

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18500181
 研究課題名（和文） ラット海馬培養細胞と小型ロボットの反応・制御系でのニューロモデル
 構成と知識獲得
 研究課題名（英文） Formulation and Knowledge Acquisition of Bio-closed-loop System by
 Cultured Neuronal Network of Rat Hippocampus Connected to Moving Robot

研究代表者
 林 勲 (HAYASHI ISAO)
 関西大学・総合情報学部・教授
 研究者番号：70258078

研究成果の概要：ラット海馬の分散培養神経細胞の活動信号によりロボットを制御する反応・制御系モデルを構成した。また、培養神経細胞に内在している反応の論理性と学習性について、その構造を知識化することに成功した。このモデルは学習型であるので、神経細胞と知能モデルによる協調的な相互学習が可能となり、環境変化に適応できるブレイン・コンピュータ・インタフェースの基礎技術として極めて有用である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	660,000	4,260,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネットワーク，知識獲得

1. 研究開始当初の背景

脳内の処理機能の詳細はまだ不明であるが、表層系から細胞レベルへのトップダウン処理と細胞レベルから表層系行動へのボトムアップ処理による閉回路が存在することは知られている。本研究では、ラット海馬から抽出した培養神経細胞と小型ロボット（ケペラ）により、学習型のトップダウン・ボトムアップ閉回路の生体表現システムを構築する

(1)Potterらは、培養神経細胞の反応を観測するため、反応信号によりロボットを制御する

簡易型ロボット・アニマトを提案している（The Neurally Controlled Animat: Biological Brains Acting with Simulated Bodies, T.B. Demarse, D.A. Wagenaar, A.W. Blau, and S.M. Potter, *Autonomous Robots*, Vol.11, pp.305-310, 2001）。しかし、単に培養神経細胞の反応をロボットに入力しただけであり、培養神経細胞と外界ロボットとの閉回路を構成しているとは言えない。

(2)共同研究者の工藤はラット海馬培養細胞を用いて神経細胞の情報処理機能の解明を研究しており（Robotic brain: interaction and intelligence in living neuronal

networks connected to moving robot, S. N. Kudoh, T. Taguchi, Proc. of SICE Annual Conference Okayama, 2568-2571, 2005), 培養細胞と小型ロボットの実験のための基幹技術を確立している。

(3)一方、学習により、ラット海馬培養細胞と小型ロボットとの制御関係を獲得する研究は稀であり、獲得された学習知識を用いて培養細胞への刺激と小型ロボットへの反応評価を研究している例はまだない。研究代表者の林は視覚系神経回路モデル TAM ネットワーク (TAM Network のブルーニング手法の提案, 林, Williamson, システム制御情報学会論文誌, 17(2), 81-88, 2004) に代表されるファジィ知識の研究を継続し、共同研究者の馬野は入出力データからのファジィ知識の獲得手法 (ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張-強化学習を用いた切り換え規則の獲得-, 藤丸, 馬野, 松本, 瀬田, 第 21 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 225-228, 2005) を提案している。さらに、共同研究者の福島は視覚系神経回路モデルであるネオコグニトロン (Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position, Biological Cybernetics, 36(4), 193-202, 1980) の提唱者として著名であり、知識獲得モデルの学習性向上に関与できる。

2. 研究の目的

本研究では、ボトムアップ処理には、小型ロボットが外界から受ける刺激 (障害物までの距離) を仮定し、トップダウン信号として、その刺激に対する培養細胞の反応を小型ロボットへ与える。これらの閉回路の入出力関係を知識獲得モデルの学習機能によってルール型知識として獲得する。

具体的には、次の研究目的にまとめることができる。

(1)生物とロボットとの結合による一体化を実現する。

ラット海馬培養神経細胞とケペラの小型ロボットを通信設備で結線し、トップダウン・ボトムアップ型の閉回路を実現する。

(2)知識モデルを用いて生物とロボットとのトップダウン・ボトムアップ処理を制御する。

知識獲得モデルによって、閉回路を制御する知識をファジィルールとして獲得する。また、ファジィルールの最適化を行い、ルールの優先度や入力属性の優先度も獲得する。

(3)獲得されたファジィ知識により、生物とロボットの再学習が可能となる。

洗練化された知識を用いて、培養細胞の反応特性を解明する。

3. 研究の方法

研究の手順を次に示す。

(1)ラット培養細胞とケペラとの接続経路の整備

①ラット海馬の神経細胞を培養する培養装置、培養皿に神経細胞を固定し 64 箇所 の活動電位を測定する多点電極装置を準備する。

②多点電極装置の出力をケペラの制御信号として入力するためのコンピュータを整備し、制御ソフト (LabVIEW8) により RC232C 経由での接続経路を確保する。

③ケペラのセンサ出力を培養細胞の刺激信号として入力するためのコンピュータを整備し、RC232C 経由での接続経路の整備を行う。

(2)ケペラ走行用迷路コースの整備

①ケペラの基本的な走行制御を実験するため、ケペラ走行用迷路コースを工作する。

(3)トップダウン・ボトムアップ閉回路の学習型ファジィ制御モデルの検討

①トップダウン・ボトムアップ閉回路の制御処理アルゴリズムとして、「学習型ファジィ制御による知識獲得モデル」を提案する。

②学習型ファジィ制御モデルを培養神経細胞からケペラへの入出力関係に介在させ、培養神経細胞の規則性を知識として獲得する。

③制御アルゴリズムのトップダウン処理では、64 電極で観測した培養神経細胞の反応の 8 電極を 1 入力にまとめて 8 入力として、ケペラの右と左の駆動輪の速度の 2 出力を制御する。

④ボトムアップ処理では、ケペラの前方のセンサ 8 入力を用いて培養細胞への刺激電極の 2 出力を制御する。

⑤すなわち、制御アルゴリズムでは、培養神経細胞に与える刺激はケペラからのセンサ情報であり、培養神経細胞はこの刺激入力に対して反応し、その反応をケペラに与えることにより、ケペラは走行する。

(4)ケペラの走行実験

①学習型ファジィ制御のプログラムを作成し、本格的な実験を開始する。

②ケペラ走行路として、全長 100mm、幅 90mm のコースを設置する。

③走行の目的は、ケペラが外壁に接近しても衝突することなく、直進させることとする。

(5)ケペラの走行評価と培養細胞の反応特性の解明

①ケペラを直進走行させるため、直進路との差異を評価値として、ファジィルールを調整する。

②走行実験を繰り返し、ファジィルールの前件部の適合度が高いルールを解析して、培養細胞の反応特性を解明する。

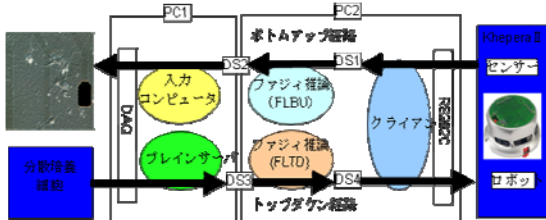
③培養細胞の反応特性をより顕著にするため、記録外液中のマグネシウムイオン量を変

化させ、走行の結果から培養細胞の可塑性を議論する。

④ファジィルールの適合度とケペラ走行の時間的経過による学習性から、培養細胞の可塑性を議論する。

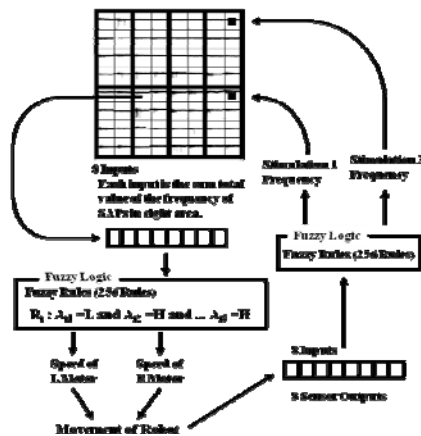
4. 研究成果

下図に、培養神経細胞とケペラとの閉回路の概要を示す。



ケペラから培養細胞へのボトムアップ処理では、Client がケペラの IR センサ情報を読み取り、データソケット DS1 を経由して、ファジィ推論ユニット (FLBU) により電流刺激の回数と刺激電極の位置を制御する。その後、Input Com と DAQ を介して 2 点の刺激電極を決定して、海馬培養神経細胞を電気刺激する。トップダウン処理では、DAQ を介して BrainServer が検出時間幅に出現した培養神経細胞の活動電位の頻度を DS3 に書き込む。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のアクチュエータの -20~+20 の速度を推論して、ケペラを制御する。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 1 出力で、Low と High の 2 種類ファジィラベルによる 512 個のルールを構成した (次図参照)。

ケペラの走行実験に先立ち、ファジィルールの初期設定を行う。ただし、培養神経細胞への過度の学習は損傷が起こる可能性があるため、事前に培養神経細胞の刺激シミュレータを用いてファジィルールの後件部を学習した。150 回の試行、合計 25 分間の学習で後件部実数値を得た。学習終了時でのファジィルールの一例を以下に示す。



R_1 : If I_1 is High and and I_8 is High then $Lspeed = 3$ and $Rspeed = 3$

R_2 : If I_1 is High and and I_8 is Low then $Lspeed = 7$ and $Rspeed = 3$

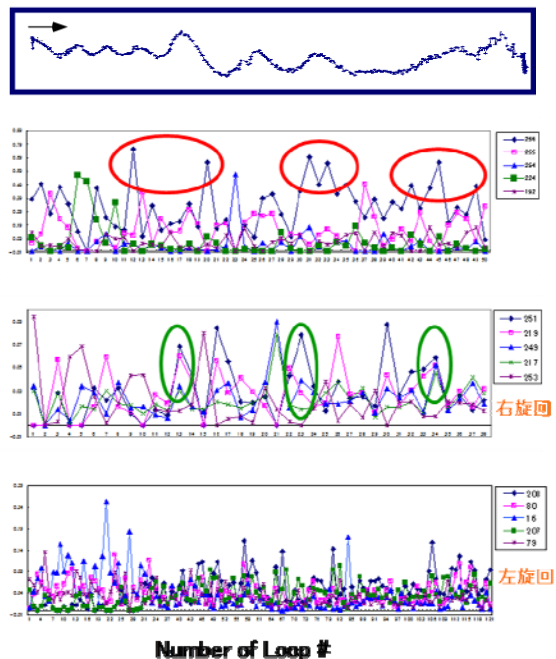
.....

R_{256} : If I_1 is Low and and I_8 is Low then $Lspeed = 1$ and $Rspeed = 1$

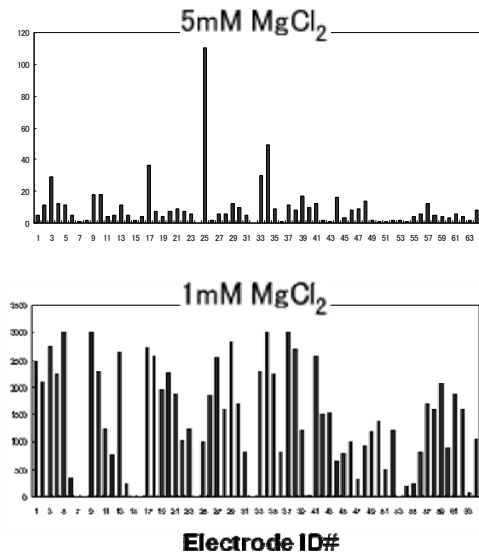
走行実験では、胚令 18 日、培養 34 日目の培養細胞を使用した。初期設定で獲得したファジィルールを固定し、ケペラを走行させて、時間的変化に対する直線路との差異の評価値と前件部の適合度の変化を測定した。



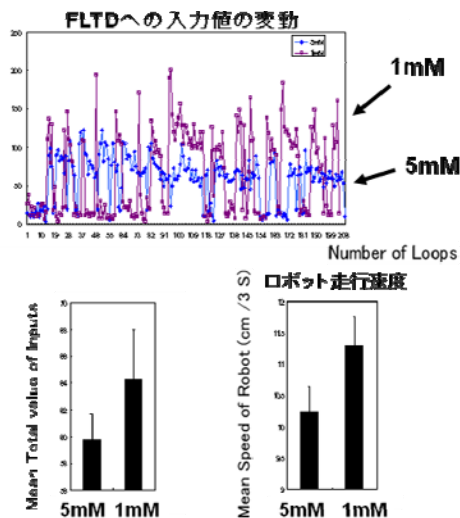
下図にケペラ走行の一例とその前件部適合度の変化を示す。ただし、平均適合度の高い 5 個のルールを表示した。例えば、“L 刺激”では、(219, 251, 217, 253) 番目のルール (図中の黒矢印) 及び (251, 219, 249, 217) 番目のルール (図中白矢印) が同時発火しており、ケペラの右旋回の行動を制御している。この組み合わせが数回出現することから、培養神経細胞が L 刺激に対して、同類な反応活動電位パターンを可塑的に発生していることがわかる。同様に、“R 刺激”に対しても、特徴的な傾向が見られた。一方、“SPT”に対しては、培養神経細胞は自発的な活動を繰り返し、内部状態の揺らぎをそのまま走行に反映して、適合度の分布もそれに対応してバリエーションが多かった。



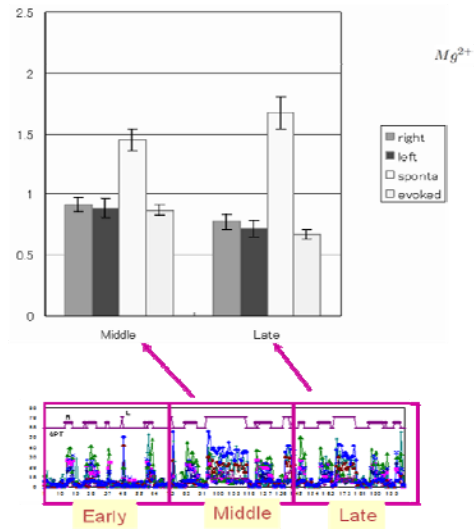
次に、培養神経細胞の記録外液のマグネシウムイオン濃度を变化させて走行実験を行った。記録外液中のマグネシウムイオン量を増大させると、神経結合の強度と自発的神経活動の頻度が減少する。マグネシウムイオン量を $MgCl_2$ 濃度の $1mM$ および $5mM$ とした。全ての電極において、マグネシウムイオン濃度が $1mM$ の記録外液下では、 $5mM$ の場合と比較して自発活動電位頻度が飛躍的に増大した（下図参照）。



また、 $1mM$ のマグネシウムイオン濃度では、電流刺激に誘導される刺激誘導活動電位も頻度が増大した（次図参照）。上図は時間変動に対するファジィ制御への8入力の変動である。左下図はその平均値である。入力値の値は $1mM$ マグネシウムイオン濃度の方が約 8%大きかった。また、これらの条件の違いを反映して、 $1mM$ マグネシウムイオン濃度ではロボットの走行速度が増大した(右下図)。



最後に、走行を初期 (E)、中期 (M)、後期 (L) の 3 区間に区分し、各区間での“L 刺激”，“R 刺激”，“SPT”における誘導活動電位頻度の変化を観測した。“L 刺激”と“R 刺激”は、時間方向に対する活動電位頻度のばらつきが減少するが，“SPT”は明確に変動しなかった。その後、数分程度において実験を行った場合、この差は初期状態に戻った。このことから、各入力信号が複数の神経細胞からの神経細胞の活動値であると仮定すると、この分散減少は出力合成器としての神経回路網がアンサンブル学習をおこなっていることを示唆する可能性がある。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) Biomodeling System - Interaction Between Living Neuronal Network and Outer World, Suguru N. Kudoh, Chie Hosokawa, Ai Kiyohara, Takahisa Taguchi, and Isao Hayashi, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.5, pp.592-600 (2007) 査読有
- 2) 再構成生体神経回路網における知覚と知性の探求, 工藤 卓, 田口 隆久, 知能と情報, Vol.18, No.3, pp.402-413 (2006) 査読有
- 3) ガボール型受容野をもつTAMネットワークの提案, 林 勲, ジェームズ R. ウィリアムソン, 知能と情報, Vol.18, No.3, pp.434-442 (2006) 査読有

[学会発表] (計 27 件)

- 1) ロボットを用いた生体神経回路網の身体性, 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 田口 隆久, 林 勲, 計測自動制御学会第 9 回システムインテグレーション部会

- 講演論文集, pp.1063-1064, 岐阜 (2008年12月7日) 査読無
- 2) A robust pattern of neuronal response to outer phenomena in "Vitroid", the hybrid neuro-robot, Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, and Isao Hayashi, Proc. of the Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2008), pp.269-274, Nagoya (2008年9月18日) 査読有
 - 3) ニューロ・ロボットにおけるin vitro学習, 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 田口 隆久, 林 勲, 第24回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.204-207, 松原 (2008年9月3日) 査読無
 - 4) Vitroid - a robot with link between living neuronal network in vitro and robot body, Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, and Isao Hayashi, Proc. of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2008), pp.WC3-5, Takamatsu (2008年8月6日) 査読有
 - 5) Neuronal Responses to Sensor Inputs in the Miniature Neuro-Robot Hybrid, Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Isao Hayashi, Chie Hosokawa, and Takahisa Taguchi, Proc. of the 6th International Meeting on Substrate-Integrated Micro Electrode Arrays (MEA2008), pp.33-36, Reutlingen (2008年7月10日) 査読有
 - 6) Vitroid—"試験管"としてのニューロ・ロボット ハイブリッド, 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 林 勲, 田口 隆久, 日本知能情報ファジィ学会, 北海道支部セミナー, 札幌 (2008年5月15日) 査読無
 - 7) Interaction between living neuronal network and outer world by programmable multisite stimulation system, Suguru N. Kudoh, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, and Isao Hayashi, Proc. of the 2007 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2007), pp.44-49, Nagoya (2007年11月13日) 査読有
 - 8) Recognition of perception and the localization for aperture problem in visual pathway of brain, Isao Hayashi, Hisashi Toyoshima, and Takahiro Yamanoi, Proc. of 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2007), pp.1872-1877, Montreal (2007年10月8日) 査読有
 - 9) エンタテインメントとしてのバイオ・ロボティクスハイブリッド, 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 田口 隆久, 林 勲, 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング研究会, エンタテインメントコンピューティング2007(EC2007), pp.243-246, 大阪 (2007年10月3日) 査読無
 - 10) Learning and Memory in Living Neuronal Networks Connected to Moving Robot, Isao Hayashi, Takahisa Taguchi, and Suguru N. Kudoh, Proc. of 8th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2007), Invited Talk, pp.79-81, Sokcho (2007年9月8日) 査読有
 - 11) 生体表現システム: ファジィ推論を用いた培養神経細胞における適応学習の解析, 林 勲, 徳田 農, 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, 第23回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.565-570, 名古屋 (2007年8月30日) 査読無
 - 12) 培養神経細胞による外界認知の試み, 清原 藍, 工藤 卓, 徳田 農, 細川 千絵, 田口 隆久, 林 勲, 第17回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp.123-128, 名古屋 (2007年8月10日) 査読無
 - 13) 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, 山ノ井 高洋, 工藤 卓, 第17回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集(特別講演), pp.1-6, 名古屋 (2007年8月10日) 査読無
 - 14) Recognition of Cracks on Concrete Structures Using Evolutional Image Processing, Michiyuki Hirokane, Isao Hayashi, Hitoshi Furuta, H.Takiuchi, and I.Nakajima, Proc. of the 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP10), TM6-4, Tokyo (2007年8月1日) 査読有
 - 15) 内挿ベクトルを用いる強力なパターン認識法, 福島 邦彦, 林 勲, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング (NC) 研究会発表論文集, No.NC2006-171, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.589, pp.105-110, 東京 (2007年3月14日) 査読無
 - 16) 生物・ロボティクス・ハイブリッドによ

- る認知エージェントを目指して一分散培養系の中にエージェントは芽生えるか?—, 工藤 卓, 清原 藍, 林 勲, 田口 隆久, 第2回認知エージェント研究会講演論文集・電気学会研究会資料, No.GID-06-1, pp.1-4, 福井 (2006年12月19日) 査読無
- 17) 生体神経細胞を用いた半人工神経回路網の環境応答, 工藤 卓, 清原 藍, 林 勲, 鈴木 正昭, 山口 宗宏, 田口 隆久, 第21回生体・生理工学シンポジウム講演論文集, Vol.1C1-5, pp.131-134, 鹿児島 (2006年11月19日) 査読無
- 18) Operation of Network Dynamics in Cultured Hippocampal Neurons on a Multi-electrode Array, Suguru N. Kudoh, Isao Hayashi, and Takahisa Taguchi, Proc. of the 2006 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2006), pp.200-204, Nagoya (2006年11月6日) 査読有
- 19) Structure Evaluation of Receptive Field Layer in TAM Network, Isao Hayashi and Toshiyuki Maeda, Proc. of 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2006), pp.1541-1547, Taipei (2006年10月9日) 査読有
- 20) Biologically Motivated Systems: A Fuzzy System for Living Neuronal Networks and Early Vision of Brain, Isao Hayashi, Takahiro Yamanoi, and Suguru N. Kudoh, Proc. of the Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2006), Invited Talk, pp.1636, Tokyo (2006年9月23日) 査読有
- 21) 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, 林 勲, 田口 隆久, 工藤 卓, 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, 札幌 (2006年9月7日) 査読無
- 22) TAMネットワークの受容野構造における機能比較, 林 勲, 福島 邦彦, 第22回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.547-548, 札幌 (2006年9月7日) 査読無
- 23) Aperture問題に対する知覚認識計測と脳内活動部位の推定, 林 勲, 豊島 恒, 山ノ井 高洋, 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, 札幌 (2006年9月7日) 査読無
- 24) Biomodeling System by Living Neuronal Network Connected to Moving Robot, Isao Hayashi, Takahisa Taguchi, and Suguru N. Kudoh, Proc. of International Symposium on Artificial Brain with Emotion and Learning (ISABEL2006), pp.164-165, Seoul (2006年8月25日) 査読有
- 25) Interaction and Intelligence in Living Neuronal Networks Connected to Moving Robot, Suguru N. Kudoh, Takahisa Taguchi, and Isao Hayashi, Proc. of 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE2006) in 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI2006), pp.6271-6275 (FUZZ4516), Vancouver (2006年7月19日) 査読有
- 26) Synaptic Potentiation Re-organized Functional Connections in a Cultured Neuronal Network Connected to a Moving Robot, Suguru N. Kudoh, Isao Hayashi, and Takahisa Taguchi, Proc. of the 5th International Meeting on Substrate-Integrated Micro Electrode Arrays (MEA2006), pp.51-52, Reutlingen (2006年7月5日) 査読有
- 27) 環境と相互作用するラット海馬神経細胞分散培養系, 工藤 卓, 林 勲, 田口 隆久, 電気学会, 電子・情報・システム部門, 医用・生体工学研究会, MBE-06-32, 東京 (2006年4月21日) 査読無

[その他]

ホームページ等

http://www.kansai-u.ac.jp/Fc_inf/tp/staff/s_ihaya.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 勲 (HAYASHI ISAO)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号：70258078

(2) 研究分担者

馬野 元秀 (UMANO MOTOHIDE)

大阪府立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10131616

福島 邦彦 (FUKUSHIMA KUNIHICO)

関西大学・総合情報学部・学外共同研究者

研究者番号：90218909

(3) 連携研究者

工藤 卓 (KUDOH SUGURU)

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：10344110