

# 視野の動きを検出して外界のモデルを構築する脳幹の仕組み

唐澤 信司

宮城高専・名誉教授 〒981-1233 宮城県名取市小山 1-3-6

E-mail: shinji-karasawa@kbh.biglobe.ne.jp

**あらまし** 視覚神経系の構造を参考に視野の認識を無意識で統括する仕組みを論議する。脳の神経回路は脳幹で交叉している。交叉領域にある中間介在ニューロンの出力は同時に到達するインパルス群を表象できる。この中間介在ニューロンがパターン認識の支援をする。神経細胞により選択された活動が脳の神経回路網を転送されて外界に対応できる。経験で付け加えられる画像の理解はリンクしてオーバーラップして多重に活性化される。そこで、脳幹において多重に活性化された認識要素群を必要に応じて調整する。視覚は網膜に映された映像にリンクして活性化され脳幹で統制された神経回路網群の活性化であり、実世界の脳内モデルの構築であるという説明を提案する。

**キーワード** 視覚, 網膜, 視交叉, 脳幹, 中脳, 無意識の知能, 長期増強, 大脳.

## The mechanism of brainstem that constructs a model on external world through detection of movement on visual field

Shinji KARASAWA

Miyagi National College of Technology (Professor emeritus). 1-3-6, Oyama, Natori-shi, Miyagi-ken, 981-1233 Japan

E-mail: shinji-karasawa@kbh.biglobe.ne.jp

**Abstract** The mechanism that manipulates unconscious recognition of a view field is presented by referring to structure of vision. Nerve circuits in the brain crossing at brain stem. The output of intermediate neuron can be a representative of the impulsive signals those arrive concurrently at the neighboring region. A neuron can be available for the pattern recognition. A neuron is available to control the data flow in the brain. The neural network can respond to the outside world. Since understanding of image will be added through experiences, the overlapped multiple neural circuits will be activated. The overlapping of activations is adjusted at the brainstem as needed. The mechanism of vision corresponds to the construction of model on the real world in the brain.

**Keyword** Vision, Retina, Optic chiasm, Brainstem, Midbrain, Unconscious intelligence, Long-term potentiation, Cerebrum.

### 1. はじめに

コンピュータによる情報処理の技術が発展したが、人間のような視覚の機能を持つ装置の開発が望まれている。他方、動物は目に映る映像から外部世界をリアルタイムで認識するメカニズムを持っているので、工学研究も脳の科学[1],[2]に関心を持っている。

著者は2007年にインパルスの転送によって画像要素を操作して情報を処理する視覚について報告した[3]。その後、2009年に網膜の神経細胞網の構造と神経伝達物質の知見[4][5]を基に視覚の仕組みを報告した[6]。それは拮抗する生化学反応を非常に巧妙に組み合わせた仕組みであった。その際に、中間介在ニューロンは視覚のデータ処理の単位を処理すると報告した。

無意識的な神経細胞の活動は同時に複数の活動が処理される。神経細胞のデータ処理のような無意識の仕組みを解明するには考え方の変換を必要とする。すな

わち、神経細胞の活動は連続していないし、線形でもない。神経細胞は同時に活動する神経細胞の軸索と接続し、その影響の積分値により稼動して、1つのインパルスを接続領域に出力する。そして前の状態に復帰するための不応期がある。直後に活動が更新されるので生体はフィードバック回路を必要としない[7]。

神経細胞は置かれている状況を表象して、外界の変化に対応し、反応した経験をルールにしている。その後、形成されたルールを外挿(extrapolate)する。錯覚はそのルールの活動が視覚に関与する証拠である。実世界の脳内モデルをリアルタイム進行で更新する視覚は多くの無意識の活動によって支えられている。

本報告では、ハードウェア的な無意識の知能による視覚の仕組みについて検討を試み、「網膜に映された映像によりリンクする多重の神経回路群の統制された活性化が視覚である。」という説明を提案する。

これは J.J. Gibson の[The ecological approach to visual perception -アフォーダンスの理論-] [8]の拡張になる。

## 2. 視覚を担う神経回路網の形成

### 2.1 神経回路の交叉による中枢神経系の形成

最初の神経系は神経細胞が体全体の表皮に網目状に連結した散在神経系であった。自ら移動する機能が進化した身体では前部にセンサー、後部にアクチュエータを分布するように変化した。その身体をよじると神経回路群は交叉する場所に集められる。

神経回路群が交叉することにより、脳神経系を形成することを可能にしたと考えられる。情報を処理する機能が交叉する領域で付加されても地理的対応は保持できる。図 1 に交叉して形成される集中神経系の仕組みのモデルを示す。

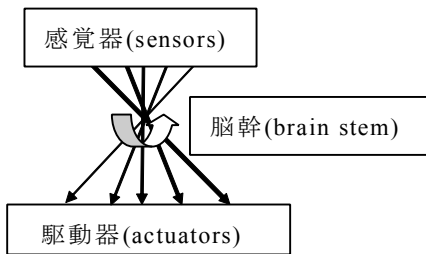


図 1. 神経回路が交叉して形成された集中神経系  
Fig.1. The concentrated nervous system that was formed by crossing of nerve circuit

#### — 神経回路が交叉して形成された集中神経系 —

生命体はその時々状況に適した一つの動作を選択しなければならない。神経回路が集中する領域においては、同時に活動する活動群を一つの神経細胞によって一つの活動単位に接続できる。

複数の神経回路が同時に狭い領域に出力される場合には、出力に側抑制の機能を伴わせれば勝者全部取り(winner take all)の論理で、複数の出力を一つにすることができる[9]。

ここで、間欠的であっても接続している関係により入力と出力の地理的対応は保持される。

### 2.2 事物の配置を認識する神経回路網の形成

散在神経系では光受容器が体の表面に分布して外界が体の表面に写されることで、散在神経系に取り込まれる。外界の像が表面の散在神経系の神経細胞に映されるので、外界と神経回路網とは対応がある。

進化の過程を通して眼が形成された。それを神経網で考えると、体の表面全体に分布していた光受容器を身体の前部に集めたと解釈できる。そして眼に光受容器が集められても神経回路網が接続されておれば光

のイメージでアクチュエータを制御することができる。魚は水中で随意に泳ぐ。それができるのは両眼に映される2つの映像で外界の事物認識している。

その際に自分の体を基準にして。体側を基準にして魚は左右の眼が体側にあり、かなりの部分は別の外界を映している。その魚の視神経回路が全交叉している。そこで左右の眼の映像に共通する部分が少しでもあれば、全交叉する領域において中間介在細胞によって、左右の視野の映像を統合する情報処理ができる。

眼が体に固定されている動物では光が入射する方向と網膜に映る映像の方位が対応するように視覚の神経回路網が形成される。

### 2.3 脳幹における無意識の視覚と大脳新皮質における意識した視覚

ヒトは眼に見える世界が実在の世界そのものと信じている。しかし、脳における映像のデータは間欠的である。神経伝達物質がインパルス的に発生し、情報は断続的に転送されている。

自分の眼や顔や体を動かすと網膜に映る像が動くが、それは身体が動いたのだと判断するには身体の動作の情報が必要である。眼を閉じてみれば手足の空間位置の認識が意識できる。空間位置の認識は視覚によってだけではない。

全ての思考活動は意識されているが、脳神経系の活動の全ては意識された活動とは限らない。人間の視覚においては無意識的な活動がある。大脳新皮質の活動で脳幹の活動を指示できるが、脳幹は身体全体を統制する情報処理のセンターとなっている。脳幹は大脳の活動を制御し、大脳により制御されることもある。

動物は外界の状況のデータを感覚器で把握している。それを認識する際に外界と脳とは間欠的に接続している。外界と生体との地理的対応は神経回路網が担っている。外界と神経回路網には断続的に接続関係があることを図 2 に示す。

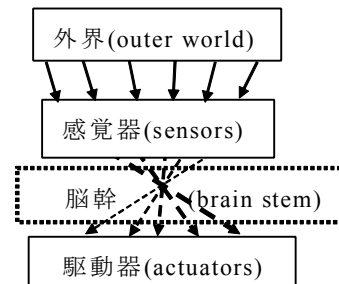


図 2. 外界と神経回路網の地理的対応  
Fig.2. The topographical organization between outer world and the nerve network

## 2.4 中間介在型の神経細胞による知能

カエルは大脳の新皮質領域が未発達である。しかし、カエルは両眼で立体視をして昆虫を捕食する。この事実は、大脳新皮質がなくても実世界の事物の空間配置が認識できることを示している。

脳幹には視床および中脳などの視覚に関わる構造があり、そこで姿勢制御と視覚情報の制御を行っている。この領域で実世界が動的に認識されている。

### 一視覚における無意識の知能の存在一

外界からの刺激は経験で記憶したルールで認識される。認識は経験で得たルールの適用である。視野の映像のデータは経験で獲得された選択回路によって特定の領域の活動を引き起こす。その視覚のプロセスには無意識の知能が介在する。

視覚の活動の多くは条件反射的に処理されるがその機能は経験により獲得される。それらの条件反射的な活動は中継機能と考えることができる。無意識的な活動でもその反応が経験で形成されておれば知能の機能とみなすことができる。

他方、大脳新皮質は記憶の器官であり、哺乳類になって発達した。大脳新皮質は最も新しく脳の組織に追加されて知能活動に介在する組織である。

## 3. 網膜の神経細胞による視覚の情報処理

### 3.1 ON 領域と OFF 領域における光応答

網膜は光を照射すると ON 領域と OFF 領域という拮抗する反応する領域が図 3 に示す市松模様で配置されている。OFF 中心の受容野では光を点灯すると過分極し、光を消すと脱分極する。他方 ON 中心の受容野では光を点灯すると脱分極し、光を消すと過分極する。

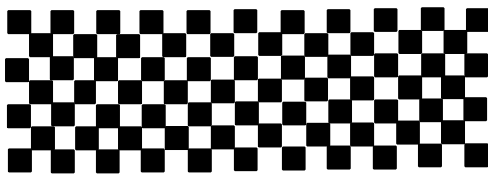


図 3. 市松模様で配置されている網膜の ON 領域と OFF 領域 Fig.3. ON-areas and OFF-areas in retina are located in a checkerboard pattern.

### 一拮抗する反応が市松模様で分布する理由一

隣接している領域が反対の反応をするのは需要と供給が必要である生化学反応の性質に由来する。つまり、反対の反応を市松模様ですると、状態の復帰が容易になり、迅速な応答ができる。また拮抗する反応の組み合わせを調整することにより迅速に最適な状態を維持することができる。

## 3.2 外網状層の水平細胞の役割

図 4 に示すように、網膜には水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞および、神経節細胞などの中間介在細胞が存在する。

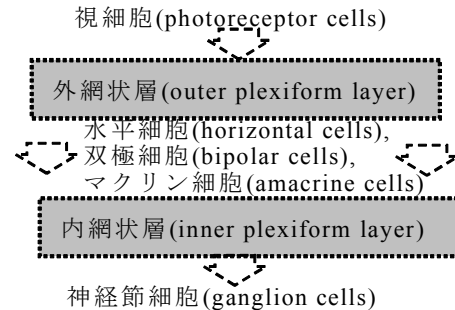


図 4. 網膜に存在する介在ニューロン

Fig.4. Inter neurons in a retina

外網状層では水平細胞が多くの視細胞と接続している。水平細胞は中間介在細胞であり、接続した視細胞の影響の積分値が接続領域に一斉に及ぼす。水平細胞は、同じ符号保存性の受容体を持つので、接続した入力群の反応を正帰還で増強する。

### 一水平細胞の役割一

ON 領域の視細胞に接続する水平細胞は OFF 領域の視細胞には接続せず、ON 領域の視細胞だけに接続し、OFF 領域の視細胞に接続する水平細胞は OFF 領域の視細胞だけに接続し、ON 領域の視細胞には接続せずしない。そこで、水平細胞は市松模様で配置されている拮抗する反応を別々に正帰還で増強する。

### 3.3 ON 双極細胞の符号反転性反応の仕組み

双極細胞には脱分極型(D)と過分極型(H)の双極細胞がある。光を点灯した時(ONの時)、D細胞は脱分極し、H細胞は光をONした時に過分極する。

視細胞は光を点灯すると過分極し、光を消すと脱分極する。OFF 中心の受容野の双極細胞は光を点灯すると過分極し、光を消すと脱分極する。この OFF 領域の H 双極細胞は符号保存型細胞である。この領域の水平細胞は視細胞の反応を正帰還的にキックバックする。

他方、ON 中心領域の双極細胞は、光量が多いときに脱分極する D 型双極細胞であり、符号反転型の伝達をする。この D 型双極細胞は APB 代謝型グルタミン酸受容体で反応し、ABP の間接的な代謝の過程により視細胞が神経伝達物質を放出するのを麻痺(妨害)して ON 双極細胞が脱分極する[10]。この ON 領域の脱分極は周囲の OFF 領域の過分極が次のような仕組みで関与している。

ON 領域の D 型双極細胞は水平細胞が囲んでいる構

造を持つ。この構造は視細胞の神経伝達物質の放出を妨害し、D型双極細胞の反応により水平細胞が脱分極できる構造である。D型双極細胞の活動はそれを囲む構造である水平細胞により正帰還的に増強される。

### 3.4 アマクリン細胞による動映像認識単位の抽出

外網状層の映像のデータはON双極細胞とOFF双極細胞によって内網状層に伝えられる。内網状層ではアマクリン細胞がON双極細胞とOFF双極細胞に接続している。ここで、ON-双極細胞の脱分極による映像はOFF領域の過分極による映像の結果が関与しているので、内網層にはOFF領域の過分極の映像が先に到達し、ON領域の脱分極による映像が遅れて到達する。

そこで、先に採取された映像によるON領域の脱分極がアマクリン細胞に到達した時には、後で採取した映像によるOFF領域の過分極が到達する。この時に点灯して直後に消灯したとすれば、アマクリン細胞には同時に両方の脱分極の反応が加えられる。同じパターンで消灯するとアマクリン細胞は直後のOFF双極細胞群と直前のON双極細胞群に接続し、点灯から消灯に変化したパターンのデータだけを強調するフィルターになる。アマクリン細胞にはいろいろなタイプがあると報告されている[11].

図5.に著者が提案する動画像を抽出する網膜の仕組みを示す。内網状層では双極細胞やアマクリン細胞の中間介在細胞の出力が別々の神経節細胞に伝えられる。その神経節細胞から脳へ出力される。

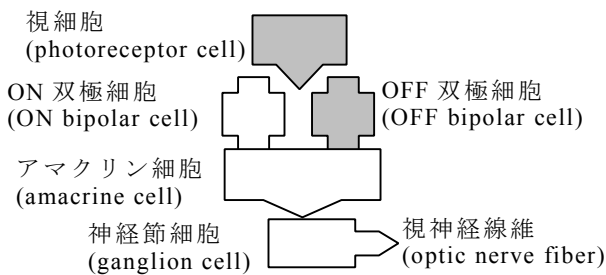


図5. ON領域の脱分極がOFF領域の過分極の後になることによる動画像を抽出する機構  
Fig.5. Extraction of moving-image is caused by depolarization of ON region after hyperpolarization of OFF region.

## 4. タイミング制御のための神経回路

### 4.1 時間変化を記憶する方法

知能は同時の多入力を一つの出力に変換する神経細胞の回路網に記憶される。記憶に関わる器官として大脳皮質の一部である海馬があって、海馬にはLTP(長期増強;long-term potentiation)という現象がある[12].

著者が提案する海馬の神経回路において活動の時間変化を認識する仕組みを図6.に示す。海馬にある顆粒

細胞の神経線維の伝達時間はシリアル・パラレル変換ができる。なお、伝達測度は膜のイオンチャネルの密度に依存する。

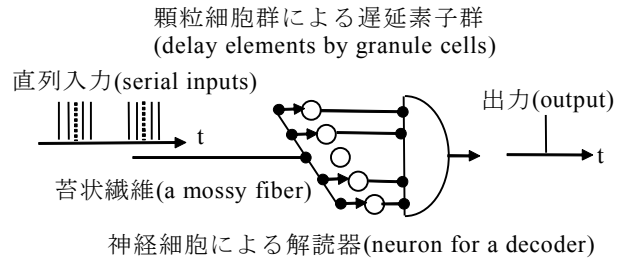


図6. 海馬が関与した活動の時間変化を認識する仕組み  
Fig.6. The mechanism of hippocampus that makes possible to recognize time variation of activities

LTPは入力にテタヌス刺激(10~100Hzの1秒間の刺激を5秒間隔で繰り返す)を加えると神経細胞の興奮性シナプス電位の振幅増加が何日~何週間もみられる現象である。

### 4.2 習慣的な活動のデータを出力する小脳の回路

小脳の機能の主役であるプルキンエ細胞は興奮性のインパルスが来ないときだけ抑圧性のインパルスを発生して興奮性のインパルスの発生を抑制することにより、時系列の信号を出力する[13]. なお、プルキンエ細胞への書き込みは登上繊維と平行繊維の同時入力によって実現し、平行繊維は顆粒細胞の軸索であり、その顆粒細胞群は苔状繊維から入力を受けている。

小脳の神経回路の機能を示すモデルを図7に示す。

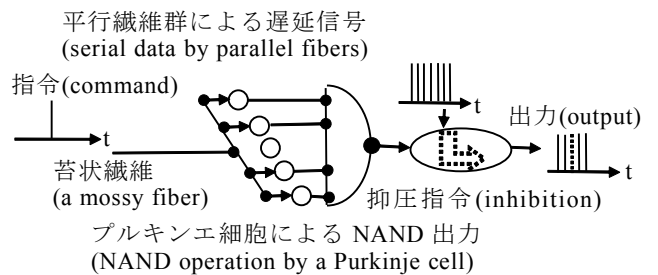


図7. 習慣的な活動のデータを出力する小脳の回路  
Fig.7. Model on the cerebellum that outputs the data of a habitual activity.

### 4.3 複数の活動が同時に存在する状態の制御方法

身体の行動は統一されている。その調整は主に脳幹で行っている。脳幹には神経回路が網目状にあって、神経細胞の集団が散在している。神経細胞の集団である神経核において、複数の活動を同時に制御する。ここでは制御の活動を行うべき状況を検出して、必要な活動を引き起こし、不必要な活動を抑圧する。

図7に感覚器、大脳およびアクチュエータと相互に通

信する脳幹の神経回路を示す。なお、大脳基底核には尾状核およびレンズ核があり、興味深い構造を持っているが、運動に関係した神経核である。人工的な視覚装置には直接には関係がない。

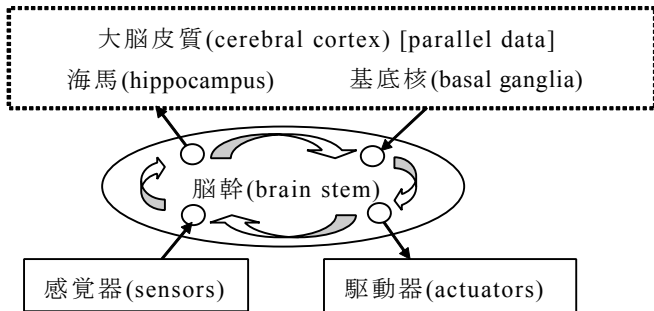


図 8. 感覚器、大脳およびアクチュエータと相互にコミュニケーションする脳幹の神経回路 Fig.8. The nerve circuit on the brain stem that communicates with sensors, cerebrum and actuators

脳幹には視床、視床下部、中脳、橋、延髄などの領域に分けられる。ここで、視床は感覚器および大脳皮質からの活動を受容し、適切に活動が展開されるように中継する。

中脳は眼球運動の条件反射や視覚に対する条件反射を制御している。魚類や両生類では視神経の大部分は中脳で終わり、中脳がこれらの動物の視覚処理中枢となっている。一過性で外界を認識する仕組みの一つが脳幹の領域にある。

#### 4.4 視覚における注意の焦点

視覚の進化では、視野の視覚に視点の視覚が新たに加えられたので、両視覚がオーバーラップして共に存在している。新しい視点の視覚は建て増しされた大脳の新皮質の意識的な活動に関係している。

ヒトの網膜では中心部の黄斑部には錐体という光受容体だけ存在し、視野の領域の光受容体には杆状体が存在し、その光受容体は周辺部になるほどその密度は低くなる。ヒトは網膜の黄斑部に映る映像を、視床に送り、視床では注意の焦点 (focused attention)」という意識的な活動のもとで中継し、新皮質で情報を処理して記憶する。その記憶した情報と黄斑部に映る映像を照合して認識する。

M. C. Escherが描いた「上昇と下降」というだまし絵において、階段の上りに注目すれば無限に階段を上り続けるが、画像全体を建造物として見れば無限に上り続けることは思い浮かばない。これは、2通りの視覚が存在することを示唆している。

早く回転する物体の映像は一様に流れた像で認識さ

れる[14]。その映像のデータは並列する神経細胞群で一斉に解読されることを示唆している。その並列のデータ処理では、照合処理のためにデータを区切る位置を検出して、データを入れ替える作業の必要がない。

#### 4.5 大脳の新皮質の活動

同じ実体が発する映像データは同時に発生するから、特定の物体の映像を認識する大脳新皮質の神経細胞の組織が間欠的に形成される[15]。神経細胞が活動のサブグループを表象し、それが神経回路網で共有される。階層的な回路網では上位の表象は持続した活性化により成分の表象に変換する。持続した活性化はループ回路で発生する高頻度刺激を制御して実現する。

思考は神経細胞の活動によるので別の領域の活動を連想することができる。直前の状況が直後の活動の原因となり、その結果が次ぎの状態となり、状態の遷移が連なり、思考活動は弁証法的に継続する[16]。

ヒトは思考の世界を持ち、実世界の状況から独立した活動を可能するが、その活動は経験を通して組み込まれたことが基礎になっている。ヒトの活動は思考により目的を持つようになった。思考が建て増しされた新しい神経回路の活動であり、思考は行動より優先される傾向がある。

ヒトは話すときには、話したいことを思い浮かべながら単語を直列につなげて発話する。その際に上位の表象を活性化させておいて、下位の成分の表象を活性化する。そこで先に述べた高頻度刺激を制御して発生する仕組みにより上位概念の活性化を保持する。

### 5. 応用

#### 5.1 デジタル電子回路技術による視覚装置

脳神経系では正のインパルスを送ることにより、転送先を活性状態(電子が奪われた励起状態)にして、デジタル的な状態の変化をもたらす。

CCDシステムは、神経系と類似の回路の候補ではあるけれど、CCDデバイスでは同期制御回路が必要であり、所望の動作をさせるに多くの試作が必要になる。

一方、デジタル電子回路の状態はパルスのエッジで変化する。むしろ、既存のデジタル電子回路技術を用いて電子装置を設計制作の方が現実的である。

種々の画像認識をする場合には基礎となる要素を共有すれば回路の利用効率が向上する。基礎となる要素を共有すると階層構造が形成される。そこで検査対象の映像を認識要素に分解してその組み合わせで照合すると、同様な映像群は同じものと認識できる。具体的に、必要とする認識対象を特徴付ける要素を組織して認識システムを構築する。

## 5.2 パターンの照合を並列で行う半導体素子

デジタルコンピュータは処理のセグメンテーションがあるので、多種多量の映像のパターンを認識するのは容易ではない。映像の処理は母線に解読器を並列に接続して、同時に照合する並列処理が望ましい。

3次元半導体素子が困難であるので、2次元平面配列の遅延転送要素群に1次元並列のパルス列を流して、映像パターンのデータを照合する。2次元平面配列の遅延転送要素群はデジタルカメラに用いられている半導体デバイスによって実現できる。

神経回路は実装される時に反応と回路が共存していて自動的に形成される。そのような半導体電子回路は半導体不揮発性メモリ技術で浮遊ゲート MOS FET を接続要素として組み込めば実現が可能である [17]。

## 6. 結言

本報告では、「網膜に映る映像にリンクしたオーバーラップした神経回路群の統制された活性化が視覚であり、脳内における実世界のモデルの構築である」という説明に合わせて次の説明を提案した。

- 1) 神経回路が交叉し、集中神経系が形成された説。
- 2) 網膜に ON 領域と OFF 領域が存在する理由。
- 3) 網膜の網状層における中間介在神経細胞の役割。
- 4) 動映像を抽出するアマクリン細胞の仕組み。
- 5) 海馬の長期増強(LTP)が記憶に関与する仕組み。
- 6) 視野の視覚に視点の視覚を重量させた進化。
- 7) 基礎となる表象要素を共有した階層構造の形成。
- 8) 上位階層の神経細胞の活性化を制御する方法
- 9) 複数の活動が同時に存在する状態の制御方法。

ヒトの視覚には無意識の神経系の活動に依存していて、意識も関与する。視覚は条件反射的な知能を基礎にしている、長期記憶にも関係がある。経験で付け加えられる画像の理解がリンクして同時に活性化されるので、脳幹において多重に活性化される認識要素群を必要に応じて調整する。その一過性の神経回路群の活性化が視覚であると説明した。

応用として、視覚装置専用の半導体デバイスの開発を期待したい。

## 文 献

- [1] E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell, Principles of Neural Science, 4th edition, McGraw Hill, 2000.
- [2] J.G. Nicholls, A.R. Martin, B.G. Wallace, From neuron to brain, 3rd ed., Sinauer Associates, Inc., 1992.
- [3] S. Karasawa, M. Iwamoto, "The architecture of device that manipulates image in which each set of activities is ignited through transference of impulses", the 2nd Korea-Japan Joint Workshop on Pattern Recognition and Media Understanding, pp.201-206, Matsushima, Japan, Oct.25-26, 2007.
- [4] D.H. Hubel, "David Hubel 's Eye, Brain, and vision" <http://hubel.med.harvard.edu/book/bcontext.htm>, 1995.
- [5] H. Kolb, R. Nelson, E. Fernandez, B. Jones "Webvision -The organization of the retina and visual system-", <http://webvision.umh.es/webvision/index.html> new edition 2012.
- [6] 唐澤信司,"視覚のデータ処理単位を形成する介在ニューロンの機能", 第8回情報科学技術フォーラム (FIT2009), 生体情報科学 ; G-011, 第2分冊, pp.591-591, 東北工業大学, Sept. 2, 2009.
- [7] S. Karasawa, "Forming of intelligence that is intermittently opened to the real world: How a newborn baby acquires primitive intelligence", Seeing and Perceiving Vol.25, Supplement, 57, 13<sup>th</sup> Inter. Multisensory Research Forum, Univ. of Oxford, UK. 2012.
- [8] J.J. Gibson, "The ecological approach to visual perception", Houghton Mifflin Company, 1979.
- [9] Winder SA J, "A model for biological winner-take-all neural competition employing inhibitory modulation of NMDA-mediated excitatory gain" Neurocomputing, 26-27, 587-592, 1999.
- [10] M. M. Slaughter, R. F Miller,. (1981). 2-amino-4-phosphonobutyric acid: a new pharmacological tool for retina research. Science, 211, 182-5, 1981.
- [11] H. Wassel, B.B. Boycott, "Functional architecture of the mammalian retina", Physiol. Rev. 71, 447-480, 1991.
- [12] T.V.P. Bliss, T. Lomo, "Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path" J. Physiol, 232, 331-374, 1973.
- [13] S. Karasawa, J. Oomori, "Impulse circuits for a distributed control inspired by the neuro anatomical structure of a cerebellum" Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks, Vol.10, (ASME Press) pp.185-190, 2000.
- [14] 唐澤信司, "回転しているプロペラを撮影した映像による人間の視覚の検証", 信学技報, MBE2010-106, pp. 19-24, 2011
- [15] 唐澤信司, "インパルスの部分集合を画像認識の活動単位とした視覚システム", 信学技報, PRMU2003-39, pp. 7-12, June, 2003.
- [16] S. Karasawa, "The dialectical architecture of visual intelligence where every activity is available as a tool for the next activity", website presentation for European Conference on Visual Perception, A Coruna-Spain, Aug 22-26, 2005.
- [17] S. Karasawa, "Self-organization of network on activities for intelligent behaviors", 9th International Conference on Cognitive and Neural System, pp.101, Boston Univ., May 21, 2005.