

Biologically Inspired Model : 脳神経・知覚・ロボティクスによるハイブリッドシステムを目指して

林 勲

Isao Hayashi

関西大学

Kansai University

山ノ井 高洋

Takahiro Yamanoi

北海学園大学

Hokkai Gakuen University

工藤 卓

Suguru N. Kudoh

産業技術総合研究所

AIST

1. はじめに

脳は外界と相互作用することで情報を取り込み、知性や知覚を自律的に獲得する [1]。脳を一つのモデルと仮定すると、そのモデル構築には、神経細胞や神経回路網レベルでの電気的、化学的構造特性やシナプス伝達の可塑性に代表される自律学習機能等を解析して上層への階層性構造をモデル化するボトムアップモデル、及び脳の表象出力としての知覚、学習、記憶等の高度ネットワーク構造を計測しその下層への階層的構造をモデル化するトップダウンモデルの 2 つのアプローチがある。また、それらの仲介モデルとして階層構造に着目し数理モデルのアプローチをとるミドルウェアモデルがある [2]。従来では、脳機能や脳構造を解析、分析、モデル化することを目的に、生理学、生物学、解剖学、心理学、神経科学、物理学等の観点からの研究を主としていた。最近、脳活動や脳活性を計測して、あるいは、脳機能や脳構造の応用モデルとして、脳を工学、情報学、社会学、経済学、教育学等の観点から応用する研究が促進されつつある。ここでは、この一連の研究を Biologically Inspired Model と呼ぶ。著者らは、ソフトコンピューティング手法を活用した Biologically Inspired Model の研究を行っている。

本論文では、この Biologically Inspired Model の一例として、脳神経、知覚、ロボティクスによるハイブリッドシステムを紹介する。まず脳神経からのアプローチ、すなわち、ボトムアップモデルとして、生体表現システムを紹介する。最近、脳と外界機器とを相互結合する脳機械インタフェース (BMI, BCI) の研究が行われている [3]。脳は外界の機器からの情報により環境のダイナミクス性を学習し、機器は脳細胞の可塑性の学習機能により適応制御が可能となる [4]。また、その適応性は脳細胞に新たな学習性を与える。すなわち、この相互インタラクションの“学習性”は脳細胞の“可塑性”と機器の“適応性”に支えられ、全体システムは“環境ダイナミクス”に対応する循環型ネットワークを構成している。著者ら [5-9] は、脳細胞としてのラットの海馬の分散培養神経細胞と外界認識手段としてのロボットとを相互結合して、合目的な知識獲得および行動表現が可能な“生体表現システム”を提案している。培養細胞をロボットに接続する研究には、S.M.Potter らの Hybrot [10] がある。しかし、単純に神経回路網と外界とを接続するのみであり、衝突回避のような合目的な行動は生成されない。生体表現システムは培養細胞の可塑性学習とファ

ジシステム [11] の適応性学習により、ロボットは規範的な制御行動だけでなく、周りの環境のダイナミクス変化に対応した学習的な制御行動が可能である。具体的には、ボトムアップ性ファジィ推論を用いてロボットの行動結果から培養神経細胞への生体刺激を推論し、トップダウン性ファジィ推論を用いて培養細胞の学習活動反応からロボットアクチュエータの行動判断を推論する。この双方向処理は生体細胞と外界ロボット間のボトムアップとトップダウン処理を想定して構成しており、合目的な行動を実現する。ここでは、この双方向インタラクションが学習的かつ合目的な行動を実現することを示す。

次に、表層的知覚からのアプローチ、すなわち、トップダウンモデルとして、視覚構造を解析する Aperture 実験 [12-14] を紹介する。コンピュータディスプレイ上に円形の小窓が現れ、その円内を線分が左下から右上方位に移動し、新たな 2 つの円が小窓の両側に表示され、両円内の別の線分が鉛直上方に移動する。3 つの直線が連続していると知覚された場合には、小窓円内の線分の移動方位が鉛直上方に変更されたように知覚される。仁科ら [15, 16] は視覚実験から、知覚は円半径と端点間距離に依存し、線分の呈示時間が長ければ長いほど認識されやすいことを示した。著者ら [17-20] は線分速度を変化させ、呈示速度が遅い場合の知覚認識率について議論している。同時に、脳波 (EEG: Electroencephalograms) 検査実験により、脳内の知覚反応の活動部位を推定した [20-22]。具体的には、端点間距離あるいは半径、線分速度を変化させた場合の呈示時間の変化に対する知覚認識率を測定して線分速度依存性を検証し、EEG 解析用のソフトウェア [23] により、端点間距離、半径、線分速度を変化させた場合の視覚誘発電位 (VEP) の振幅変化から脳内活動部位を推定し、背側経路と腹側経路における推定部位と知覚との関係について議論する。ここでは、上記の 2 つのアプローチの事例を紹介し、Biologically Inspired Model の有用性について議論する。

2. 生体表現システム

図 1 ~ 図 3 に生体表現システムの概要を示す。外界からの情報はボトムアップ処理とトップダウン処理により適応性学習 (AL) や可塑性学習 (PL) に影響を与えるが、ソフトコンピューティング手法としてのファジィ推論では、環境変化の外界情報の変移を視覚情報などの外部情報として適応的に捉えて学習する。ここでは、学習型

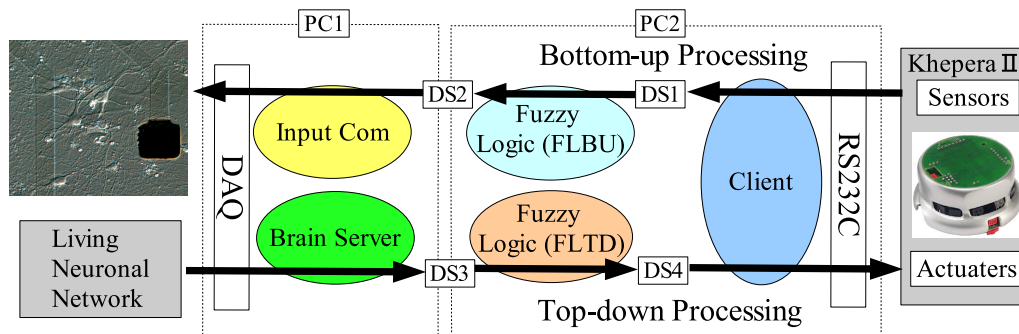


Fig. 2: Living Neuronal Network and Robot

ファジィ推論を用いて、適応性学習は第1段階の適応性学習 (1stAL) と第2段階の適応性学習 (2ndAL) から構成される。培養神経細胞では、自発的神経活動 (SPT) を伴う可塑性学習 (PL) により、与えられた環境下で状況に順応できる学習を想定している。しかし、適応性学習と可塑性学習が個別に学習するのは統一的な評価目的は達成されない。そこで、全体を調整する機能が必要であり、ここでは、この機能を“コーディネーター”と呼ぶ (図1参照)。

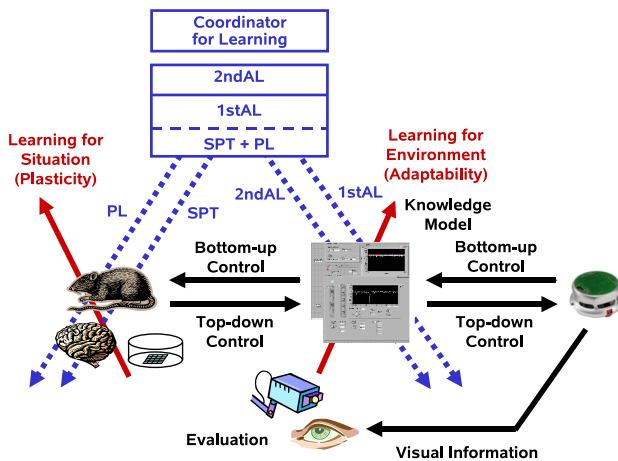


Fig. 1: Biomodeling System

詳細なシステム構成を図2に示す。生体細胞としては胚令17~18日のラット胎児脳から海馬領域を摘出し、トリプシン処理により解離する。8×8個の微小平面電極を備えた培養皿に内径7mmのクローニングリングを配置し、この内部へ解離した50万個の細胞を播種する。血清を含むD-MEM / F12培地で炭酸ガス培養装置中に14~20日培養したものを実験に用いた。

計算負荷を2台のコンピュータに分散させるため、処理を複数のユニットに分割し、ボトムアップ処理とトップダウン処理を構成した。ボトムアップ処理では、ケペラのセンサ情報をClientが読み取り、データソケットDS1を経由して、ファジィ推論ユニット (FLBU) を用いて電流刺激の回数を推論し、Input ComとDAQを介して神経回路網を電気刺激する。トップダウン処理では、

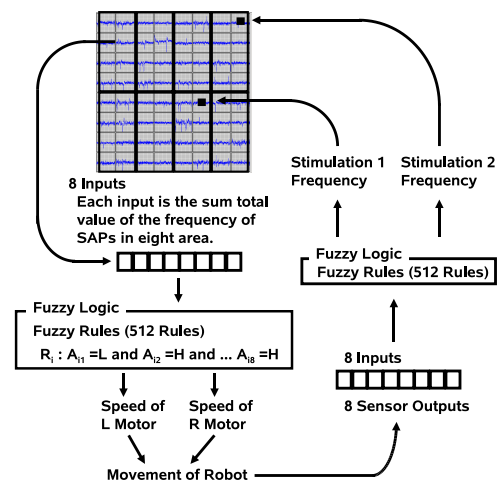


Fig. 3: Robot Control with Living Neuronal Network

BrainServerが検出時間幅に出現した海馬培養細胞の活動電位の頻度をDAQを介してDS3に書き込み、ファジィ推論ユニット (FLTD) が活動頻度からケペラロボットの左右アクチュエータ速度を推論して、ケペラを制御する。特に、FLTDでは、細胞外電位多点計測システムの64個の電極を8個ずつに分割統合し8入力とした。各入力において、検出時間幅を50msとして8個の電極で検出された活動電位の出現回数を入力変数とし、ケペラの左右のアクチュエータの-20~+20の速度を出力とした。なお、ファジィ推論には簡易型ファジィ推論を用い、8入力2出力で2種類のファジィラベルによる256個のルールを構成した (図3参照)。

ルール設定では、細胞外電位多点計測システムでの任意の2個の電極から細胞への電流刺激による誘導活動電位を測定して、これらの活動電位パターン回数と回避行動が線形的になるようにしてメンバシップ関数と出力速度を構成した。ファジィルールの一例を以下に示す。

$$R_1: \text{ If } I_1 \text{ is High and } \dots \text{ and } I_8 \text{ is High} \\ \text{ then } L_{\text{speed}} = 3 \text{ and } R_{\text{speed}} = 3$$

$$R_2: \text{ If } I_1 \text{ is High and } \dots \text{ and } I_8 \text{ is Low} \\ \text{ then } L_{\text{speed}} = 7 \text{ and } R_{\text{speed}} = 3$$

⋮

R_{256} : If I_1 is Low and ... and I_8 is Low
 then $L_{speed} = 1$ and $R_{speed} = 1$

実験では、ファジィルールは LabView により機械語に変換され、ファジィ推論によりケペラロボットが障害物を回避する。実験結果を以下に示す。

結果 1 ケペラ周辺に障害物がない場合には、自発的神経活動パターンにより多様な行動パターンが出現した。走行軌跡を図 4 に示す。

結果 2 ケペラ周辺に障害物がある場合には、FLBU により神経回路網への刺激頻度が入力され、ケペラは障害物回避を発現できた。回避例を図 5 に示す。

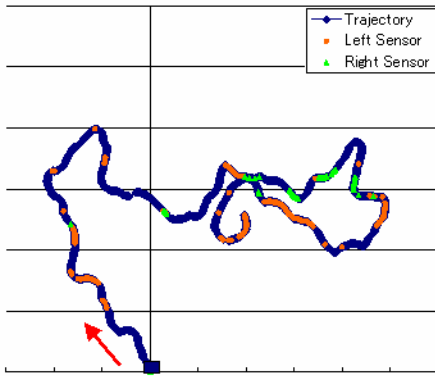


Fig. 4: An Example of Trajectory of Robot

結果 1 では、パターンは培養細胞回路網の定性的な内部状態を反映していると考えられるが、まだ明確に解析されていない。また、結果 2 では、FLBU によって、より増大な刺激が細胞に与えられ、細胞は電気活動の特定パターンを学習的に想起する。その結果、活動電位から FLTD によってケペラロボットのアクチュエータでの速度が推論され、より大きな回避行動をとっている。この結果は、生体細胞と外界ロボットによる生体表現システムの構築のための第一段階として興味深い。



Fig. 5: Collision Avoidance of Robot with Living Neuronal Network

2. Aperture 問題

Aperture 実験の概要を図 6 と図 7 に示す。被験者は顎乗せ台で固定され、解像度が 1280×960 pixels のディスプレイとの間で 1.0m の距離を保つ。ここでの知覚認識とは、図 7 において、中央円の線分移動が両端円の線分移動方位に変更されたと検知する事象である。知覚認識率算出の実験では、被験者は 18 ~ 22 歳の 10 名とし、開発した計測プログラムにより知覚認識の回答を得て、知覚認識率を算出した。脳波検査の実験では、1 名の被験者に対し、開発した計測プログラムと解析用ソフトウェアにより、脳内活動部位を推定した。

実験の時間的経緯を図 8 に示す。(a) 注視点と中心円が表示され、(b) 円内の線分が移動を開始する。その後、(c) 刺激円が表示され、円内の線分が移動する。(d) 刺激円が消失し、注視点と中心円のみが残る。(e) 被験者は線分の移動終了後、知覚認識の回答を行う。(f) 同条件にて、EEG 検査実験により脳波を測定する。



Fig. 6: Experimental Equipment and Subject

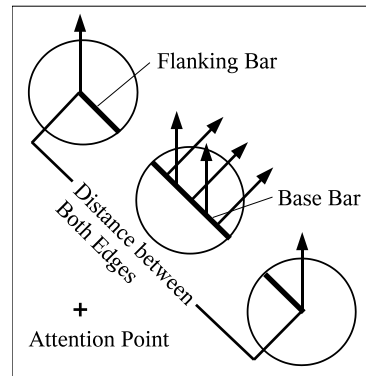


Fig. 7: Aperture Problem

以下に、本実験の概要を示す。

実験 1 : 線分速度 : 14.28mm/sec , 円半径 : 8.7mm として、端点間距離 : 40.4, 80.8, 121.2, 161.6mm および、呈示時間 : 100, 200, 300, 400, 500, 600msec を変化させた場合の知覚認識率を算出する。

実験 2 : 線分速度 : 14.28mm/sec , 端点間距離 : 121.2mm として、円半径 : 8.7, 11.4, 14.3, 17.1mm および、呈示時間を変化させた場合の知覚認識率を算出する。ただし、呈示時間は実験 1 と同じとする。

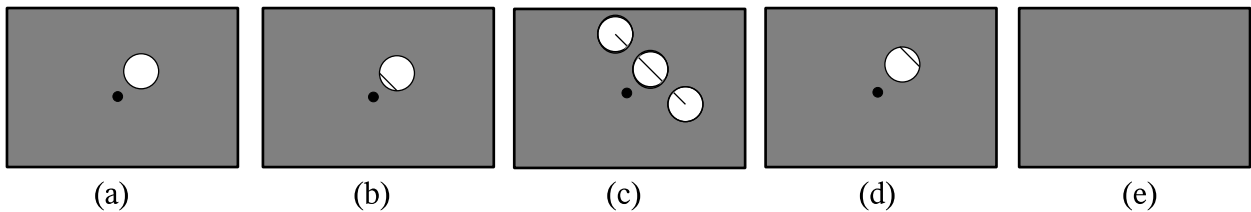


Fig. 8: Process of Aperture Experiment

実験 3： 端点間距離：80.8mm，円半径：8.7mm として，移動距離：5.7，7.1，14.3mm および，呈示時間：100，200，300，400，500，600，800，1000，1200msec を変化させた場合の知覚認識率を算出する．

実験 4： 線分速度：14.28mm/sec，円半径：8.7mm，呈示時間：500msec として，端点間距離：28.6，57.2，85.7mm を変化させた場合の脳内活動部位を EEG 検査実験により推定する．

実験 5： 線分速度：14.28mm/sec，端点間距離：85.7mm，呈示時間：500msec として，円半径：8.7，11.5，14.3mm を変化させた場合の脳内活動部位を EEG 検査実験により推定する．

実験 6： 端点間距離：57.1mm，円半径：11.4mm，呈示時間：500msec として，線分速度：2.9，5.7mm/sec を変化させた場合の脳内活動部位を EEG 検査実験により推定する．

実験 7： 端点間距離：57.1mm，円半径：11.4mm，呈示時間：500msec，線分速度：14.28mm/sec として，背側経路と腹側経路における活動部位を EEG 検査実験により推定する．

なお，知覚認識率の 1~3 の実験では，基本線分の角度を 90° とし，刺激線分の移動方位を 0° ， 45° ， 90° とし，知覚認識率は 5 回の繰り返しによる全被験者の全回答 150 個の平均値として得た．また，脳内活動部位推定の 4~7 の実験では，3 種類の刺激線分の移動方位と線分が出現しない場合の合計 4 種類の線分移動方位を乱数的に発生させ，60 回の試行実験により活動部位を推定した．

実験 1 では，端点間距離の大きさに依存して知覚認識率が増減した．また，呈示時間の長さにも依存してほぼ線形性を示している．一方，実験 2 では，半径の大きさに依存して知覚認識率が増減した．同様に，また，呈示時間の長さにも依存してほぼ線形性を示している．一方，実験 3 では，線分速度の減少に対して知覚認識率の減少は線形的になっていない (図 9)．この非線形性を確認するために傾向検定を行った．移動距離が 5.7mm の場合には，2 次関数，3 次関数，4 次関数に対する傾向性に有意が見られた．これらの結果より，知覚認識率は，線分速度に対して線形性以外の傾向性が現れるといえる．

実験 4 では，すべての条件で視覚刺激の変化に伴う視覚誘発電位の振幅の変化がみられた．特に，推定される潜時 340ms 以後では，基本線分の呈示に伴って刺激線分の移動方位が 45° 以外の方位で視覚誘発電位の振幅に変

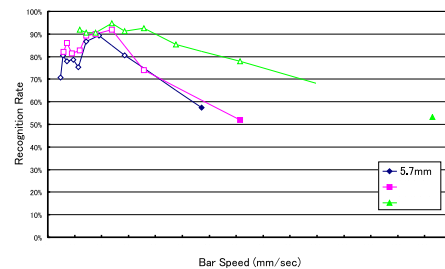


Fig. 9: R.R. for changing Display Speed

化がみられた．また，刺激線分移動方位が水平 (0°) 及び垂直 (90°) において，下前頭回 (1,160ms ~ 1,170ms) と中前頭回 (1,230ms ~ 1,250ms) で推定される潜時で偏りが見られた．一方，斜め方位 (45°) では，推定される潜時での偏りは見られなかった．これらの結果から，刺激線分の水平と垂直方位では，空間認知に差異を生じるので，より活発な視覚誘発電位が空間認知に関わる下前頭回と中前頭回に見られたと考えられる．

実験 5 では，すべての条件で視覚刺激の変化に伴う視覚誘発電位の振幅の変化がみられた．刺激線分移動方位が水平 (0°) 及び垂直 (90°) において，上前頭回 (1,640ms ~ 1,650ms) と中前頭回 (2,040ms ~ 2,050ms) で推定される潜時で偏りが見られた．一方，斜め方位 (45°) では，推定される潜時での偏りは見られなかった．これらの結果から，刺激線分の水平と垂直方位では，空間認知に差異を生じるので，より活発な視覚誘発電位が空間認知に関わる上前頭回と中前頭回に見られたと考えられる．

実験 6 では，すべての条件で，視覚刺激の変化に伴った視覚誘発電位の振幅の変化が見られた．前頭前野で推定された潜時に偏りが見られたものの，刺激線分の移動方位の変化に関して，空間認知活動の視覚誘発電位には変化は見られなかった．

最後に，実験 7 では，実験開始から終了までの時間的経過による脳波を計測して刺激線分の移動方位に対する脳内活動部位の変化の経路を推定した．その結果，推定される潜時 100ms ~ 400ms，500ms ~ 700ms，1,000ms ~ 1,300ms において，視覚誘発電位の振幅に変化がみられた．潜時 245ms における V4 での視覚誘発電位の変化を図 10 に示す．また，潜時 625ms (線分呈示後 285ms) における MT での視覚誘発電位の変化を図 11 に示す．

一般に，眼球から入力された視覚刺激は，網膜 視神経交叉 外側膝状体 第一次視覚野の経路を経て，側頭葉から前頭前野に至る形状認識の腹側経路および頭頂葉から前頭前野に至る動き認識の背側経路とに分割して処

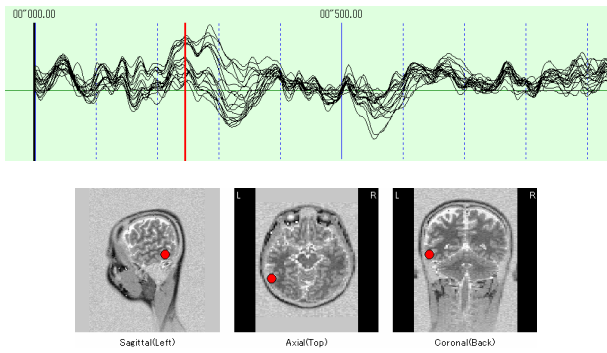


Fig. 10: Amplitude Change of VEP and Estimation in V4

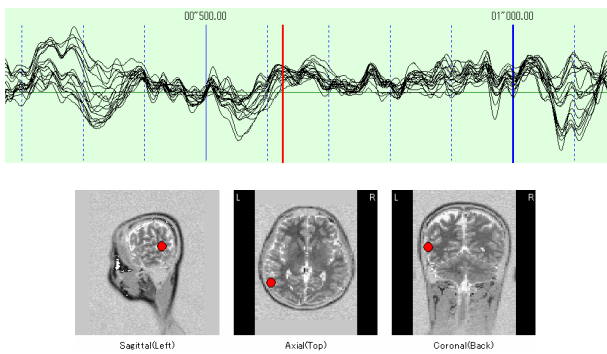


Fig. 11: Amplitude Change of VEP and Estimation in MT

理される．これらの知見と実験 7 の結果から，次のような腹側経路と背側経路が確認された (図 12 と図 13 を参照) ．

腹側経路： V1(133ms) V2(171ms) V4(245ms)
TEO 野 (306ms) TE 野 (357ms)

背側経路： V1(576ms) V2(611ms) MT(625ms)
後頭頂葉皮質 (711ms)

なお，実験 7 では，実験開始後 0ms で円が呈示され，340ms で基本線分が呈示される．したがって，潜時 0ms 以後で観察される腹側経路での脳活動は呈示されている円に対する視覚誘発電位と考えられ，潜時 340ms 以後で観察される背側経路での脳活動は基本線分の動きに対する視覚誘発電位と考えられる．

これらの結果から，円の呈示では，腹側経路での脳活動が観測された潜時と脳波の振幅に変化が現れた潜時とが一致した．また，基本線分呈示では，背側経路での脳活動が観測された潜時と脳波の振幅に変化が現れた潜時とが一致した．円呈示では，脳活動は形状認識に対する反応として腹側経路に検出され，基本線分呈示では，脳活動は動き認識に対する反応として背側経路に検出されたと推定される．

一方，刺激線分の呈示では，刺激線分の移動方位が水平と垂直である場合，右下前頭回 (1,165ms ~ 1,172ms) と左中前頭回 (1,235ms ~ 1,252ms) で共通の潜時に脳活動が観測された．しかし，斜め方位では，脳活動は観測されなかった．左中前頭回は空間認知の一時記憶の領野であり，右下前頭回は動き変化の一時記憶の領野である

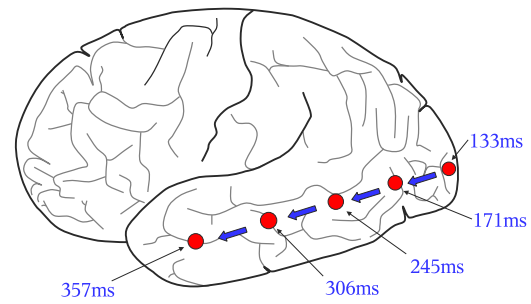


Fig. 12: Ventral Visual Pathway

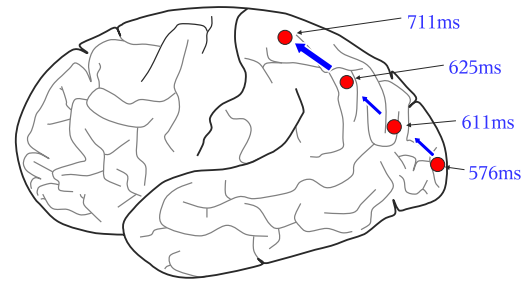


Fig. 13: Dorsal Visual Pathway

ので，前頭連合野におけるこれらの部位は錯視に大きく関与していると考えられる．

4. おわりに

本論文では，Biologically Inspired Model の一例として，脳神経，知覚，ロボティクスによるハイブリッドシステムを紹介した．具体的には，培養神経細胞とケセラからなる生体表現システムを構築しケセラの障害物回避の制御を用いて，培養神経細胞とケセラとの相互インタラクションを実現した．また，Aperture 実験における知覚認識率の線分速度に対する依存性，視覚誘発電位から脳内活動部位を推定した．

なお，本研究の一部は，文部科学省科学研究助成金「基盤研究 (C) 課題番号 18500181」および「基盤研究 (A) 課題番号 19200018」と「特定領域研究マルチスケール操作によるシステム細胞工学」課題番号 18048043 の助成を得た．また，北海学園大学ハイテク・リサーチ・センター研究プロジェクト「視覚・画像・音声・言語情報の高度化と知的計測制御技術への応用」の助成を得た．

参考文献

- [1] 銅谷 賢治: 脳の情報表現 ニューロン・ネットワーク・数理モデル, 朝倉書店 (2002)
- [2] 臼井 支朗: 脳・神経システムの数理モデル -視覚系を中心に, 共立出版 (1997)
- [3] M.A.Lebedev, J.M.Carmera, J.E.O'Doherty, M.Zacksenhouse, C.S.Henriquez, J.C.Principe, and M.A.L.Nicolelis: Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator

- controlled by a brain-machine interface, *Journal of Neuroscience*, Vol.25, No.19, pp.4681-4693 (2005).
- [4] S.N.Kudoh and T.Taguchi: Operation of spatiotemporal patterns stored in living neuronal networks cultured on a microelectrode array, *Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.8, No2, pp.100-107 (2003).
- [5] S.N.Kudoh, I.Hayashi, and T.Taguchi: Synaptic potentiation re-organized functional connections in a cultured neuronal network connected to a moving robot, *Proc. of the 5th International Meeting on Substrate-Integrated Micro Electrode Arrays (MEA2006)*, pp.51-52, Reutlingen, Germany in July 4-7 (2006).
- [6] S.N.Kudoh, T.Taguchi, and I.Hayashi: Interaction and intelligence in living neuronal networks connected to moving robot, *Proc. of 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE2006) in 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI2006)*, pp.6271-6275 (No.FUZZ4516), Vancouver, Canada in July 16-21 (2006).
- [7] I.Hayashi, T.Taguchi, and S.N.Kudoh: Biomodeling system by living neuronal network connected to moving robot, *Proc. of International Symposium on Artificial Brain with Emotion and Learning (ISABEL2006)*, pp.164-165, Seoul, Korea in August 24-25 (2006).
- [8] 林 勲, 田口 隆久, 工藤 卓: ラット海馬の培養神経細胞による小型ロボットとの生体表現システム, 第 22 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.561-562 (2006)
- [9] 工藤 卓, 林 勲, 田口 隆久: 神経細胞とシナプス可塑性, 知能と情報, Vol.18, No.3, pp.362-368 (2006)
- [10] D.J.Bakkum, A.C.Shkolnik, G.Ben-Ary, P.Gamblen, T.B.DeMarse, and S.M. Potter: Removing some 'A' from AI: Embodied cultured networks, in *Embodied Artificial Intelligence*, edited by F.Iida, R.Pfeifer, L.Steels, and Y.Kuniyoshi, New York, Springer, pp.130-145 (2004)
- [11] 林 勲, 古橋 武: ファジィ・ニューラルネットワーク, 朝倉書店 (1996)
- [12] M.B.ben-av, and M.Shiffrar: Disambiguating Velocity estimates across image space, *Vision Research*, Vol.35, No.20, pp.2889-2895 (1995).
- [13] J.Chey, S.Grossberg and E.Mingolla: Neural dynamics of motion grouping: from aperture ambiguity to object speed and direction, *Optical Society of America A*, Vol.14, No.10, pp.2570-2594 (1997).
- [14] C.C.Pack and R.T.Born: Temporal dynamics of a neural solution to the aperture problem in visual area MT of macaque brain, *Nature*, Vol.409, pp.1040-1042 (2001).
- [15] 仁科 繁明, 岡田 真人, 川人 光男: 輪郭運動方向の計算における充填過程と大局的バインディング, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会予稿集, NO.NC98-65 (1998)
- [16] M.Okada, S.Nishina and M.Kawato: The neural computation of the aperture problem: an iterative process, *Neuro Report*, Vol.14, No.14, pp.1767-1771 (2003).
- [17] 親泊 元太郎, 林 勲: Aperture 問題における輪郭運動方位と速度に対する知覚について, 第 18 回ファジィシステムシンポジウム講義論文集, pp.513-514 (2002)
- [18] I.Hayashi and J.R.Williamson: An analysis of aperture problem using fuzzy rules acquired from TAM network, *Proc. of 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE2002) in 2002 World Congress on Computational Intelligence (WCCI2002)*, pp.914-919 (2002).
- [19] I.Hayashi, and G.Shinpaku: Structuralization of early vision for perceptual grouping in Apertures, *Proc. of the International Workshop on Fuzzy Systems and Innovational Computing 2004 (FIC2004)*, pp.254-258 (2004).
- [20] 林 勲, 豊島 恒, 山ノ井 高洋: Aperture 問題に対する知覚認識計測と脳内活動部位の推定, 第 22 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.537-540 (2006)
- [21] 山ノ井 高洋, 豊島 恒, 山崎 敏正: 円の直線移動知覚に関する脳内処理部位の等価電流双極子推定, 第 21 回ファジィシステムシンポジウム講義論文集, pp.481-484 (2005)
- [22] T.Yamanoi, H.Toyoshima, and T.Yamazaki: Spatio-temporal dipole modeling of EEGs during perception of straight movements, *Proc. of 13th European Conference on Eye Movement*, pp.PA-178 (2005).
- [23] T.Yamazaki, K.Kamijo, A.Kenmochi, S.Fukuzumi, T.Kiyuna, Y.Takaki, and Y.Kuroiwa: Multiple Equivalent current dipole source localization of visual event-related potential during oddball paradigm with motor response, *Brain Topography*, Vol.12, No.3, pp.159-175 (2000).