

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ハエの動き視覚経路の情報表現の解明
Title(English)	Studies on Information Representation in Fly Motion Visual Pathways
著者(和文)	池田英彬
Author(English)	Hideaki Ikeda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10871号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青西 亨,中村 清彦,山村 雅幸,瀧ノ上 正浩,宮下 英三
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10871号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻:	知能システム科学	専攻	申請学位 (専攻分野):	博士	(工学)
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名:	池田 英彬		指導教員 (主):	青西 亨	
Student's Name			Academic Supervisor(main)		
			指導教員 (副):		
			Academic Supervisor (sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文はハエの初期視覚神経節内部にある情報伝達経路と、それがどのような情報を表現しているかに注目する。ハエの視覚神経節内には二つの主要な視覚情報伝達経路がある。これらの経路は lamina にある L1 細胞と L2 細胞から始まるため L1 経路・L2 経路と呼ばれる。これら二つの経路で伝達される情報は動き刺激に選択的に応答する細胞である lobula plate tangential cells (LPTCs)で統合される。さらに、明度が増加する視覚刺激 (ON 刺激) と明度が減少する刺激 (OFF 刺激) が順番に提示される視覚刺激 (ON-ON, ON-OFF, OFF-ON, OFF-OFF の 4 種) を用いた実験に基づき、視覚情報伝達経路がどのような信号を伝達するかについての仮説がある。一つは、L1 経路は ON-ON 刺激による信号を伝達し、L2 経路は OFF-OFF 刺激による信号を伝達するという仮説である。これに対応するモデルは Two-detector (2D)モデルである。もう一つは、L1 経路は ON-ON, OFF-ON, OFF-OFF 刺激による信号を伝達し、L2 経路は ON-ON, ON-OFF, OFF-OFF 刺激による信号を伝達するという仮説である。これに対応するモデルは Six-detector (6D)モデルである。本研究はこれら対立する仮説の中から、第 2 章・第 3 章で示す二つの手法で、より妥当な仮説を選択する。

第 2 章では Lobula Plate Tangential Cell 膜電位応答データに基づくモデル選択を行う。L1 経路と L2 経路の情報表現を Eichner らは 2D モデルで、Clark らは 6D モデルで説明した。そして、彼らはモデルのパラメータとデータへの適合度をそれぞれの実験で検証した。加えて、Joesch らはモデル応答と膜電位応答との定性的一致から、2D モデルの応答がより正確にデータを再現しているとした。しかし、これら先行研究には問題点がある。それは統計的手法を用いて定量的に 2D モデルと 6D モデルを比較した例がないことである。第 2 章ではパラメータ探索と交差検証によりモデルの汎化能力を導出し、どの仮説が動き視覚経路の情報表現をよりよく再現できているのかを定量的に検証する。

本章で使用するデータ取得時に使用された視覚刺激は連続的に変化し、かつ、そのノイズを付加したものである。4D モデル、6D モデル、2D モデルのデータに対して最適なパラメータをグリッドサーチで探索する。各モデルについて、各パラメータでのシミュレーション結果と膜電位応答データとの平均 2 乗誤差 (Mean Square Error, MSE) を計算し、モデルのデータ適合度の尺度とする。加えて、モデルの汎化能力を求めるために交差検証法を用いる。

結果として、最適パラメータ、並びに最適パラメータを用いた時の各モデルの応答例、そして汎化誤差を示す。各モデルの汎化誤差の大小関係を仮説検定した結果、2D モデルの汎化誤差は他のモデルよりも有意に小さかった。

議論として、4D モデルと 6D モデルの最適パラメータは LPTC のデータから推定されたが、LPTC の特性に一致しないことを示す。したがって、2D モデルを支持する結果を得た。

第 3 章では白色正規ノイズに対するモデル応答の性能解析を行う。相関型動き検知モデルのもつ動きの符号化性能 (coding ability), つまり, 入力刺激が選好方向に動いているのか非選好方向に動いているのかを弁別する性能をモデル構造から導出して評価することが行われている。既に HR モデルの正弦波刺激や白色ノイズに対する応答が数学的に解析されている。しかし, 2D モデルのように半波整流器を含んだモデルの応答の数学的解析は報告されておらず, 数値シミュレーションによる性能評価のみ行われている。加えて, これらの先行研究は性能の尺度として主に振幅応答を使用している。動き検知モデルの動き符号器 (motion encoder) としての頑強性を評価するためにはモデルの応答の揺らぎを取り扱う必要がある。しかし, 相関型動き検知器の応答のゆらぎを解析する場合, 高次モーメントを取り扱う必要がある。特に 2D モデルの応答解析は正規分布に従わない確率変数の高次モーメントを取り扱う必要があるため困難である。

本章では白色正規ノイズに対する応答の平均と分散を数学的に導出し, モデルの動き符号器としての性能を評価する。特に, 2D モデルの定常応答の平均と分散を導出する際には半波整流された白色正規ノイズの高次キュムラントを用いる。これにより今まで困難であった 2D モデルの応答解析を可能にした。導出した解析解の正確さは数値シミュレーションで検証する。モデル性能の尺度として, ゆらぎに対する信号の割合 (signal-to-fluctuation-noise ratio, SFNR) を採用する。

結果として, 既存研究から引用した生理学的に妥当なパラメータでは 2D モデルの SFNR が HR モデルのものと同一程度であった。同時に, 第 2 章で推定したパラメータでは 2D モデルの SFNR が HR モデルのものよりも高かった。

二つの方法で得られた結果はともに 2D モデルを支持する。そして 2D モデルは ON-ON 経路・OFF-OFF 経路のみを持つモデルであるから, 本研究の結果はハエの動き視覚経路の情報表現が ON-ON 経路・OFF-OFF 経路のみで構成されるとする仮説を支持する。本研究はこの仮説を先行研究とは異なる二つの観点から支持する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	知能システム科学	専攻	申請学位（専攻分野）：	博士	（工学）
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名：	池田 英彬		指導教員（主）：	青西 亨	
Student's Name			Academic Supervisor(main)		
			指導教員（副）：		
			Academic Supervisor(sub)		

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The motion detection mechanism of animals, especially insects, has been attracted attention of many researchers. Several quantitative models of motion-sensitive neurons in fly's early visual system called lobula plate tangential cells (LPTCs) have been proposed: the four-detector (4D), the two-detector (2D) and six-detector (6D) models. These models correspond to the different hypotheses about information representation in fly motion visual pathways. The purpose of this study is to select the more plausible hypothesis by comparing the motion detectors performed by the two following ways.

Firstly, this study selects the most suitable model from the above three models by fitting electrophysiological data of LPTCs in responses to motion stimuli. The selection is performed using the data acquired in more various stimulation conditions than the previous works, and possibility of overfitting in parameter estimation can be reduced comparing to the previous works. This study calculates generalization errors of the models by cross-validation method. The results show that the 2D model has been selected by cross-validation.

Secondly, this study mathematically verifies model abilities as motion encoder to analyze stationary responses of the 2D model and the Hassenstein-Reichardt model (HR model) to white Gaussian noise. The signal-to-fluctuation-noise ratio is used as a measure of motion encoding abilities of the models. This study calculates higher-order cumulants of a rectified Gaussian distribution to analyze the stationary responses of the 2D model. The results show that the 2D model can be selected because the 2D model has almost the same encoding ability and lower implementation cost compared with the HR model.

These results have supported the hypothesis behind the 2D model. The hypothesis has suggested that the information representation in fly motion vision pathways includes only the two pathways, the ON-ON and OFF-OFF pathways, to detect motion.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).