

## 意識の仕組みを持つ情報処理装置のアーキテクチャ —脳を工学するボトムアップのアプローチ—

唐澤 信司

宮城工業高等専門学校・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 新皮質の複数の領域における活動は、視床により制御されている。これをサブルーチンのネットワークで実現することができる。視床と一次視覚野 (V1) の間を復する神経回路がある。本文ではこの回路の機能はインパルスを循環して、その保持時間を視床において制御する短期のメモリであるとした。特定の神経細胞が同時に発生した特定の画素のセットを認識してインパルスを出し、同時に複数の活動する領域がある状態は視床で調整する。時間軸に沿って変化している音声言語は海馬の顆粒細胞の軸索遅延線群を経由してパラレルに変換され、同時に発生する特定の入力群により特定の神経細胞が出力する。このインパルス出力はその入力群の表象であり、それが階層構造を形成した際には各層は重畳して活動する。このような表象群のインパルス的な活動を視床が時分割で制御している。

キーワード 意識、ビジョン、言語使用、脳、視床、神経細胞、インパルス、サブルーチン

## Architecture on the Device for Information processing controlled by Consciousness — A bottom-up approach for engineering on the mechanism of brain —

Shinji KARASAWA

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

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

**Abstract** Activities on the multiple areas of the new cortex are controlled by thalamus. There is neural circuit that reciprocates between the thalamus and primary visual cortex (V1). In this paper, the function of this circuit is explained as follows. Data retention time on the circulation is controlled by thalamus. A nerve cell outputs an impulse as recognition of one set of pixels that occur at the same time. Priority of activity is controlled by the hypothalamus at each instant. Since voice is varied along the time axis, the serial inputs are converted to parallel outputs by hippocampus. Each impulse from a neuron is the representative of a group of impulses through the segmentation. If neural network was formed a hierarchical structure, the activities of each layer is overlapping. Each representative possesses individual retention time. It can be realized in the form of a network of subroutines.

**Keywords** consciousness, vision, language use, brain, thalamus, nerve cells, impulse, subroutine

## 1. 緒言

本文では、インパルスを送ることによって情報の処理をしている脳のメカニズムについて説明する。それは、同期制御によるタイムシェアリングシステムであり、大量に入力された各種のデータを処理するための装置の設計に参考になる。

脳神経回路のメカニズムは、かなり明らかになってきた[1-2]。しかし、記述の細部に至ると著者によって違いがある。神経回路はインパルスを送っているだけである。しかし、インパルスは、発生の条件を満たした活動である。神経回路を完全に理解するには、インパルスによる信号処理を理解する必要がある。技術的な問題は、インパルス送回路において活動を保持する方法である。

2000年に、著者らは、インパルスの移動により情報処理を実行する神経回路のメカニズムを報告した[3]。また、2007年に顆粒細胞によるシリアルデータの処理を報告した[4]。さらに、2009年に網膜の自動感度調節のメカニズムについて報告した[5]。

その後、著者はV1上の視覚データの制御がループ回路を介して視床によって行われることがあると認識し、改めて意識のメカニズムについて検討した。人間は言葉を使って、考え、意識している。しかし、他の動物では、言語を使用せずに知性を持っている。だから、意識による視覚のメカニズムは、言語使用の前に取得されているに違いない。そこで、まず、視覚の脳のメカニズムについて説明し、言葉を用いた意識の制御の仕組みを述べることで、意識のメカニズムを有する情報処理装置を構築する方法を述べる。

## 2. ヒトの視覚のメカニズム

### 2.1. 視床による神経回路網の制御

視床は脳幹の上部にある核の集まりで、大脳新皮質内のさまざまな領域との神経回路を持っている。神経細胞はインパルスを送っているだけであるが、視床を通過する時にその転送を制御することができる。

図1に示すように、インパルスは視床を介して新皮質の特定の部分に投影される。その神経回路の活性領域は、各瞬間における脳の活動状況により変更される。

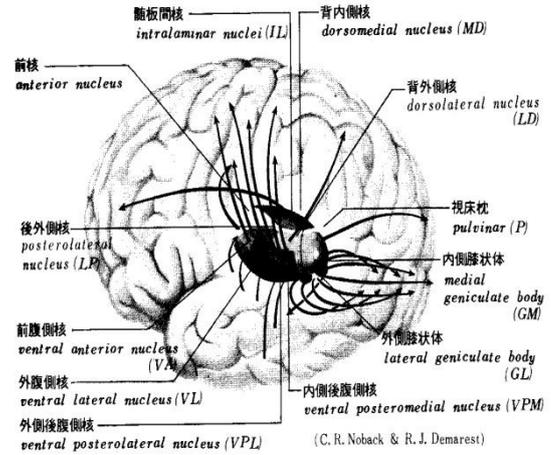


図1. 大脳皮質と視床の間の情報の交換 (C.R. Noback & R. J. Demarest による。図1は文献 [6] p.16 による)。

神経細胞はそれぞれの時間に非常に短い時間幅のインパルスを送る。神経細胞には不応期があるのでインパルスの伝播は一方通行である。それで反対方向に伝播するために別の神経回路が必要である。

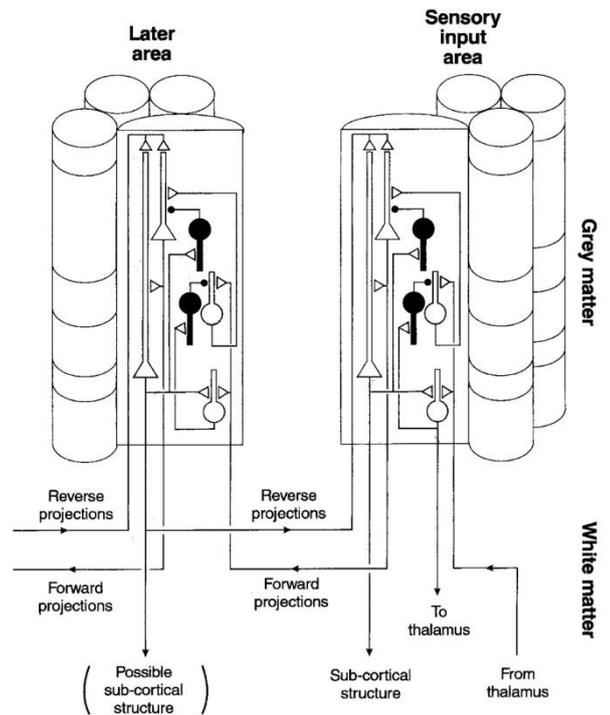


図2. C. D. Gilbert and T. N. Wiesel によるネコの視覚野の神経回路[5]、(図1は Fig 7.8 文献[6]p.205,による)。

### 2.2. 視覚の神経回路

映網膜から脳への二つの経路がある。一つの経路は、

一次視覚野 (V1) に接続されていて、他の経路は眼球運動のため上丘に接続されている。

図2に示すように、V1は、視床からインパルスを受け、V1から視床にインパルスを送る。V1および視床間の接続は、ループ回路を形成していると仮定すると、循環によりインパルスが保持できる。

図2. の感覚入力領域(V1: sensory input area)から大脳皮質の分析の領域 (later area: sub-cortical structure)に送られたインパルス群の特定のインパルス群は特定の神経細胞によって認識される。さらに上位の階層の神経細胞によっても解読される。

視床は、一次感覚野からのインパルスを受け取る。さらに、視床は眼球運動のための上丘からインパルスを受け取る。そこで V1 上の一時的な活性化は、視点の移動の信号によって変更される。

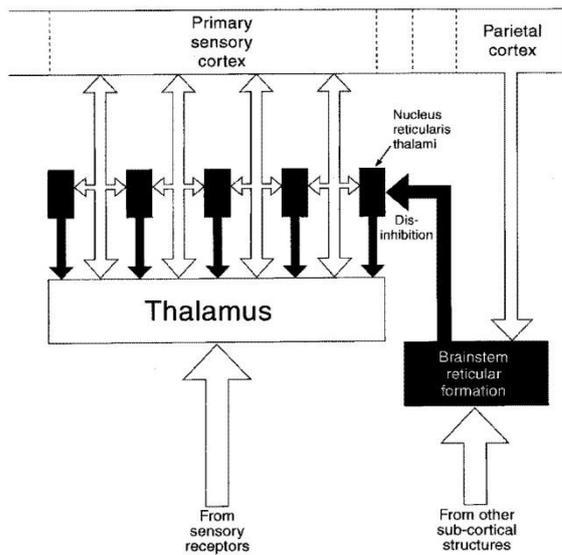


図3. 第一次感覚野と視床の神経経路、大脳皮質からの脱抑制経路もある。(図3. は Fig 7.11 文献[6]p.225による)

視床は幾つもの大脳の第1次感覚領域とインパルスを送受しているが、図3. に示すように興奮性神経経路に大脳皮質からの脱抑制経路があることが注目される。

### 2.3. 脳幹を取り巻く神経回路群

図4. に感覚器から大脳およびアクチュエータに情報を中継する脳幹(最上部に視床がある)の位置づけを示す。

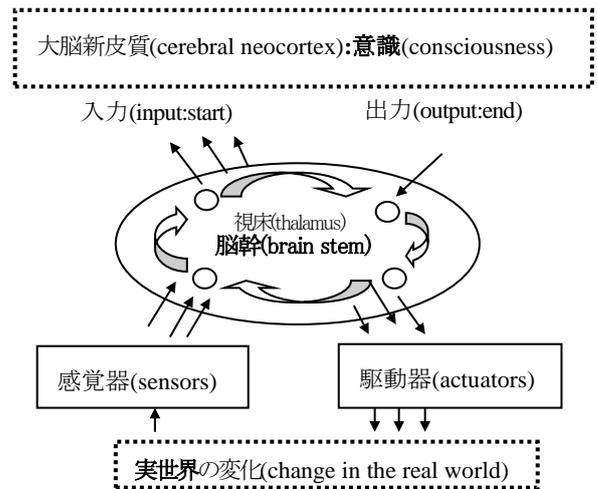


図4. 感覚器、大脳およびアクチュエータに情報を中継する脳幹

### 2.4. 時間分割で行われる視覚の情報処理

映画は毎秒24フレームの画像から構成されており、各フレームは静止画像である。しかし、私たちは自然現象と同様に映画を知覚し、フレームの断続的な変化は認識していない。この事実は、私たちの視覚が時分割処理であることを示している。対象物の形状は静止画像から認識すして、運動はコマ送りで前後する静止画像を比較することによって認識する。

エレアのゼノン(盛時B.C460年頃)は、「飛んでいる矢は止まっている」とパラドックスを語った([9]. p115)。また、ベルグソン(1859-1941)は「今がやってくると思うとき、それはまだ存在していない。今が存在していると思うとき、それはすでに過ぎ去っている。」と言った[10]p. 214)。

「現在」は、現実であり、「考えること」脳における情報処理である。現実と認識には違いがある。

### 2.5. 神経回路に含まれる意味

神経細胞は同時に活動する神経細胞の軸索と接続し、それらの入力の積分値が閾値を超えた場合、後続の神経細胞にインパルスを出力する。神経細胞の反応は短時間に立ち上がり、すぐに消える非線形な活動である。その出力の発生条件は回路の接続に書き込まれていて、出力は、神経細胞がインパルスを発射する条件が満た

されたことを示している。反応前の状態に復帰するために不応期があるので、反応は一方だけに進む。

図5は、インパルス関数  $\delta(t)$  及び  $U(t)$  のステップ関数との関係を示している。

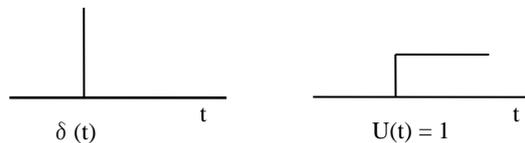


図5. インパルス関数  $\delta(t)$  とステップ関数  $U(t)$

$$\int \delta(t) dt = U(t) = 1 \quad (1)$$

式(1)で表されるように、 $U(t)$  は、 $\delta(t)$  の積分である。生体ではインパルスにより反応を起こすと、状況が変化してセンサーからの情報が更新される。それがフィードバックのサイクルを構成する。インパルスはニュートン力学では変化を起こす力に対応する。インパルスによって速度がステップアップする。移動距離はインパルスによって直線的に変化してゆく。

神経回路の伝えるインパルスは正の電荷をもつ領域であり、周囲の分子の電子を奪いイオン化させて反応を起こすことができる。そこで、神経細胞のインパルスは転送することにより、その活動を再演する回路ができる。

神経回路における正のインパルスによる情報の処理の起源は水素イオン( $H^+$ : Proton)にあると考えられる。 $H^+$  は電子を持たず、動きやすい。そして、その  $H^+$  は水素結合を担っていて、生体の分子の組織は、 $H^+$  の移動によって変形される。 $H^+$  の移動によって生体組織を活動させることが可能である。

## 2.6. 神経細胞の反応とその認識

対象物が点Aから次の信号処理において点Bになった時、それはアナログ的にAからBに直線的に移動したと認識される。神経回路の反応は認識の規則の成立を意味するので、インパルスというデジタルの活動がアナログ的な規則の実現として認識される。

視覚には膨大な量のルール(神経細胞)が関与して

おり、同時に多量のルール(神経細胞)が活動しているが、それら全てがアナログ的であると理解される。

## 2.7. 重畳する視野の認識と視点の認識

人間の視覚には、位置の認識(それがどこにあるの?)と各画像の分析(これは何ですか?)がある。前者は視野の信号処理に含まれ、後者は、視点の認識に含まれる。

ヒトの新皮質は著しく大きくなった([6] p.5)。そのヒトの大脳新皮質の約3分の2は連合野である([11] p.115)。その連合野で視点の映像の理解を行っている。

他方、視野の情報を処理するのは上丘である。上丘で視野に関する位置の認識処理がなされたのが先で、視点の情報を処理する新皮質の神経回路が形成された。

新たな能力が追加されると、既存の活動と、新しく追加された活動は同時に活動する。一般に、新たに追加された活動に優先性が与えられるので、本能的な領域からの指令は抑制される。ところが、視床は上丘から目の動きの情報を受け取り、新皮質の視覚野の活動が上丘の制御を受ける無意識の活動がある。

一般に2つの領域が制御の動作のために必要とされる。一つは、制御領域であり、他方が制御される領域である。それが時分割制御の場合には、制御すべき領域と制御領域を交換することは問題ではない。

人間の網膜の中心領域での黄斑には、錐体(Cone)だけがある。錐体は色覚を担い、日中の明視力を担当する。黄斑領域の画像を視床が一次視覚野に中継し、既存の画像に照合される。

他方、視野の領域には杆状体(Rod)が存在する。杆状体はかすかな光に敏感であり、それは精細に明るさに反応する。この領域からの情報は上丘に送られ無意識活動の情報処理が行われる。

## 3. 時間の進行で変化するデータ群の情報処理

### 3.1. 海馬の構造と機能

海馬は、バナナのような構造をしていて、歯状回(Dentate gyrus)および海馬(Hippocampus)から構成されている。海馬の三次元構造を図6に示す。

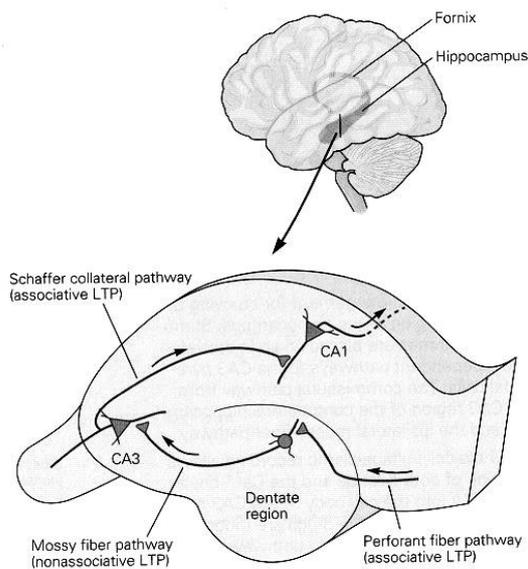


図 6. 海馬の 3 次元構造図 (図は 文献[1]p. 1257 Fig. 63-7 による)

海馬の歯状領域の神経細胞は顆粒細胞(Granule cell)である。他方、海馬 (CA3,CA2,CA1) の神経細胞は錐体細胞(Pyramidal cell)である。

図 7 に海馬の神経回路を示す。

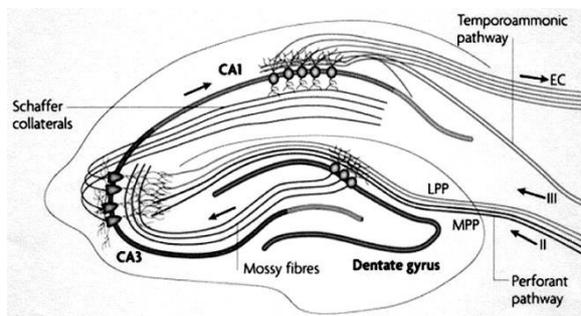


図 7. 海馬の主たる神経回路 (図は <http://www.nature.com/nrn/journal/v11/n5/images/nrn2822-f1.jpg> による)

海馬を経由する情報は、穿孔繊維 (Perforating fiber) を通って入り、それが歯状回を介して海馬 (CA3 → CA2 → CA1) に転送され、最後に、大脳の嗅内皮質 (Entorhinal cortex) に送られる。嗅内皮質は、進化の過程で古いエリアである、それは広く大脳全体にリンクされている。

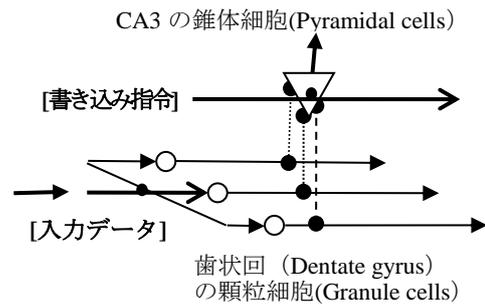


図 8. 感覚細胞の発生するインパルス列を記憶する神経回路モデル。ここで、顆粒細胞の不応期が短いことと、顆粒細胞の軸索の転送時間が遅いことを仮定した。

図 8. に顆粒細胞の軸索の伝搬速度が遅いと仮定したインパルス列を記憶する神経回路のモデルを示す。

軸索のインパルスの伝搬速度は、軸索のチャンネル密度に依存している。そこで、平行繊維の伝播速度が遅いと仮定する。平行繊維の遅延時間は、伝搬の長さによって異なる。顆粒細胞の軸索は苔状線維(Mossy fiber)で種々の錐体細胞に接続している。そこで、異なる位置にある錐体細胞には同じ苔状線維から遅延時間の異なるインパルスが伝えられる。

顆粒細胞の不応期が短いと、シリアルなインパルスが平行繊維に入力される。大脳から書き込み命令のインパルスが錐体細胞にきた瞬間にインパルスが存在する並列繊維群が接続される。そこで、シリアルインパルスの列が並列の接続点群に記憶される。

海馬において活性化された領域が図 7. の矢印の方向にまわりながら螺旋状に進行することが報告されている ([12] p. 18-23)。

### 3. 2. 神経細胞の不応期

神経細胞は狭いシナプス間隙内の神経伝達物質の分子を受け取り、それがシナプス電位を変化させる。約  $-80\text{mV}$  の静止電位がシナプス電位の変化によって  $-40\text{mV}$  の上になったときに  $+30\text{ mV}$  の  $\sim +50\text{mV}$  のスパイクである活動電位が、神経細胞で発生する。

活動電位は、通常では、1 ミリ秒程度以内に完了し、その後、不応期が数ミリ秒以上発生する。インパルスは顆粒細胞の不応期の間に並列接続繊維中に入ることは不可能である。そこで、短期記憶のためのループの一巡には不応期よりも長い遅延時間が必要である。そ

れ故、図8に示すモデルでは、入力するインパルス列の間隔より顆粒細胞の不応期が短いと仮定した。

### 3.3. シリアル信号を記憶する小脳の仕組み

小脳の主要な神経回路が図9に示されている。小脳にも中間媒介細胞である顆粒細胞がある。なお、これらの顆粒細胞群は、海馬と同様にシリアルインパルスを解読する処理に関わると考えられる。

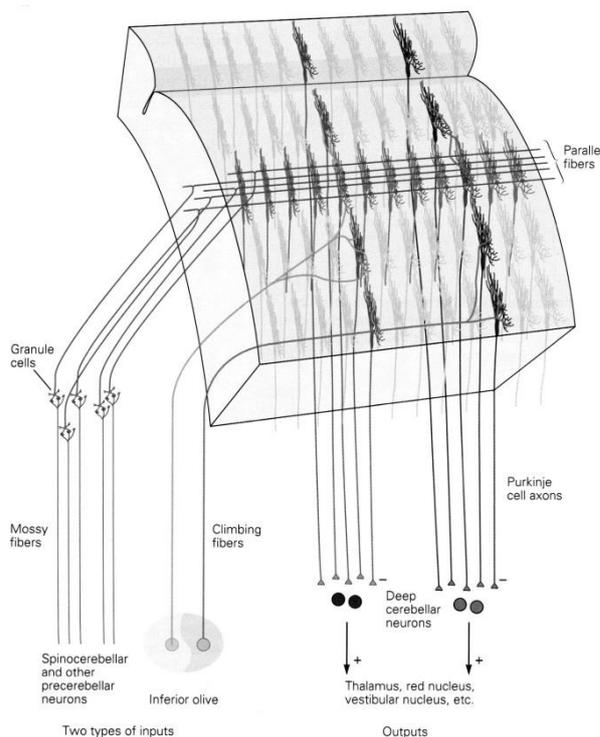


図9. 小脳の神経回路(文献[1]p. 838 Fig. 42-7による)

小脳は、脊髓小脳(Spinocerebellum)や小脳前核(Precerebellar nuclei)を介して、身体感覚器官からの入力を受け取っている。さらに、それは、脳幹における橋核を介して入力を受信し、それはまた、大脳皮質領域の自発的な運動に関連して下オリーブ核および赤核を通過した入力を受け付ける。(文献[2]、Chap. 15、図8参照)

Purkinje細胞は1本の登上線維(Climbing fiber)のみを受けて、接続のタイミングが指定される。 指令のインパルスが発生された瞬間にインパルスが存在する複数の平行線維(Parallel fibers)がプルキンエ細胞に接続され、Purkinje細胞と複数の平行線維の接続に

よりシリアル-パラレル変換がなされる。

平行線維と登上線維からのプルキンエ細胞への入力が興奮性であることが知られている。他方、プルキンエ細胞は、深部小脳ニューロン(Deep cerebellar neurons)への抑制性インパルスを出力し、抑制性インパルスの抑制により他の活動を制御する。ここで、プルキンエ細胞は、“興奮性インパルスが来ない抑制性インパルスを発生する”と仮定すれば、登上線維からの再生指示のタイミングで深部小脳ニューロンに流入するインパルス群を抑制してシリアルデータを再生できる。

他方、海馬の錐体細胞に書き込まれたデータを維持するためにはループ回路のためのバッファの細胞や循環する活動を停止するための制御回路が必要である。

### 3.4. 神経細胞によるデータシートの分析

一つの成分のセンサーがインパルスを時間進行で発生し、そのインパルス列を平行線維が伝搬するとする。その際に多くのセンサーから時間経過で変化する入力があるとすると、それらのデータは二次元となる。

データシートが区切りの単位で新皮質に与えられる。このパターンのデータをパターンマッチングの方法によって分析することができる。つまり、二次元データの認識は、視覚と同じ方法で認識される。

## 4. 行動や言語を表現する情報処理

### 4.1. インパルスにより動作を制御する仕組み

図10にロボットの基本動作のデータ例を示す。

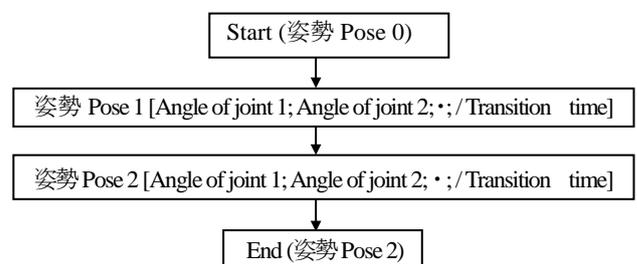


図10. 関節の角度の変化とその遷移時間を書き込むことで実装する基本動作のプログラム

ヒトは動作をフレーム単位による姿勢の変化によって覚えている。コマ送りで姿勢の制御をしてもスムー

ズな動作ができるのはタイミング制御が実際の動作に同期して記憶されているからである。

実際に、ロボットの動作に必要なデータは前後における各関節の角度、及び遷移時間である[13]。

#### 4.2. 表象の階層構造で記述される行動

行動のプログラムは、ボトムアップによって形成され、トップダウンで実行される。

神経細胞のネットワーク内で同時に活性化されたインパルスの集合により上層の表象である神経細胞がインパルスを発生する。上位の表象には、その成分のインパルス群の全て含むデータが必要である。シリアルなデータの表象を書き込むときには、先着した下位の表象群は最後の区切りまで継続されなければならない。

トップダウン方式による再生では、上位層の代表の活動は、下層の表象列が終わるまで継続されなければならない。その制御が視床によって行われている。

行動制御のプログラムは、動作の表象の階層的な接続によって記述される（サブサンクション・アーキテクチャ[14]）。表象の階層的な接続で構築した活動はサブルーチンと呼び出す方法で処理ができる。

図 11 に表象である神経細胞の階層構造を示す。

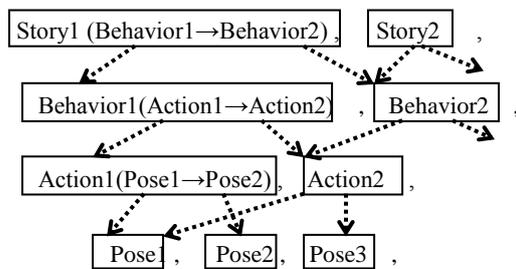


図 11. 行動を制御する神経細胞の接続（矢印の方向は再生時）

### 5. 思考のメカニズム

#### 5.1. 最も重要な知能とは限らない言語の知識

神経回路網において反応を展開するインパルスは情報を担っていて、情報は現実の世界で物事や出来事を表す表象である。人間は知識を表現するために言語を使用するようになった。これは、新たに既存の知性に追加された機能である。

#### 5.2. ロゴスの世界を構築する試み

ヒトは紀元前6世紀頃から理由を通して世界を理解しようと試みた。それは、ヘラクレイトス（盛時紀元前6世紀初期）によって書かれた文章「上り坂も下り坂も同じである。」（[9] p.14）から垣間見ることできる。共通の部分抽出することや、共通のものを除去することによって、普遍的な概念を得ることができる。それが科学の始まりであった。

新しく追加された知能は、既存の知能よりも優先される。そのためにヒトは理論を優先させる傾向があると考えられる。しかし、実際の体験が基礎にあることが重要である。

本来、心の活動は経験したトレンドやイベントの外挿である。情報を得たとしても知識は人類が経験している傾向やイベントの外挿である。現実の世界に対応するため、現在の瞬間に適切な活動が必要である。

### 6. 結言

思考によって思考のメカニズムを推測することには限界がある。無意識で処理する動作を推測することは難しい。工学では処理する仕組みに拘る必要がある。

本報告では、インパルスを転送する回路による知能の仕組みを考え、脳神経回路による意識を持って制御される視覚などのメカニズムの説明を試みた。

意識は他の神経細胞を制御する活動である。意識の活性は、作用と同様に制御される。脳の神経組織では大脳新皮質の活動を制御する機構を視床が備えている。

インパルスの転送による知的な活動は、同期制御による時分割方式によって行われる。知能の要素の層状構造は、階層的にサブルーチンの活性を割り当てることにより実現できる。つまり、意識の機構を有する知能装置は、CPU と同様の方法で実現できる。さらに、インパルスの代表として電荷を蓄積する半導体装置を作製することもできる。

本報告が“Engineering of Mind [15]”の開発の促進に貢献することを著者は期待している。

### 文 献

[1] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell,

- Principles of neural science, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill Health Professions Division, 1991.
- [2] J. Nicholls, A.R. Martin, and B.G. Wallace, "From neuron to brain, 3<sup>rd</sup> Edition", Sinauer associates, Inc. pp.109, 1992.
  - [3] S. Karasawa, J. Oomori, "Impulse circuits for a distributed control inspired by the neuroanatomical structure of a cerebellum", pp.185-190, Intelligent Engineering System through Artificial Neural Networks, Vol.10, ASME Press series, 2000.
  - [4] 唐澤信司,"顆粒細胞層による網膜、海馬および小脳のタイミング制御", 東北大学電気通信研究所 第16回生体・生命工学研究会 No.5, March.2, 2007.
  - [5] 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.
  - [6] 時実利彦, 目でみる脳-その構造と機能-東京大学出版会,1969.
  - [7] C. D. Gilbert and T. N. Wiesel, Intrinsic connectivity and receptive-field properties in visual cortex. *Vision, Research*, 25, 365-74, 1985.
  - [8] R. Cotterill, "Enchanted Looms", Cambridge Univ. Press, p.205, 225, 1998.
  - [9] K. Freeman, "The Pre-Socratic Philosophers", Basil Black Mott Ltd, 3<sup>rd</sup> Ed. p.115, 1953.
  - [10] B. Magee, The story of philosophy, Dorling Kindersley Limited, London, p.214, 1998.
  - [11] 監修 伊藤正男, 別巻 NHK サイエンス スペシャル 驚異の小宇宙・人体Ⅱ脳と心 "ビジュアル脳と心のデータブック", NHK 出版, 1994.
  - [12] NHK 取材班, 驚異の小宇宙・人体Ⅱ脳と心 3, "人生をつむぐ臓器 記憶", NHK 出版, 1993.
  - [13] S. Karasawa, "Layered network of representatives for control of robot", Proceedings of the International Conference on Electrical, Control and Automation, pp.745-747, Shanghai, China, Feb 22-23, 2014.
  - [14] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot". *IEEE Journal of robotics and automation*, RA-2, pp.14 – 23, 1986.
  - [15] J. S. Albus, A. M. Meystel, "Engineering of Mind" – An introduction to the science of intelligent systems–, John Wiley & Sons, Inc., 2001.