

氏名(本籍)	あや 綾	こうじろう 皓二郎		
学位の種類	医	学	博	士
学位記番号	医	第	1743	号
学位授与年月日	昭和61年2月26日			
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当			
最終学歴	昭和45年3月 東北大学大学院工学研究科修士課程修了			
学位論文題目	A Maximum Entropy Criterion of Filtering and Coding for Stationary Autoregressive Signals: Its Physical Interpretations and Suggestions for Its Application to Neural Information Transmission. (定常な自己回帰型の信号に対する濾波と符号化の最大エントロピー規準: その物理的解釈と神経系の情報伝達への適用に対する示唆)			

(主 査)

論文審査委員 教授 中 浜 博 教授 田 崎 京 二
教授 小 暮 久 也

論文内容要旨

本研究は神経系を含む通信系における情報伝達の基本的問題に情報科学、生物物理学の立場からアプローチし、濾波 (filtering) と符号化 (coding) の物理的解釈とその神経生理学への応用について検討を試みたものである。

目 的

我々は Shannon の情報量から導かれる “簡易従属度 (simplified dependency)” と呼ぶ統計量を用いて神経スパイク列、複合活動電位等の時系列信号の分析法を開発してきたが、この分析の物理的意味付や生理学的解釈は十分とは言えなかった。そこで本論文では定常な自己回帰型 (autoregressive, AR) 信号について、①情報のエントロピーの概念を明らかにすること、②濾波と符号化の最大エントロピー (maximum entropy, ME) 規準を物理的に解釈すること、③ME規準の神経系の情報伝達への適用に対する示唆を得ること、を目的として、符号化の問題を理論的に検討し、Shannon の通信系のモデルとは異なった、通信系の新しいモデルを提案し、熱力学と類似な通信理論、すなわち、“情報力学 (information dynamics)” が予期されることを示唆した。

方法及び結果

1) AR信号の従属度分析：簡易従属度 D_m は Shannon の情報量 H_0 、 m 次条件付情報量 H_m を用いて次式により定義される。

$$D_m \triangleq H_0 - H_m \quad (1)$$

ここで $H_0 - H_m$ は相互情報量であり、符号化の伝達情報量 (エントロピー) を表わす。また(1)式右辺が Garner の全拘束量 (Kullback 情報量) の増分に等しいことから、 D_m は系の冗長度 (非平衡構造) の増加を意味する。 m 次 AR 信号の D_m は、ガウス性を仮定すると、

$$D_m = (1/2) \log \sigma_0^2 / \sigma_m^2 \quad (2)$$

となる。ここで σ_0^2 、 σ_m^2 は信号の分散 (全信号電力)、最小誤差分散 (雑音電力) である。(2)式は濾波の最小 2 乗誤差規準 (雑音電力の最小化) と符号化の ME 規準 (伝達情報量の最大化) とが等価であることを示す。従って濾波と符号化は同一の概念とみなされる。

2) AR 信号の濾波と符号化の物理的解釈：符号化 (encoding, convolution) においては信号は白色雑音により駆動された形成フィルター (符号器) の出力として生成される。ここで σ_m^2 、 σ_0^2 はフィルターの入力・出力電力を、 D_m はゆらぎの増幅による信号生成の利得を表わす。

他方、復号化 (decoding, deconvolution) では信号は白色化フィルター (復号器) により受容され、白色雑音が不可避的に放出される。ここで入力電力 σ_0^2 のうち有効電力として $S = \sigma_0^2 - \sigma_m^2$ が復号化に使われ、残りの $N = \sigma_m^2$ は雑音電力として雑音源に引渡される。従ってこのフィルターの信号対雑音電力比、変換効率は S/N 、 $\eta = (\sigma_0^2 - \sigma_m^2) / \sigma_0^2$ となる。よって D_m は

$$D_m = (1/2) \log (1 + S/N) \quad (3)$$

で表わされる。 D_m の最大化は S/N 、 η の最大化に等しい。以上から、符号化、復号化に各々 1 対の信号源と雑音源を必要とし、雑音は系に固有の存在であるとする通信系の熱機関と類似なモデルを作ることができる。なお、AR 信号が定常ならば濾波の convolution と deconvolution は可逆であるので、定常な AR 通信系の符号化と復号化は可逆となる。そしてこの系の通信路容量はフィルター (変換器) の利得・帯域幅積とみなされる。雑音のある AR 符号化は伝達情報量、変換効率が最大であるという意味で最適であり、その符号は信号から抽出された AR 係数か、これと等価なパラメーターの集合であると考えられる。

考 察

信号が非平衡状態にあることは変換器が機能するために必須であるが、他方この非平衡状態は変換器の効率を下げる原因にもなっている。ME 規準はこの矛盾を解決しようとするものである。AR 通信系は熱力学の Carnot サイクルと極めて良い対応を示す。すなわち、AR 系は定常で可逆で効率が最大であり、エントロピーの変化は全系で零である。可逆系は最大伝達情報量が無損失で理想系である。他方、不可逆系では復号化のエントロピーは符号化のそれよりも小さく、最大伝達情報量の一部が失なわれる。情報のエントロピーは物理エントロピーと同じ形式で表わされるが、負の物理エントロピーの性質を持つ。ME 規準は熱力学の第 2 法則に対応する。可逆な AR 通信系が理想系であることは、AR 符号化が神経系の符号化の研究に実際に適用できることは限られることを示唆している。中枢神経系のニューロンから記録した自発発射のスパイク列の信号対雑音電力比、簡易従属度の値は概して小さく、緊張的ニューロンでは $S/N \sim 0.5$ 、 $D_m \sim 0.3$ [bits]；相動的ニューロンで $S/N \sim 0.15$ 、 $D_m \sim 0.08$ [bits] である。記憶の概念は一般に符号化の概念に含まれるので、神経系の記憶を取扱う場合でも記憶に符号化が欠かせないことに注意する必要がある。例えば、信号を閉じた通信路を循環させることにより情報を保持できる。これが神経系の想定上の反響回路による動的記憶である。符号化や記憶には正帰還系による信号の秩序形成が与っていると考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

本研究において著者は、Shannon流の情報理論 (information theory) を再検討し、神経系を含む通信系の情報伝達に関して著者独自の興味深い考え方と方法論および通信系の新しいモデルを提案し、熱力学と類似な通信理論ともいうべき“情報力学 (information dynamics)”が期待されることを示唆している。

本論文では、定常な自己回帰型の時系列信号を対象にして、次の3点を具体的な研究目的としている：

- (1) 情報のエントロピーの概念を明らかにすること。
- (2) 濾波と符号化の最大エントロピー規準を物理的に解釈すること。
- (3) 最大エントロピー規準の神経系の情報伝達への適用に対する示唆を得ること。

著者はこれらの目的を達成する確かな理論的結果を得ている。この成果は生物系のサイバネティクス (biological cybernetics) や数理生物学のみならず、神経生理学の研究者からも注目を集め、はば広い評価を受けつつある。

次に本論文の主な項目について順を追って述べる。著者はまず自己回帰信号の従属度分析において、簡易従属度 (simplified dependency) と呼ぶ統計量と他の種々のエントロピーや分散、相関係数との関係式を明らかにし、濾波の最小2乗誤差規準と符号化の最大エントロピー規準とが等価であることを導く。次に自己回帰信号の物理的解釈では、伝達情報量の最大化は濾波の信号対雑音電力比、変換効率の最大化に等しいことを示す。さらに両規準の等価性から濾波と符号化は同一の概念とみなし、雑音のある自己回帰符号化が最適であることを明らかにしている。考察では、エネルギー変換の立場から熱機関と類似な通信系のモデルを考案し、自己回帰型の通信系と最大エントロピー規準が熱力学の Carnot サイクルと第2法則にそれぞれ対応することを指適している。さらに神経系の情報伝達に関して自己回帰符号化は理想的なもので、それ自体が神経系の符号化に実際に適用できることは限定されるという示唆を得ている。また記憶の概念は一般に符号化の概念と分離できないことを示し、神経系の記憶においても符号化を必要とすることに注意を喚起している。さらに符号化や記憶には正帰還系による信号の非平衡構造の形成が必須であることを指摘している。

以上のように、本研究は情報のエントロピーと最大エントロピー規準の概念およびその適用法を従来の研究よりもいっそう明確にして、明快な生物物理的意味付を与えており、今後の神経系の符号化機序の研究に新たな視点と知見をもたらすものと考えられる。

よって本論文は学位を授与するに値するものと認める。