

論文内容の要旨

博士論文題目 音高知覚に関する情報表現の情報理論的観点からの研究

氏名 前田 新一

(論文内容の要旨)

本論文では、脳の初期知覚系、特に音高知覚(ピッチ)に関する情報表現について議論する。聴覚で処理される音声情報は、情報理論における情報量の観点からは非常に冗長な情報となっている。冗長性と予測可能性は密接な関係を持っているが、脳は情報の予測可能性を積極的に利用していることが認知心理学的な研究からわかっている。その典型的な例は錯覚現象に現われており、いくつかの錯覚現象は、情報の傾向を予測した推定を行っていると考えられることで説明することができる。

ここではまず、エントロピー最大化に基づく聴覚モデルによって音高知覚でみられる錯覚現象を説明するとともに、いくつかの生理学的知見を説明する。このモデルにおけるエントロピー最大化は、正確には結合エントロピーの最大化を意味するが、結合エントロピー最大化を周辺エントロピーの最大化と独立化とに2段階にわたる手続きに分離して結合エントロピーの最大化を行っている。このモデルは、結合エントロピーを最大化させることを保証することはできないが、解剖学的な構造との対応がとりやすいモデルとなっている。

次に、この2段階の手続きに分離していたエントロピー最大化に基づくモデルをノイズ付き非線形独立成分分析として定式化することで理論的に一貫したモデルとした。導出したノイズ付き非線形独立成分分析は、線形なノイズ付き独立成分分析を一般化するモデルとなった。このモデルを音声、音楽データを学習させてより詳細な音高知覚シミュレーションを行った。

最後に、エントロピー最大化や独立化がなぜ効率的な情報表現と関係するかをレート歪み理論に基づく圧縮符号の観点から議論する。最適なブロック符号化による圧縮符号は、ベクトル量子化によって表現することができ、そのベクトル量子化を最適化する方法も考案されている。しかし、ベクトル量子化は復号や最適化がベクトルの次元に対して指数的に計算量が増えてしまう問題を持っている。この問題をProduct Codeによる構造化によって解決するとともに、その最適化法を提案する。また、Product Codeによる最適な圧縮符号の生成とエントロピー最大化問題がどのように関係するかについて述べる。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、脳の情報表現、特に音高知覚(ピッチ)に関する情報表現について情報理論的立場からの解明を目指したものである。著者は、音の知覚全般に対して提唱されている Bregman の法則に基づく音源分離の考え方が音の統計的な性質を利用した法則に相同であると考え、エントロピー最大化、独立化の観点から音の周波数情報をより冗長性のない情報へと符号化することを試みている。その上で、この符号化によって得られた情報表現によって Virtual Pitch と呼ばれる音高知覚でみられる錯覚現象の一つが説明できることを計算機シミュレーションによって示唆している。また、ここで行った情報処理がどういう意味をもつかを歪みあり符号の観点から説明することを試みている。本論文の主な成果は以下のように要約される。

1. 従来、天下り式に与えられていた音高知覚に関する情報処理モデルをエントロピー最大化や独立化といった観点から説明することを試み、従来モデルと同様に音高知覚でみられる Virtual Pitch の現象を計算機シミュレーションによって再現できることを示している。
2. 独立化を行う情報処理モデルとして最尤推定に基づく非線形ノイズ付き独立成分分析を提案している。モデルは、従来の線形ノイズ付き独立成分分析や非線形ノイズなし独立成分分析の一部を包含するアルゴリズムとして定式化することに成功している。また、従来、最尤推定に基づく線形ノイズ付き独立成分分析が線形ノイズなし独立成分分析を包含するアルゴリズムとして定式化できなかった原因について言及している。
3. エントロピー最大化や独立化を行うアーキテクチャを companding 関数を用いた product code の一種とみなすことで、エントロピー最大化や独立化といった目的関数が歪みあり符号の観点からみて効率的な符号器の設計に役立つことを例証する計算機シミュレーションを行っている。また、同時に変換符号器となる product code の設計において Karhunen-Loeve 変換に勝る符号化性能を示すことで実用性についての可能性も示している。

本論文は、情報理論の裏づけのあるモデルを示すことで脳の初期知覚系の情報表現、情報処理様式がもつ意味を探る上で欠かせないトップダウン的なアプローチに対する一つの提案を与えるものであり、理学、特に、音高知覚と歪みあり符号の分野において学術上の寄与が十分である。よって、博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。