

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ニューラルネットワークを用いた瞳孔応答モデルと動画番組視聴時への適用
Title(English)	A Neural-Network-Based Eye Pupil Reaction Model for Use with Television Programs
著者(和文)	浅野樹美, 中山実, 清水康敬
Authors(English)	Shigeyoshi Asano, Minoru Nakayama, Yasutaka Shimizu
出典(和文)	日本教育工学雑誌, Vol. 18, No. 2, pp. 61-70
Citation(English)	Japan J. of Educational Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 61-70
発行日 / Pub. date	1995, 1

ニューラルネットワークを用いた 瞳孔応答モデルと動画番組視聴時への適用†

浅野樹美*・中山 実*・清水康敬*

東京工業大学教育工学開発センター*

人間の瞳孔面積は、対光反射によって輝度の影響を受けて変化するが、精神活動を反映した変化もする。この特性を利用して教育テレビ番組等の評価を行うためには、瞳孔面積変化から輝度の影響を取り除く必要がある。本論文では、瞳孔面積変化から精神活動を抽出するために、階層型のニューラルネットワークを用いた、輝度に対する瞳孔面積変化の非線形モデルを検討した。そして、実際の番組をサンプルとして、M系列、マルコフ系列を用いた疑似番組を作成し、実際の瞳孔応答を調べてモデルを改良した。その結果、実際の番組を見た際の瞳孔面積変化から輝度の影響を除去することに關して、従来モデルよりも良い性能が得られた。また、モデルの内部表現が実際の生体機構と対応していることを確認した。さらに、テレビ番組視聴時の瞳孔面積値を時系列的に補正した結果、番組内容に対応していることを示した。

キーワード：瞳孔応答、テレビ番組、精神活動、ニューラルネットワーク、内部表現

1. ま え が き

教育における映像による情報提示は重要である。その情報提示の内容に対して、学習者がどの程度注目するか、興味を持つか、等の精神活動を定量的に測定できれば、教育評価等、種々の場面で利用できると考えられる。ここで、人間の精神活動を定量的に測定する方法には、皮膚電気反射、脳波、あるいは瞳孔面積などの生体情報が挙げられる。この中で、本研究では、瞳孔応答をとりあげ、精神活動の抽出を行うことを目的とした。

ところで、瞳孔は、精神活動と、対光反射による輝度の影響によって変化する。そこで、精神活動だけによる変化を抽出するためには、輝度の影響を取り除く必要がある。瞳孔応答は輝度と精神活動が完全に独立であるとは言いきれないが、輝度と内容の時間的変化が遅い場合には、2つの要因が独立的に影響される(中山ほか1990)。そこで、瞳孔変化モデルが検討され(中山ほか1991)、また、精神活動と輝度による変化を含む瞳孔応

答モデルとして、図1に示すようなモデル(浅野ほか1992)を、先に提案した。

このモデルは、入力に輝度と精神活動、出力に瞳孔応答をもっている。そして、それぞれの入力に対して伝達関数 $H_b(x)$, $H_s(y)$ をもち、これらが線形結合されて瞳孔応答となる。輝度に対する伝達関数 $H_b(x)$ を知ることができれば、精神活動に対する瞳孔応答 $S(y)$ が分かる。すなわち、輝度変化に対する時系列的な瞳孔応答の機構が明らかになれば、精神活動による変化量が測定できることになる。

そこで、輝度に対する非線形瞳孔応答モデルとして、階層型のニューラルネットワークを用いたモデルを構成した。そして、このモデルが、輝度振幅が一定で、周期的な輝度変化に対する瞳孔応答について再現できることを示した(浅野ほか1994)。

しかし、一般的に輝度変化は振幅も周期も一定でないため、任意の輝度変化に対しても、この瞳孔応答モデルが適用できるのかということが明らかでなかった。また、このモデルによって輝度による瞳孔変化の影響を除去できるか、補正した瞳孔応答がテレビ番組の内容と対応しているか、十分に検討がされていなかった。

そこで本論文では、このモデルによって一般的なテレビ番組に適用させるために、周期も振幅も一定でない輝度変化に対する瞳孔応答モデルを検討した。また、輝度

1994年6月3日受理

† Shigeyoshi ASANO*, Minoru NAKAYAMA* and Yasutaka SHIMIZU*: A Neural-Network-Based Eye Pupil Reaction Model for Use with Television Programs

* CRADLE, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152 Japan

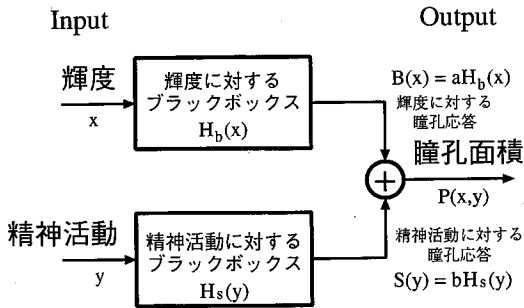


図1 瞳孔応答モデル

による変化量を取り除く方法を示した。本論文の目的を、以下に示す。

1. 周期も振幅も一定でない輝度変化に対する瞳孔応答モデルの構築
2. 動画番組を見せた際の瞳孔面積変化からの輝度影響除去
3. 動画番組に対する時系列瞳孔応答とテレビ番組内容の対応の検討

その結果、本論文で構成した瞳孔応答モデルにより、テレビ番組を見た際の瞳孔面積変化から輝度の影響を除去できた。これにより、番組に対する時系列的な瞳孔応答が番組の内容と対応していることを示した。

2. 瞳孔応答モデル

2.1. モデル化の方法

輝度に対する瞳孔応答非線形モデルは、図2に示す3層の階層型ニューラルネットワークのモデルである。

このモデルで、入力輝度は時々刻々と変化している。また、瞳孔応答は輝度変化に対して遅れることを考慮し、入力層にある程度の時間的加重を含ませている。つまり、1/30秒の時定数をもつ遅延素子を入力層の前処理部分に置くことにより、時間的に連続した輝度入力として入力

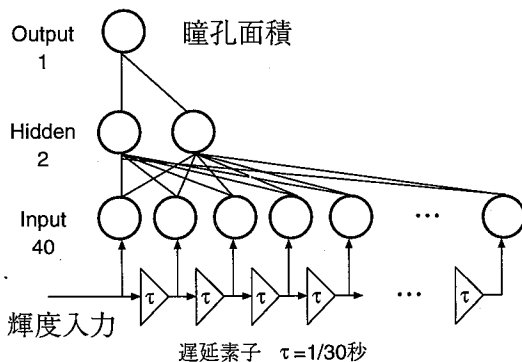


図2 ニューラルネットワークモデル

層を構成した(星宮 1990)。周期的な輝度変化に対する瞳孔応答モデル(浅野ほか 1994)では、入力層は40ユニットが最適であり、これにより約1.3秒分の輝度パターンがネットワークに記憶された。中間層は1層、2ユニットが最適で、出力層に相対瞳孔面積値を出力させるモデルであった。

本論文では、学習させる輝度変化としては、次節に述べる周期も振幅も一定でない輝度変化を与え、これに対するニューラルネットワークモデルの最適化を行った。

2.2. 学習データの作成

学習データとは、ニューラルネットワークモデルに学習させるためのデータを意味する。そこで、周期も振幅も一定でない輝度変化に対する学習データは、次のように作成した。

(1) 実際のテレビ番組の輝度変化

まず、実際のテレビ番組の輝度変化の様子を調べた。本論文では、テレビ番組を、いくつかのカテゴリに分けて数時間分録画し、輝度測定を行った。

番組のカテゴリは、輝度の変化幅、視聴対象などを考慮して以下の4つのカテゴリに分けた。

1. 子供向け教育テレビ番組
2. 語学番組
3. ドラマ番組
4. CM番組

これらの番組を選んだ理由は次のとおりである。

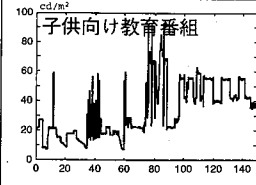
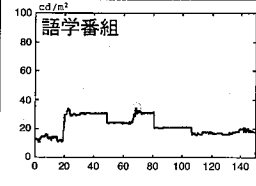
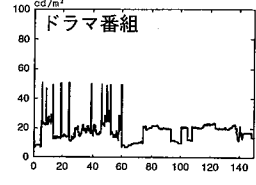
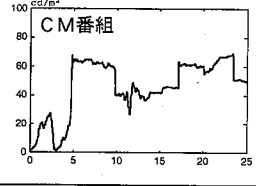
本論文の主たる目的は、テレビ番組の内容を瞳孔面積変化から調べることである。そこで、輝度変化の仕方が異なる4つの番組を取り上げた。例えば、子供向けの教育テレビ番組では、輝度が高く、変化の激しいものが多い。また、同じ教育番組でも、子供向け教育テレビ番組は輝度変化が大きく、語学番組は輝度変化が小さい。さらに、一般的な番組としてドラマとCMを加えた。

これらの4つのカテゴリに分類したテレビ番組の輝度変化分布を表1に示す。この表で、左の欄は時系列における輝度変化の様子を示す。

子供向け教育番組では、CM番組に次いで平均輝度が高く、標準偏差も大きい。また、CM番組では、かなり輝度変化が大きく、また平均輝度が高い。この2つのカテゴリは、同じような輝度分布をしているともいえる。ところが、語学番組、ドラマ番組は番組の平均輝度も低く、標準偏差も小さい。このような番組では瞳孔面積変化に輝度の影響はあまりないと思われるが、構築したモデルがこのような番組にも適用できることが望ましい。

以上の4つのカテゴリに分けられた番組に基づいて、後述のM系列とマルコフ系列を用いた灰色画面の内容的

表 1 サンプル番組の輝度変化

番組の分類	平均	標準偏差	最小値	最大値
 <p>子供向け教育番組</p>	26.3	10.2	6.7	65.3
 <p>語学番組</p>	22.1	6.7	7.0	79.1
 <p>ドラマ番組</p>	17.6	7.6	1.7	71.4
 <p>CM番組</p>	37.3	19.5	0.9	113.5

に意味のない疑似番組を作成した。そして、被験者に提示して瞳孔応答を測定した。それを、モデルに入力させる学習データを作成した。

ここで、上記の4つの番組の輝度変化そのものは被験者に提示していない。これは、番組輝度に基づく輝度振幅と非周期的な輝度変化を一般化し、それによる輝度変化系列を被験者に提示するためである。すなわち、輝度振幅が一定で非周期的な輝度変化としてM系列を用い、また、振幅について、実際の番組の輝度変化過程を一般化したものとしてマルコフ系列を用いた。

(2) M系列を用いた学習データ

M系列は、ある段数のシフトレジスタに対して、適当な排他的論理和を施して得られる周期がNの2値系列のことである。自己相関関数がデルタ関数に近く、近似的に白色雑音とみなせる。また、発生が簡単で、再現性もよい確定的な信号であることから、制御系の動特性の推定、通信、符号などの分野で広く用いられている(森下ほか 1982)。

本論文では、瞳孔応答モデルに与える入力信号として、

M系列を用いて輝度を変化させた学習データを作成した。M系列を発生させるシフトレジスタの周期は、番組の長さ等を考慮して、 $\Delta t = 10$ フレーム (1/3 秒)、段数を7段とした。M系列は2値系列であるから、実際のテレビ番組の輝度変化幅に合わせて2値を対応させ、輝度パターンを作成した。

輝度変化幅を $30 \sim 70 \text{ cd/m}^2$ とした場合のM系列を用いた疑似番組の輝度変化を図3に点線で示す。この疑似番組を、被験者に提示し、輝度変化に対応する瞳孔面積変化を測定した。その結果を図3に実線で示す。

(3) マルコフ系列を用いた学習データ

実際のテレビ番組の輝度変化過程を大局的に捉えた輝度変化を作成するために、実際のテレビ番組の輝度変化過程を単純マルコフ過程であるとし、状態遷移行列を生成した。

尚、画面輝度は 10 cd/m^2 単位で評価し、各輝度値を状態としたマルコフ過程を考えている。例として、CM番組をサンプルとした状態遷移行列を次式に示す。

このように、現在の状態から次回の状態へ遷移する状

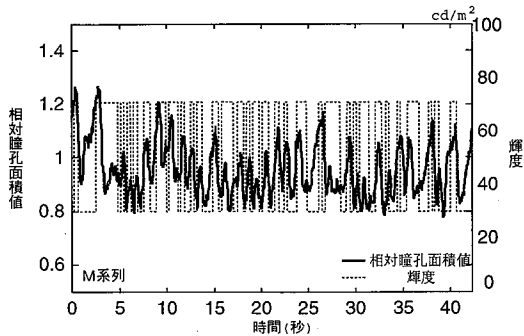


図3 M系列を用いた疑似番組と対応する瞳孔応答

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1.00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.65 & 0.20 & 0.13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.43 & 0.28 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.20 & 0.55 & 0.15 & 0.04 & 0.02 \\ 0 & 0.03 & 0.03 & 0.17 & 0.57 & 0.14 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.11 & 0.27 & 0.55 & 0 \\ 0 & 0 & 0.50 & 0 & 0 & 0.50 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

状態遷移確率行列 P が求まる。

式(1)で、行が現在の状態の輝度値を表している。一番上の行が 10 cd/m^2 で、以下 $20 \text{ cd/m}^2, 30 \text{ cd/m}^2, \dots$ となっている。したがって、輝度変化幅が大きい番組カテゴリは、行列の次数が大きくなる。列が次の状態の輝度値を表しており、同様に左端が 10 cd/m^2 で、順に $20 \text{ cd/m}^2, 30 \text{ cd/m}^2, \dots$ としている。

このように各カテゴリについて状態遷移行列を求め、初期値を与えてマルコフ系列による学習データを4種類制作した。

図4に、CM番組をサンプルとしたマルコフ系列を用いた学習データの輝度変化を点線で示す。この学習データを被験者に提示した時の対応する瞳孔応答を、図4の

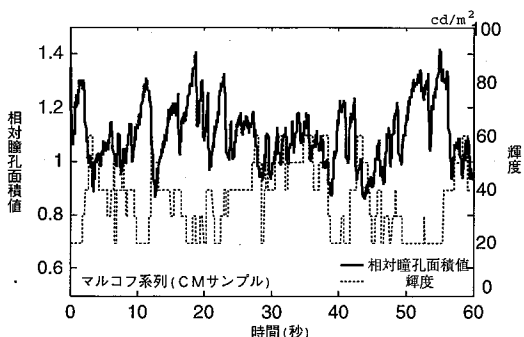


図4 マルコフ系列を用いた疑似番組と対応する瞳孔応答

実線で示す。

(4) モデルの学習方法

以上の2種類の系列による疑似番組を、既に報告した方法(中山ほか1991)で被験者に提示し、瞳孔面積を測定した。輝度と瞳孔面積値を入出力ペアとして、学習パターンを作成した。そして、輝度変化の学習データを図2に示すニューラルネットワークの入力信号とし、それに対する瞳孔面積値を出力信号として、ニューラルネットワークを学習させた。

ネットワークの学習は、既に報告したモデルと同様に、入力層には1フレーム毎の輝度の学習データを与え、現時点に対応する瞳孔面積相対値の実験値を出力層に教師信号として与えた。学習アルゴリズムとしては、一般的に用いられる誤差逆伝搬法に改良を加えた確率的誤差逆伝搬法を用いた(松葉ほか1991)。

学習データは、輝度が $30 \sim 70 \text{ cd/m}^2$ まで変化するM系列、CM番組をサンプルとしたマルコフ系列の2パターンとした。これは、様々な番組の組合せで学習した結果、周期的な輝度入力を最も良く再現できる学習データとして選んだ。

2.3. 輝度入力に対するモデル評価

前節で学習したネットワークの性能を調べた。まず、周期的な輝度変化に対する応答を調べた。このモデルに、既に報告した8パターンの周期的な輝度の学習データ(浅野ほか1994)を入力し、従来の周期的入力で学習したモデルと比較した。図5は、入力に周期が2秒の方形波を与えた結果である。図6は、周期が5.3秒の三角波を与えたものである。本モデルによる出力値は、位相、振幅の点で瞳孔応答をよく再現していると言える。

平均二乗誤差、相関係数で比較した結果、振幅や周期が一定でない輝度入力で学習した本モデルは、周期的な輝度入力に対しても、従来のモデル(浅野ほか1994)より正確に瞳孔応答を再現できることが分かった。

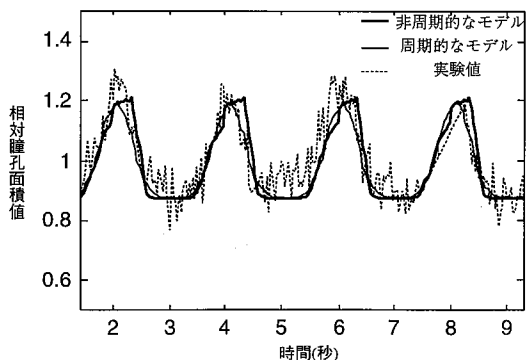


図5 モデルの時系列評価(方形波, $T=2.0 \text{ s}$)

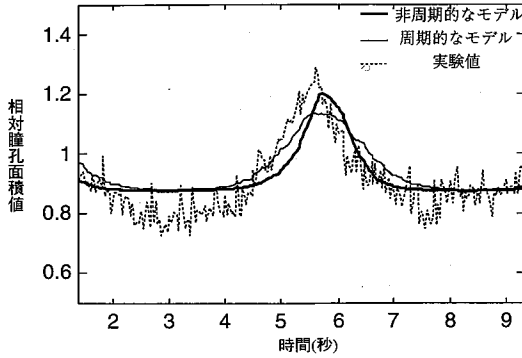


図6 モデルの時系列評価 (三角波, $T=5.3$ s)

2.4. モデルの内部表現

ニューラルネットワークの学習の結果, 中間層に現れる内部情報表現形式は重要である (中内ほか 1990).

既に報告したモデルについても, 入力層から中間層への重み空間, および中間層の内部表現形式を調べることによって, 生理学的機構との対応づけが可能であることを示した (浅野ほか 1994).

一般的な非周期的輝度変化によって学習されたモデルでは, 実際の機構により近い表現がされている可能性がある。そこで, 同様の観点で検討を行った。

(1) 入力層の重み空間

ネットワークは, 入力層に遅延素子を用いている。したがって, 入力層から中間層への結合重みを調べることによって, 入力空間の中でどの部分 (時間に相当) が実際に瞳孔応答に影響を与えているかを知ることができる。

図7に, 入力層から中間層の2つの隠れユニットへの二乗重みを実線と破線を示す。横軸にユニット番号, 縦軸に二乗重みを示した。ここで, 1つのユニットは輝度信号の1フレーム (1/30秒) と対応しているため, 時間軸も示した。

隠れユニット1, 2を合わせて考慮すると, 10番目の

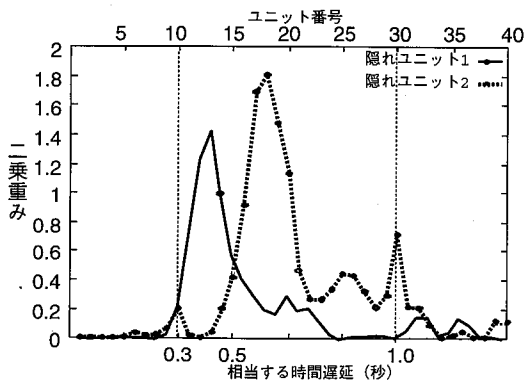


図7 入力層から中間層への重み空間

ユニットから30番目のユニットまで重みが大きくなっていることが分かる。これは, 時間にして0.3秒から1.0秒の遅れに相当する。すなわち, 現時点の瞳孔面積が, 0.3秒から1.0秒分の過去の輝度に対してよく応答していることを意味する。

生理学的知見によれば, 輝度変化に対する瞳孔応答は, 潜時が約0.2~0.5秒, また輝度変化に対して完全に瞳孔応答しきるまでに約0.94秒かかる (宇都宮 1978, 大塚 1966)。本結果は, これとよく対応している。

(2) 中間層の内部表現

次に入力層に, 周期的な輝度入力である方形波, 三角波を与えた時の中間層の各ユニットの時間変化と, 出力ユニット値の時間的変化の例を, 図8, 図9に示す。

図によれば, 出力ユニットの最大, 最小に対応して, 隠れユニットはそれぞれピークを持つ。既にこれらの結果を生理学的機構に対応づけて述べたが, 本論文の結果は, それと同様に, 隠れユニット1が瞳孔括約筋駆動ユニット, 隠れユニット2が瞳孔散大筋駆動ユニットに対応していることを示した。

つまり, 浅野ら (1994) による周期的な輝度の学習データに対してだけでなく, 一般的に変化する輝度の学習

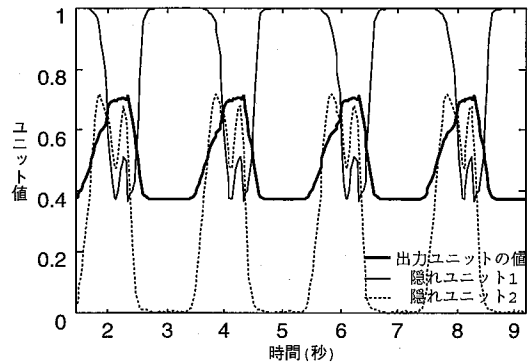


図8 中間層の内部表現 (入力: 方形波, $T=2$ s)

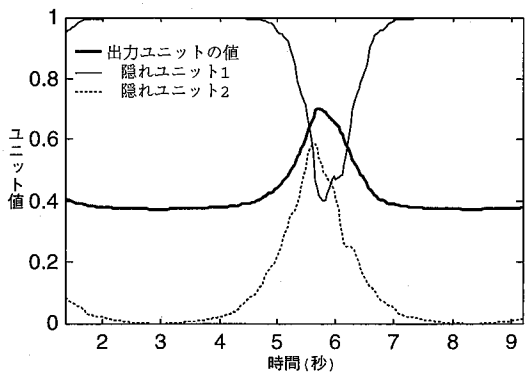


図9 中間層の内部表現 (入力: 三角波, $T=5.3$ s)

パターンに対しても同様の内部表現が得られた。これらのことは、輝度影響除去を目的とした本モデルの妥当性、有効性を示すだけでなく、生理学的な機構を推論するうえで有効であると考えられる。

3. 輝度の影響除去に関する評価

本節では、被験者に動画番組を提示し、瞳孔応答モデル(図1)を用いて輝度の影響を除去し、精神活動の抽出を試みた。補正の評価は、輝度を要因とした一元配置の分散分析によって行った。

3.1. 評価に用いた番組

評価用の番組として、意味なし番組1番組、実際のテレビ番組8番組の合計9番組用意した。

まず、モデルの輝度影響の除去を確認する目的で、精神活動に与える影響が小さい番組を作成した。これは、画像には意味を持たせない番組で、1秒毎にランダムに輝度に変化するような、灰色パターンである。

実際のテレビ番組として、テレビジョン放送で放映された番組、およびレーザーディスクなどで市販されている動画番組の中から8編を選んだ。表2に、番組のタイトルと概要を示す。被験者に提示する際には、実験時の被験者への負担を考慮して、これらの番組から3分間を切り出して提示した。番組は、教育番組を中心に選んだ。番組1～番組5は教育・教養番組である。番組6(大相撲中継)は、番組内で、興味の集中する場面が特定できる(取組場面)意味で選んだ。番組7、番組8は、輝度が高く、変化の大きいものとして選んだ。これらの番組を、10人の被験者に提示し、瞳孔応答を測定した。提示方法は、中山ら(1990)の方法とした。

3.2. 輝度の影響除去の方法

瞳孔応答モデルを用いて輝度の影響を取り除くための方法として、次の2つを検討した。これらの方法で補正を行い、比較した。

(1) 減算補正

本論文では、瞳孔面積に影響を与える要素として、精

神活動と輝度の2つを仮定している。また、両者は独立に瞳孔応答に影響を与えることが分かっている。すなわち、輝度に対する瞳孔応答と、精神活動に対する瞳孔応答は線形結合されている。今、瞳孔応答 $P(x, y)$ は次式で表せる。輝度に対する瞳孔応答を $B(x)$ 、精神活動に対する瞳孔応答を $S(y)$ とする。

$$P(x, y) = B(x) + S(y) \quad (2)$$

この式から、精神活動に対する瞳孔応答を得るためには、 $B(x)$ を減じればよい。輝度に対する瞳孔応答モデルの出力は、 $S(y) = 0$ としたときの瞳孔応答であるから、 $B(x)$ が得られると考えて、以下の式による補正を減算補正と定義する。

補正後の相対瞳孔面積

$$= \text{相対瞳孔面積値} - \text{モデルによる出力値} \quad (3)$$

(2) 除算補正

中山ら(1991)は、瞳孔応答モデルの出力値を平均化し、比によって補正を行っている。すなわち、補正後の瞳孔面積は次式で与えられる。これを除算補正と定義する。

補正後の相対瞳孔面積

$$= \frac{\text{相対瞳孔面積値}}{\text{モデルによる出力値}} \quad (4)$$

以上の2つの補正方法に基づき、周期的な輝度入力によって得られた瞳孔応答モデルと、本モデルによって、番組を見た際の瞳孔面積値から輝度の影響を除去し、評価した。補正後の値について、輝度を要因とする一元配置の分散分析を行うことによって、輝度の影響が除去できるか調べた。なお、番組は10人の被験者に提示した。

3.3. 評価時間間隔の決定

瞳孔面積は、輝度、精神活動の影響だけでなく、他のさまざまな影響を受けている。これには、測定時の誤差や、瞳孔雑音(pupillary noise)と呼ばれる瞳孔の不規則な動揺の影響などがある(宇都宮 1978)。

本論文では、こうした雑音の影響を除去するために、瞳孔面積実験値、および補正後の瞳孔面積値を適当な時

表 2 実験に用いた動画番組

[番組1]	セサミストリート(NHK教育放送)	子供向け英語教育番組
[番組2]	くらべてみれば(NHK総合放送)	一般向け教育科学番組
[番組3]	きょうの料理(NHK総合放送)	料理番組
[番組4]	マジック教室(NHK教育放送)	手品を教える番組(趣味講座)
[番組5]	とっさの一言~英会話(NHK教育放送)	英語の語学番組
[番組6]	大相撲中継(NHK総合放送)	大相撲の取組場面
[番組7]	チューンアップAV(レーザーディスク)	風景画
[番組8]	CM番組(民放から任意に選んだ)	CM番組

間隔で平均化して評価を行った。この評価時間間隔を Δt とする。

Δt を大きくすると、雑音の影響を取り除けるが、時系列評価が難しくなる。また、 Δt を小さくすると、瞳孔面積値を時系列で評価することが可能となるが、雑音の影響を受けてしまう。

このように、瞳孔面積の評価について、評価時間間隔 Δt は重要な意味を持つ。

そこで、評価時間間隔 Δt を変化させ、輝度影響の除去を行い、最適な評価時間間隔 Δt を決定した。評価時間間隔は、10フレーム、5フレーム、3フレーム、1フレームと変化させ、減算補正を用いて補正を行い、動画8番組について評価した。この結果のうち、番組1、番組7を評価した結果を図10に示す。

図では、横軸に評価時間間隔（単位：フレーム）、縦軸に分散分析における輝度の要因の F 値を示している。図中の破線は、その番組における輝度要因の有意水準5%を示している。この破線よりも F 値が大きい条件では、輝度の補正ができないことを意味する。

実線で示した番組1では、 F 値は Δt に関係なく有意水準5%ラインを下まわり、輝度の影響が除去できたことを示している。しかし、破線で示した番組7では、 Δt が約9フレーム以下で、5%の有意水準を超えた。

同様な分析評価を表2に示す全ての番組について行った。その結果、評価時間間隔が10フレームであれば、全ての番組について輝度の要因が有意でなくなることが分かった。例えば、評価時間間隔を5フレーム以下にすると、番組3、4、7、8で補正不能になった。この原因を

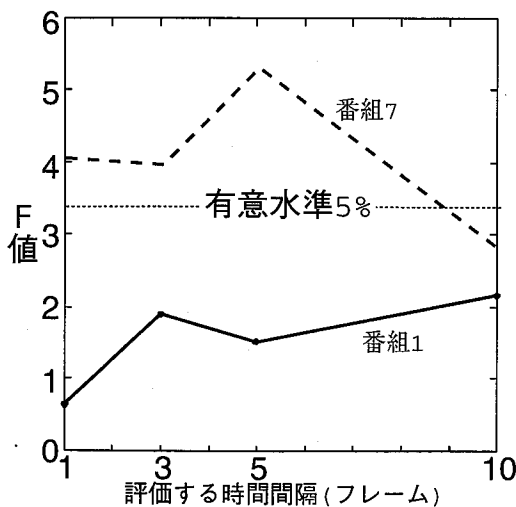


図10 評価時間間隔を変化させた輝度影響の除去の評価

考察すると、これらの番組では、場面が移り変わることが多く、またこれに伴って視点の変化も大きい。そのため、 Δt が小さいと評価できないと考えられる。

以上の結果から、本論文では、評価時間間隔を10フレーム（1/3秒）に設定した。

輝度が時々刻々と変化していく動画番組においては、1フレーム毎に補正ができることが理想的である。本モデルにおいても、番組1、2、5、6については1フレーム毎の補正が可能である。様々な番組をリアルタイムに補正可能にするためには、瞳孔応答モデルの改良が必要と考えられる。

3.4. 意味なし番組における輝度の影響除去

意味なし番組を被験者に提示し、測定した瞳孔面積値を、モデルによる出力値で補正した。補正方法は除算補正とした。図11に、各輝度領域毎に規格化した瞳孔面積値を示す。X軸に輝度、Y軸に規格化した瞳孔面積値を示す。

図によれば、補正前の実験値では輝度が低い領域では瞳孔が大きく、輝度が高い領域では瞳孔が小さくなっているのがわかる。ニューラルネットワークモデルによる補正後の値では、輝度に関係なくほぼ一定の大きさになっており、輝度の影響が除去できたことを示している。周期的なモデルと、本モデルの差異はほとんどみられない。両モデルとも輝度の影響を除去することが可能である。また、線形モデルでは、輝度が高い領域で補正後の値が大きくなる傾向があることが分かる。

輝度を要因とする分散分析の結果を表3に示す。補正前の F 値では、輝度の要因が1%水準で有意である。モデルによって補正した後の F 値は、線形モデル、周期的なモデル、本モデルともに輝度の要因が有意でなくなり、影響を除去できた。 F 値で比較すると、ニューラルネットワークモデルの方が小さくなっており、輝度の影響を除去する能力が高いと考えられる。

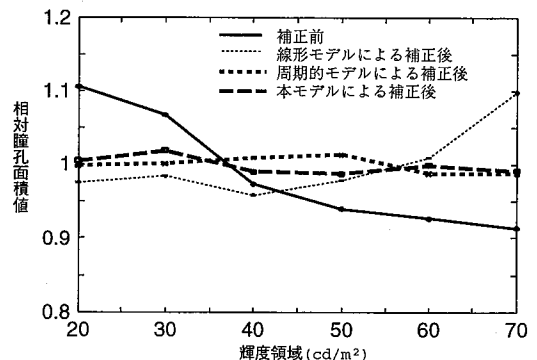


図11 意味なし番組の補正結果

表 3 意味なし番組の補正：分散分析結果

		補正前	瞳孔応答モデルによる補正後			
			線形モデル	周期的モデル	本モデル	
意味なし番組	分散	0.65	0.14	0.01	0.02	** 1%水準で有意差あり
	F値	8.47**	1.06	0.08	0.14	

3.5. 動画番組における輝度の影響除去

動画 8 番組に対して同様に輝度影響の除去を行った。モデルは、周期的なパターンで学習したモデルと、本モデルを用いた。また、減算補正、除算補正の 2 つの補正方法によって補正を行い、比較をした。

補正後の値について、輝度を要因とする一元配置の分散分析を行うことによって、輝度の影響が除去できるかどうかを調べた。表 4 に減算補正による分散分析の結果、表 5 に除算補正による分散分析の結果を示す。

これらの表は、補正前の相対瞳孔面積値と、それぞれのモデルによって補正を行った後の相対瞳孔面積値について、それぞれ分散と F 値を示したものである。

(1) 分析結果

補正前の値では、全ての番組について、分散、F 値共に大きく、輝度の要因が有意になることが分かる。つま

り、輝度変化によって瞳孔面積が変化している。

減算補正の結果について考察する。周期的なパターンにより学習した瞳孔応答モデルによって補正した結果を表の中列に示す。番組 1, 3, 4, 5 については輝度の要因が有意でなくなり、輝度の影響を除去できた。一方、番組 2, 6, 7, 8 については輝度の要因が 5%水準で有意であった。

本モデルによって補正した結果を表の右列に示す。全ての番組について輝度の要因が有意でなくなり、輝度の影響が除去できたことを示している。

既に述べたように、補正後の値は、輝度の要因が有意でなければ、精神活動に対する瞳孔応答を表しているといえる。したがって、瞳孔応答モデルによって精神活動を抽出することができたといえる。

一方、除算補正を行った結果(表 5)では、本モデル

表 4 輝度影響の除去の評価(減算補正)

番組		補正前	瞳孔応答モデルによる補正後	
			周期的モデル	本モデル
[番組 1]	分散	0.15	0.007	0.006
	F値	46.88**	2.44	2.17
[番組 2]	分散	0.14	0.006	0.005
	F値	89.16**	4.64*	3.80
[番組 3]	分散	0.20	0.001	0.002
	F値	100.02**	0.42	1.20
[番組 4]	分散	0.35	0.078	0.046
	F値	15.24**	2.74	1.87
[番組 5]	分散	0.05	0.013	0.017
	F値	5.68*	1.50	2.02
[番組 6]	分散	0.08	0.054	0.006
	F値	6.90**	4.58*	0.45
[番組 7]	分散	0.14	0.080	0.058
	F値	7.19**	4.41*	2.74
[番組 8]	分散	0.15	0.075	0.055
	F値	6.39**	3.29*	2.02

** 1%水準で有意差あり, * 5%水準で有意差あり

表 5 輝度影響の除去の評価(除算補正)

番組		補正前	瞳孔応答モデルによる補正後	
			周期的モデル	本モデル
[番組 1]	分散	0.15	0.008	0.007
	F値	46.88**	3.10	2.85
[番組 2]	分散	0.14	0.010	0.005
	F値	89.16**	7.33**	4.31*
[番組 3]	分散	0.20	0.002	0.002
	F値	100.02**	1.05	1.29
[番組 4]	分散	0.35	0.089	0.147
	F値	15.24**	3.02*	5.12**
[番組 5]	分散	0.05	0.011	0.016
	F値	5.68*	1.18	1.71
[番組 6]	分散	0.08	0.051	0.007
	F値	6.90**	4.42*	0.57
[番組 7]	分散	0.14	0.053	0.046
	F値	7.19**	2.95	2.23
[番組 8]	分散	0.15	0.071	0.059
	F値	6.39**	3.24*	2.25

** 1%水準で有意差あり, * 5%水準で有意差あり

においても番組2, 4について補正不能となった。

(2) 減算補正と除算補正の比較

本モデルを用いることにより、減算補正では、全ての番組が補正可能となった。しかし、除算補正では2つの番組が補正不能となった。これは、輝度に対する瞳孔応答モデルの値で除算することにより、補正後の値において、輝度に対する瞳孔応答の項が残ったことが原因であると思われる。

したがって、補正方法としては減算補正が適当であるといえる。

(3) 周期的なモデルと本モデルの比較

本モデルでは、減算補正において全ての番組を補正可能である。除算補正においても、本モデルの方が補正可能な番組数が多い。したがって、周期的な学習パターンにより学習したモデルとの比較では、本モデルの方が輝度影響除去の効果が高いといえる。

4. 精神活動の時系列抽出

前節で、非周期的なパターンで学習を行った瞳孔応答モデルにより、輝度の影響を除去できることを示した。したがって、補正後の値は、精神活動に対する瞳孔応答を表している。

本節では、補正後の値を、時系列的に見ることにより、被験者の精神活動を評価した。例として、番組3（「きょうの料理」）と、番組6（「大相撲中継」）を見た際の瞳孔面積値と、補正後の値を図12、図13に示す。図中、太い破線は画面輝度を、点線は瞳孔応答を、実線は補正後の瞳孔面積値である。また、一定時間間隔毎に瞳孔が急激に小さくなっている部分があるが、これは瞬目（まばたき）部分である。

各番組の内容を説明すると、「大相撲中継」は、取組前から取組場面である20～60秒の部分で、また「きょうの料理」は、料理が出来上がる少し前から解説までを含めた40～100秒の部分である。

瞳孔面積値と輝度の両グラフを対応させながら、被験者の精神活動を考察すると、次のようになる。

〔番組3〕（きょうの料理）

番組の内容は、前半で料理の作る過程、また盛り付け、その解説などを行っている。また、後半では、料理の解説が終わった後、出演者2人が料理についての談話をしており、単調な場面である。

番組の輝度変化としては、前半では比較的輝度が高く、後半で低くなっている。輝度変化は全体としては少なく、単調である。

瞳孔面積値は、番組の前半では輝度が高いため、小さ

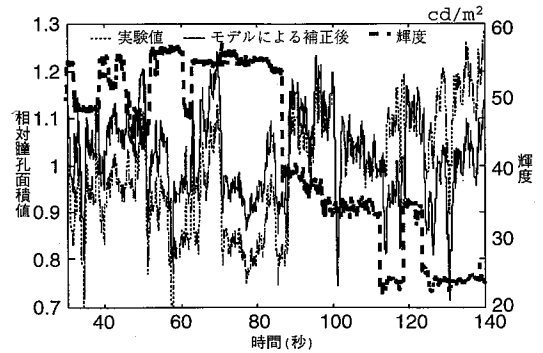


図12 「きょうの料理」の時系列評価

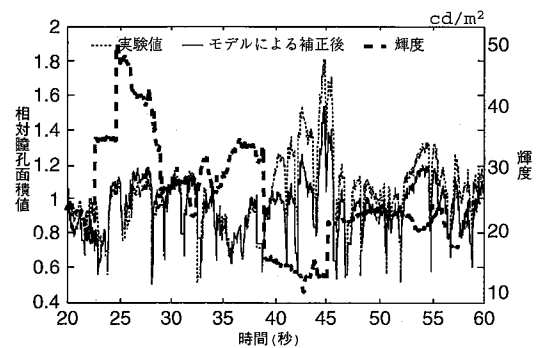


図13 「大相撲中継」の時系列評価

くなっているが、補正後の値では、補正前の値よりも大きくなっており、被験者精神活動が大きいことを示している。番組の後半では、輝度が低いため、補正前の実験値は大きくなっている。補正後の値は補正前の値よりも小さくなる。これは、被験者の精神活動が小さいことを示している。

本番組を見終わった後の感想を数人の被験者に聞いたところ、料理が出来上がる部分に興味を示したということが分かった。このため、この番組では興味は瞳孔面積変化を起こしていると推察される。

〔番組6〕（大相撲中継）

番組の内容は、前半は取組前の場面である、40秒過ぎあたりで、取組が始まる。後半は取組が続いている。

番組の輝度変化は、前半では、輝度が比較的高くなり、また輝度変化が大きい。後半では、輝度が低くなり、輝度変化があまりなくなっていることが分かる。

瞳孔面積値は、番組の前半では、輝度が比較的高いにもかかわらず、ほぼ一定の値である。補正後の値は、補正前の値よりわずかに大きくなっている。これは、被験者の精神活動が、取組前の場面で大きくなっていることを示している。番組の後半、40秒を過ぎて取組が始まる

と、瞳孔が急激に大きくなっている。補正後の値でも、大きくなっている。これは、被験者の精神活動が大きいことを示している。その後、瞳孔は小さくなるが、補正後の値ではさらに小さくなる。これは、取組が続くが、一時膠着状態になっている部分で、被験者の精神活動が小さいことを示している。

以上、本モデルによって補正した時系列的な瞳孔応答は、番組内容に対応していることを示した。

尚、以上の結果は、10人の被験者で大きな違いが見られなかった。これは、全員が男子大学生という類似な被験者を用いたためと考えられる。

5. ま と め

本論文では、生体情報のひとつである瞳孔応答を用いて、精神活動の抽出を行うことを目的として研究を行った。そのアプローチとして、輝度と精神活動の2入力を持つ瞳孔応答システムを考え、輝度に対する瞳孔応答モデルを構築した。

本論文で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) M系列、マルコフ系列による疑似番組によってニューラルネットワークを学習させ、瞳孔応答モデルを構築した。このモデルは周期的な輝度入力パターンに対しても瞳孔応答を表現できることを示した。
- (2) ニューラルネットワークモデルの内部表現について考察を行った。その結果、入力層から中間層への重み空間が瞳孔応答の遅れに対応していること、および中間層のユニットの動きが瞳孔駆動筋の動きに対応していることを示した。この結果は、周期的なパターンで学習したモデルと一致している。
- (3) 実際の動画番組を被験者に提示し、瞳孔面積を測定した。瞳孔面積実験値をモデルによる出力値によって補正を行うことにより、輝度による影響を除去できることを示した。
- (4) 瞳孔応答モデルによって補正を行うことにより、精神活動を抽出でき、番組内容に対応した時系列瞳孔応答が得られることを示した。

本論文において、生体情報である瞳孔応答からの精神活動の抽出法を確立したことは、今後、客観的な教育評価法や、番組評価法を考察していく上で、大いに意義のあることであると思われる。

本研究を進めるにあたり、貴重なご意見とご討論をいただいた NTT 基礎研究所情報科学研究部 入野俊夫博士に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 浅野樹美, 中山 実, 清水康敬(1992) ニューラルネットワークを用いた輝度に対する瞳孔応答モデル. 電子情報通信学会技術報告, **ET94-44**: 109-116
- 浅野樹美, 中山 実, 清水康敬(1994) 輝度に対する瞳孔面積変化モデル. 電子情報通信学会論文誌, **J77-A**: 794-801
- 星宮 望(1990) 生体工学, 昭晃堂, 東京
- 松葉育雄, 増井祐也(1991) ニューロコンピューティングの基礎と実践, Computer Today (7月号, 9月号)
- 森下 巖, 小畑秀文(1982) 信号処理, 計測自動制御学会, 東京
- 中内茂樹, 白井支朗, 三宅 誠(1990) 3層ニューラルネットにおける色学習とその内部表現解析. 電子情報通信学会論文誌, **J73-D-II**: 1242-1248
- 中山 実, 安池一貴, 清水康敬(1990) 提示画面の輝度変化と画像内容による瞳孔面積変化. テレビジョン学会誌, **44**: 283-293
- 中山 実, 安池一貴, 清水康敬(1991) 瞳孔面積変化からの輝度による変化の分離と提示パターンの評価. 日本教育工学雑誌, **15**: 15-23
- 宇都宮敏男(1978) 生体の制御情報システム, 朝倉書店, 東京
- 大塚良作(1966) 眼の生理学. 荻原 朗(編), 医学書院, 東京

Summary

If the effects of variations in brightness can be controlled, it is possible to use changes in eye pupil size in the evaluation of educational TV programs. This paper describes an improved, neural-network-based method for studying pupil reactions and the feasibility of evaluating TV programs by investigating changes in pupil size.

This neural-network-pupil reaction model uses M-sequences and Markov-sequences to register changes in pupil size based upon responses to changes in brightness and is shown to be more effective in removing the effects of brightness upon pupil size than have other previously reported methods.

The authors also discuss methods for removing the influence of brightness from pupil responses as well as methods for evaluating changes in pupil size. It is also shown that this new method permits the objective evaluation of TV programs through measurement of eye pupil changes during viewing.

Key Words: PUPIL REACTION, TV PROGRAMS, PSYCHOLOGICAL ACTIVITY, NEURAL NETWORK, INTERNAL REPRESENTATION

(Received June 3, 1994)