推定問題において、バイアス誤差と平均 2 乗誤差が、しばしば、トレードオフ関係に制約されるにも関わらず、エントロピー推定では、そのトレードオフ関係について、ほとんど議論されてこなかった。

こうしたことから、博士論文の 3 章では、バイアス誤差を制約条件として、平均 2 乗誤差をラグランジュの未定乗数法により最小にする新しいエントロピー推定量を提案している。その導出の際、従来提案された広範な推定量が属する、1 変数関数の和で表されるエントロピー推定量のクラスを扱っている。そして、バイアス誤差を制約条件として平均 2 乗誤差を最小にする、つまり、ラグランジュの制約付き最適化問題の解として、新たなエントロピー推定量を与えている。さらに、3 章では、1 変数関数の和で表されるエントロピー推定量のバイアス誤差と平均 2 乗誤差を導出し、バイアス誤差と平均 2 乗誤差がトレードオフ関係に制約されることを明らかにしている。

ところで、生体から発生する信号は、生体の疲れや順応が原因になり、長時間の記録を困難にする場合が多い。こうした場合、エントロピーの推定精度を高めるためには、エントロピー推定を独立な標本から繰り返して行い、得られた複数の推定値の集合平均を最終的な推定結果にする手法が用いられる。こうした手法において、最終的な推定値の平均 2 乗誤差を最小にするには、各 1 回の推定のバイアス誤差と平均 2 乗誤差がトレードオフ関係に制約されるため、バイアス誤差と平均 2 乗誤差を適切に配分する必要がある。

そこで、博士論文の 4 章では、エントロピー推定を独立な標本から繰り返し、得られた複数の推定値の集合平均を最終的な結果にする推定法の平均 2 乗誤差を導出し、各 1 回の推定におけるバイアス誤差と平均 2 乗誤差の最適な配分比を明らかにしている。そして、その得られた配分比を用いることにより、平均 2 乗誤差を最小にする新たなエントロピー推定量を提案している。

博士論文は、申請者の代表的な 2 編の学術論文に基づいており、その研究成果の新規性および有用性が明確にまとめられている。以上の理由により、論文審査の結果を合格とする。

最終試験結果の要旨

申請者の主な研究成果は、従来法より高い推定精度を有する新たな 2 つのエントロピー推定量である。一つ目のエントロピー推定量は、バイアス誤差を制約条件として、平均 2 乗誤差をラグランジュの未定乗数法により最小化するものである。また、2 つ目の推定量は、推定を独立な標本から繰り返す場合において、平均 2 乗誤差を最小にするものである。

本論文において、2つのエントロピー推定量の推定精度が優れていることが、理論的および数値的に示されている。

これらの研究成果は、学術論文4編、国際会議論文集2編に掲載されており、したがって、その研究内容は、質・量ともに、博士論文としてふさわしいものである。さらに、分担執筆した著書も発行予定である。以上の理由により、最終試験の結果を合格とする。