脳－機械直接通信型インターフェイス・システムに関する研究開発（031507001）

Development of Brain-Machine Interface Systems

櫻井　芳雄　京都大学大学院文学研究科
Yoshio Sakurai, Graduate School of Letters, Kyoto University

青柳　富誌生
Toshio Aoyagi
京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Information Sciences, Kyoto University

研究期間　平成 15 年度～平成 17 年度

概要

本研究の目的は、脳の高次でダイナミックな情報処理能力を検出し、その神経情報により機械を直接制御するという、全く新しいタイプのインターフェイス・システムを作製することである。具体的には、まず学習課題を行っている動物の海馬等の脳活動を、神経細胞集団（マルチニューロン）の同時計測により測定する。次にその測定信号を情報理論や神経回路網理論を活用し解析することで、神経細胞集団の活動に表れる意味ある神経情報を抽出し、それを機械制御信号に変換し機械出力部分へ入力する。そして、脳の最大の特性である認識や判断能力に基づき機械出力を直接操作する。本プロジェクトの３年間で、このような脳と機械を直接つなぐシステムを作製し動作させることに成功した。

Abstract

The present research project aimed to detect and use higher and dynamic features of information processing of the working brain by constructing a brain-machine interface (BMI). We therefore developed a system to record and analyze multi-neuronal activities of the hippocampus and other brain regions of the animal when it was performing behavioral tasks. Then we detected significant neuronal codes from the recorded multi-neuronal activities to control machine-outputs instead of the animal's body-outputs to perform the behavioral tasks correctly. In the period of project, we have demonstrated that our recording and analyzing system can construct a BMI system which has a possibility to directly use dynamic information processing of the brain.

１．まえがき

本研究の目的は、現在の脳神経科学とシステム情報工学を協調させ研究することにより、全く新しいタイプの脳－機械直接通信型のインターフェイス・システムを作製することである。具体的には、動物の脳神経活動を多数の神経細胞集団の同時計測により検出し、その解析から意味ある神経情報を抽出し、それを制御信号に変換し機械出力を直接操作する。そして、脳の情報処理の最大の特性である認識や判断の能力に基づき機械を操作することをめざす。

２．研究内容及び成果

内容

1 年目：動物（ラット）の学習課題用の装置をセットアップした。これはいくつかの刺激をラットに提示し、あらかじめ決められた正刺激に対し反応させる課題であるが、1 年目の前半にさらなる情報収集と試験的実験を行い、刺激提示や反応検出の詳細なパラメーターを決定した。またマルチニューロン活動記録をより向上させるための技術開発も行った。マルチニューロン活動の記録では、特殊電極であるテトロード電極と専用マイクロドライブをさらに改良し、コンパクトで耐ノイズ性の高い新たな前置増幅システムも作製した。一方、インターフェイスの基本設計にも取り組み、ソフトウエア開発の準備も進めた。

2 年目：本格的な研究をスタートした。具体的には、(1) ラットに刺激選択課題を学習させた。(2) 課題を学習させながら、その海馬の神経細胞集団の活動を、マルチニューロン活動記録法により長時間にわたり記録した。(3) マルチニューロン活動を解析するため、独立成分分析に基づく専用フィルタシステムを作製し、個々のニューロン活動を正確にリアルタイムで分離した。(4) 記録した個々のニューロン活動の変化と、それらニューロン間の機能的連関（相互作用）のパターンを同時かつ瞬時に解析し、特定の活動パターンを検出するシステムを開発した。(5) 特定の活動から神経情報を検出するため、シミュレーションに基づく理論的研究も進めた。

3 年目：2 年目に引き続き実験をさらに進展させる。具体的には、(1) リアルタイムで検出したマルチニューロン活動の特定のパターンを制御信号に変換して機械出力を操作し、ラットの動作による反応の代わりに用いるようにした。そして、主に海馬の神経情報で機械出力を操作することにより、ラットが動作で反応するよりも早く機械の出力が正しい反応をするようにした。(2) 刺激の認識や判断に関わる神経情報を検出しインターフェイスに送り込むことで、ラットが刺激を正しく認識し判断した時点で、出来るだけ早く機械出力を操作し反応させることを目指した。

主な成果

1：動物（ラット）の学習課題の種類を決め、その装置を完成させた。また、課題に用いる刺激のパラメーターを動物の予備訓練から決定し学習させることができた。

2：BMI の基幹部分となるマルチニューロン活動を自動的かつリアルタイムに計測する新たなシステム RASICA（Realtime and Automatic Sorting with ICA）を開発した（図 1）。RASICA は、ニューロン活動収録モジュール、特殊電極、マイクロドライブ、ニューロン活動解析モジュール、から構成されている。

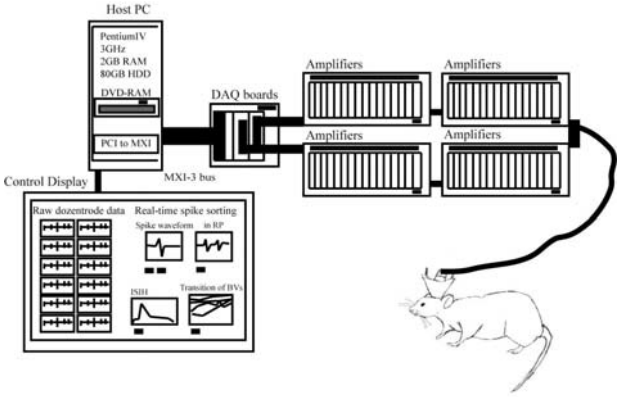

図 1　RASICA（Takahashi & Sakurai, 2005 より）

3：RASICA を中心として、そこへ理論的研究から意義が明らかになった同期発火を検出できるシステムをつなぎ、さらに学習課題のシステムを接続することで、BMI の全体システムを構築した（図 2）。

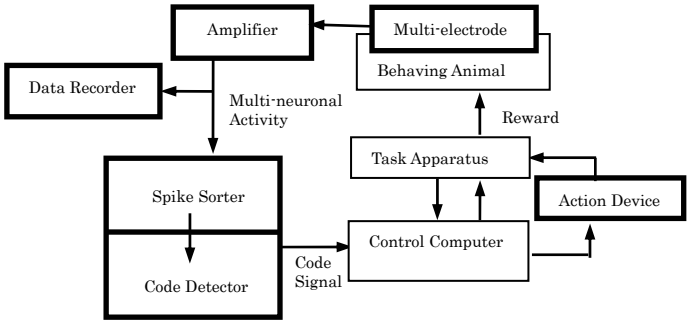

図 2　BMI の全体システム図
（太枠が RASICA に相当）

4：BMIのインターフェイス設計に有用な理論モデルを構築した。すなわち、神経細胞集団の発火パターンから意味ある神経情報を検出する神経回路モデル、神経細胞の発火パターンと回路網全体の活動との関連を記述する神経回路モデル、複数の神経細胞の発火パターンからラットの行動を予測する計算モデルを、実験データの解析とシミュレーションにより作り上げた。

5：BMI システムが実際に動作することを確認し、それに合わせ脳活動も急速に変化することがわかった。

３．むすび

本研究により、BMI 用の技術を確立し、実験用の BMI システム全体を完成させ動作させることができた。またその BMI システムにつながることで、脳の神経活動が大きく変化することもわかった。今後は BMI の実用化を目指す予定である。そのためには、出力用ロボットアーム等の構築を進めたい。また同時に、BMI につながることで脳がどのように変化するかについても、神経科学的研究により明らかにしていきたい。特に、脳が変化していく実態を明らかにすることは重要であり、その解明なしには BMI の実用化は不可能であると考えている。

実用可能な BMI システムが完成すれば、情報通信技術を応用する多方面への波及効果があるが、特に医学界と産業界での有効性は大きい。例えば、BMI システムにさらに医学的研究を付加し、その安全性を確立することにより、脊髄損傷などにより四肢が麻痺した人達に健常者と同等の動作を提供する情報通信システムとして活用できる。特に本研究室で進めている BMI システムは、運動出力に関する神経情報を用いるだけでなく、世界的にも例のない学習による認識や判断を表現する神経情報をも活用するシステムである。つまり脊髄損傷のみならず、脳出血等により脳の運動関連部位自体を損傷した人達にも、十分活用できるものとなる。

また産業面に関しては、BMI システムの技術により、脳の高次な認識・判断機能を備えた産業用ロボットの製作も可能となるはずである。そして、これら医学的応用と産業的応用をさらに結びつけることで、脳の高次でダイナミックな活動を直接反映する情報通信機構を備えた、いわば人間と直結した介護医療システムを構築できると考えている。

【誌上発表リスト】

[1] Takahashi, S. and Sakurai, Y.、 “Real-time and automatic sorting of multi-neuronal activity for sub-millisecond interactions in vivo.” Neuroscience, Vol.134, pp301-315,（2005）

[2] Aoyagi, T., Aoki, T.、”Possible Role of Synchronous Input Spike Trains in Controlling Function of Neural Networks” 、 Neurocomputing, Vol.58, pp259-264（2004）

[3] Takahashi, S., Anzai, Y., and Sakurai, Y.、 “Automatic sorting for multi-neuronal activity recorded with tetrodes in the presence of overlapping spikes.”、Journal of Neurophysiology, Vol.89, pp2245-2258, (2003)

【申請特許リスト】

[1] 櫻井芳雄・高橋晋、スパイクソーティング装置・スパイクソーティング方法・スパイクソーティングプログラムおよび記録媒体、日本、2005 年 3 月 30 日

[2] 櫻井芳雄・高橋晋、スパイクソーティング装置・スパイクソーティング方法・スパイクソーティングプログラムおよび記録媒体、日本、2005 年 4 月 15 日

[3] 青柳富誌生・青木高明、SOM ニューラルネット学習制御装置、日本、2005 年 8 月 18 日