

Seiichi Teshigawara, Kenjiro Tadakuma, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Shimojo	High Speed and High Sensitivity Slip Sensor Utilizing Characteristics of Conductive Rubber-Relationship Between Shear Deformation of Conductive Rubber and Resistance Change-	Journal of Robotics and Mechatronics	21 (2)	200-208	2009
Teshigawara, S.; Tadakuma, K.; Ming, A.; Ishikawa, M.; Shimojo, M.	Development of high-sensitivity slip sensor using special characteristics of pressure conductive rubber	2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)		3289-3294	2009
Seiichi Teshigawara, Satoru Shimizu, Kenjiro Tadakuma, Ming Aiguo, Masatoshi Ishikawa and Makoto Shimojo	High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber	Int. Conf. on SENSORS 2009		988-991	2009
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	ラットカーシステムを用いた運動皮質における可塑的な機能変化抽出の試み	第3回 Motor Control 研究会論文集			2009
鈴木隆文, 矢口博彬, 伊藤孝佑, 満洲邦彦, 國本雅也	速順応型機械受容ユニットへの微小刺激により生成される振動感覚に関する検討	第22回ニューロプログラム研究会論文集		3	2009
伊藤孝佑, 山崎博人, 鈴木隆文, 満洲邦彦	カフ電極による末梢神経信号データの逐次的信号弁別	日本神経回路学会第19回全国大会論文集		86-87	2009
Takafumi Suzuki	Development of flexible neural probes and their applications to neuroprostheses	2nd UK-Japan Workshop on the Brain-Machine Interface		12	2010
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	発火確率モデルを用いた無入力条件下での培養神経細胞ネットワークの結合強度解析	電気学会医用・生体工学研究会		65-70	2010

矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	2点での腱振動刺激によって生成される運動感覚に関する基礎的研究	電気学会医用・生体工学研究会		61-64	2010
鈴木隆文, 橘秀幸, 戸高貴文, 古川浩太郎, 満洲邦彦	針筋電信号による指の動作推定 (末梢神経信号による義手制御を目指して)	日本機械学会第22回バイオエンジニアリング講演会論文集		182	2010
伊藤孝佑, 山崎博人, 鈴木隆文, 満洲邦彦	末梢神経接続による運動機能代行に向けて ~ラット坐骨神経信号からの運動情報抽出と下肢運動推定の試み~	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集			2010
深山理, 小濱卓也, 鈴木隆文, 満洲邦彦	車体型BMI「ラットカー」を用いた運動皮質における可塑的变化の検出と誘導	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集			2010
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	発火確率モデルを用いた神経細胞ネットワーク構造の動的推定法-培養神経細胞に対する試験的解析	脳と心のメカニズム第10回冬のワークショップ論文集			2010
橘秀幸, 鈴木隆文, 満洲邦彦	針筋電信号と単収縮量み込みモデルによる手指筋の等尺性収縮時張力の推定	電気学会論文誌C	130(2)	254-260	2010
五條理保, 森本雄矢, 竹内昌治	簡易マイクロデバイス作製法	生物物理	287	50-51	2010
A. Matani, Y. Naruse, T. Hayakawa, T. Nogai, Y. Terazono, N. Fujimaki, T. Murata	Phase-related Phenomena in MEG Analyzed by Phase-compensated Averaging	Abstracts of the 17th International Conference on Biomagnetism	W-I	T4-22	2010
石川正俊	センサ技術とネットワーク技術の真の融合はあるのか? 解くべき問題は何か? (基調講演)	ユビキタス・センサネットワークシンポジウム (東京, 2010.1.26) / 予稿集		1-4	2010

Makoto Shimojo, Takuma Araki, Aigou Ming, and Masatoshi Ishikawa	A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces	IEEE SENSORS JOURNAL	Vol.10, No.4	822-830	2010
A. Matani, Y. Naruse, Y. Terazono, T. Iwasaki, N. Fujimaki, and T. Murata	Phase-compensated Averaging for Analyzing Electroencephalography and Magnetoencephalography Epochs	IEEE Trans. on Biomedical Engineering	vol. 57, no. 5	1117-1123	2010
溝口善智, 多田隈建二郎, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	近接・触・すべり覚を統合したインテリジェントロボットハンドの開発	計測自動制御学会論文集	Vol.46, No.10	632-640	2010
Yuki Hoashi, Yasutaka Yamamizu, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, Kunihiko Mabuchi and Hiroyuki Ishigaki	Estimation of Finger Joint Angle Based on Surface EMG Signals and its Signal Source Recognition	ICIC Express Letters	Vol.4, No.6(A)	2183-2188	2010
勅使河原誠一, 堤隆弘, 清水智, 鈴木陽介, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	高速・高感度型すべり覚センサの研究開発ー多指ロボットハンドへの応用ー	第28回ロボット学会学術講演会／予稿集		201-205	2010
清水智, 勅使河原誠一, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	高感度初期滑り検出センサの研究開発ー感圧ゴムの種類と被覆材の検討	日本機械学会ロボテイクス・メカトロニクス講演会2010 (ROBOMECH 2010)／講演会論文集		1A1- D02	2010
大野紘明, 渡辺義浩, 小室孝, 石川正俊, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	姿勢と筋活動を提示するシンクロナイズドビデオ	第15回日本バーチャルリアリティ学会大会抄録集		444-447	2010

Hasegawa, H.; Mizoguchi, Y.; Tadakuma, K.; Aiguo Ming; Ishikawa, M.; Shimojo, M	Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing	2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)/Proceedings	777-784	2010
Teshigawara, S.; Shimizu, S.; Tsutsumi, T.; Suzuki, Y.; Ming, A.; Shimojo, M.; Ishikawa, M.	High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber for Dexterous Grasp and Manipulation	2010 Ninth IEEE Sensors Conference (SENSORS 2010) /Proceedings	570-574	2010
Tatsuya Haga, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Stochastic estimation of synaptic changes evoked by electrical stimuli in neural network in vitro	第49回日本生体医工学会大会論文集	48 suppl.1	2010
Hiroaki Yaguchi, Kazuki Togawa, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	A basic study of kinesthetic feedback by tendon vibration for prosthetic arms	第49回日本生体医工学会大会論文集	48 suppl.1	2010
柴本浩児, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	慢性神経信号計測に向けた針型電極の自動位置制御の基礎的検討	第49回日本生体医工学会大会論文集	48 suppl.1	2010
Osamu Fukayama, Takuya Kohama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Study on detection and induction of plastic changes in rat brain while connected with a vehicular BMI RatCar	第49回日本生体医工学会大会論文集	48 suppl.1	2010

Naoki Kotake, Takafumi Suzuki, Osamu Fukayama, Shoji Takeuchi, Kunihiko Mabuchi	Development and characterization of flexible L-glutamate biosensor	第49回日本生体医工 学会大会論文集		48 suppl.1	2010
Yutaro Kobayashi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Estimation of finger movements by electromyographic signals with external triggers for playing trumpet	第49回日本生体医工 学会大会論文集		48 suppl.1	2010
吉田 充宏、浮 田 芳昭、満 洲 邦彦、内海 裕 一	多層配線構造を有する神経再 生型電極の開発	第22回化学とマイク ロ・ナノシステム研究 会 (CHEMINAS) 抄 録集		52	2010
吉田 充宏、浮 田 芳昭、満 洲 邦彦、内海 裕 一	多層配線構造を有する神経再 生型電極の作製	ナノ学会第8回大会 8th Annual Meeting of Society of Nano Science and Technology / 講演予 稿集		231	2010
矢口博彬, 深山 理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	腱振動刺激によって錯覚され る運動の速度に関する研究	第2回多感覚研究会抄 録集		12	2010
鈴木隆文	次世代義手のための基盤技術 ～人工感覚・神経情報による 制御・神経電極～	第48回日本人工臓器 学会大会抄録集		S-28	2010
S. Kuroki, J. Watanabe, K. Mabuchi, S. Tachi, S. Nishida	Neural representation of motion signal after direction remapping in touch: Evidence from motion aftereffect	Neuroscience2010/Pr oceedings			2010

Osamu Fukayama, Takafumi Suzuk, Kunihiko Mabuchi	Correlation induction between cortical extracellular spikes pattern and locomotion states by microstimulation for a BMI control	Neuroscience2010/Proceedings			2010
Takafumi Suzuki, Naoki Kotake, Osamu Fukayama, Shoji Takeuchi, Hidenori Watanabe, Tadashi Isa, Hirohito Sawahata, Haruo Toda, Isao Hasegawa, Kunihiko Mabuchi	Improvement of a flexible Parylene ECoG electrode for long-term stable recording	Neuroscience2010/Proceedings			2010
新納弘崇, 下条誠, 國本雅也, 鈴木隆文, 石川正俊, 矢口博彬, 満洲邦彦	末梢神経障害による感覚障害に対するマイクロステイミュレーション法を用いた感覚補填・感覚強化システムモデルの構築	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		3	2010
満洲邦彦, 新納弘崇, 國本雅也, 鈴木隆文, 矢口博彬, 下条誠	SA-I mechano-receptive units の圧一発火特性に関する検討 - preliminary study -	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		3	2010
鈴木隆文, 矢口博彬, 伊藤孝佑, 満洲邦彦, 國本雅也	速順応型機械受容ユニットへの微小刺激により生成される振動感覚の周波数特性に関する基礎的研究	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		2	2010
高山祐三, 森口裕之, 小谷潔, 鈴木隆文, 満洲邦彦, 神保泰彦	分化誘導神経回路と初代培養神経回路の共培養系における機能的結合の形成	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010

藤原正浩, 芳賀達也, 鈴木隆文, 満洲邦彦	培養神経細胞を用いた刺激パターン _{の学習に関する研究} — 高頻度電気刺激によるスパイク発火頻度の時間的分布変化を用いた学習—	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
芳賀達也, 深山里, 鈴木隆文, 満洲邦彦	Multi-Electrode-Array Dish上の培養神経細胞ネットワークのリアルタイム結合推定・可視化システムの構築	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
荒木望, 帆足勇希, 小西康夫, 満洲邦彦, 石垣博行	表面筋電信号ヒストグラムによる複数指関節角度推定・ベイズアンフィルタによる動作指識別に基づいた手法	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
黒木忍, 渡邊淳司, 満洲邦彦, 舘暉	触運動知覚の刺激周波数による違い	日本バーチャルリアリティ学会第15回大会論文抄録集			2010
Kunihiko Mabuchi, Hirotaka Niiro, Masanari Kunimoto, Takafumi Suzuki, Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo	Development of a Wearable Sensory Prosthetic Device for Patients with Peripheral Neural Disturbances	Proc. of IFESS2010 (15th Annual Conference of the International FES Society)	309-311		2010
Hiroaki Yaguchi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Effects of simultaneous vibrations to two tendons on the velocity of induced illusory movement	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS	5851-5853		2010

Yutaro Kobayashi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Estimation of finger postures to control a manifold device for playing a trumpet using electromyographic signals with external triggers	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS		5847-5850	2010
Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	RatCar: A vehicular neuro-robotic platform for a rat with a sustaining structure of the rat body under the vehicle	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS		4168-4171	2010
Riho Gojo, Harukazu Saito, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Optimizing the diameter of holes for flexible regeneration microelectrode	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS		1531-1534	2010
Kunihiko Mabuchi	Linking human nervous system with mechanical control system of next-generation artificial organs	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
新納弘崇, 國本雅也, 鈴木隆文, 満洲邦彦, 下条誠	感覚神経系障害患者のためのウェアラブル感覚補填・感覚強化システムの開発	ROBOMECH2010抄録集		2A1-D13 (1)-(2)	2010
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	運動皮質における可塑的な機能変化の観測・誘発技術を用いたBMIポート形成の試み	第4回Motor Control研究会抄録集		38-39	2010
斎藤治和, 満洲邦彦, 鈴木隆文, 五條理保, 池上博康	運動機能と感覚機能を備えた義手開発のための末梢神経再生型電極に関する研究 - 免疫組織学的検討	第53回日本手の外科学会学術集会抄録集			2010
斎藤治和, 満洲邦彦, 鈴木隆文, 五條理保, 池上博泰	運動および感覚機能を備えた義手開発のための末梢神経再生型電極に関する研究 - 至適電極孔径の検討 -	日本整形外科学会雑誌 第25回日本整形外科学会基礎学術集会抄録集	Vol. 84, No. 8	S1321	2010

A. Matani, Y. Naruse, Y. Terazono, N. Fujimaki, and T. Murata	Phase-interpolated Averaging for Analyzing Electroencephalography and Magnetoencephalography Epochs	IEEE Trans. on Biomedical Engineering	vol. 58, no. 1	71-80	2011
眞溪歩	脳波の共振現象とエポックフィルタ	電気学会論文誌C	vol. 131, no. 1	9-14	2011
山川雄司, 並木明夫, 石川正俊	高速多指ハンドシステムによる面状柔軟物体の動的操り	第16回ロボティクスシンポジウム/講演論文集		506-511	2011
吉田充宏, 廣瀬義人, 浮田芳昭, 満洲邦彦, 内海裕一	多層配線可能な神経再生型電極の作製	エレクトロニクス実装学会春季講演大会論文集		345-346	2011
Mitsuhiro Yoshida, Yoshito Hirose, Yoshiaki Ukita, Kunihiko Mabuchi, Yuichi Utsumi	Proposal of stacked electrodes for multiplex neural interface	ICEP2011 International Conference on Electronics Packaging/アブストラクトCD		968-971	2011
柴本浩児, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	神経信号の信号強度最大化に向けた赤外線送信による電極位置の自動制御	電気学会医用・生体工学研究会抄録集		19-23	2011
荒木 望, 帆足勇希, 小西 康夫, 満洲 邦彦, 石垣 博行	ベイジアンフィルタを用いた表面筋電信号からの動作指識別手法	電気学会論文誌C	Vol. 131, No. 4	736-741	2011.04
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	外骨格構造を有する神経-車体制御インタフェース「ラットカー」によるラット歩行補助に関する検討	第50回日本生体医工学学会大会論文集	49 suppl.1		2011.04.29-05.01
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	事前知識を必要としないスパイクソーティング手法の開発	第50回日本生体医工学学会大会論文集	49 suppl.1		2011.04.29-05.01

大塚博, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	ラット末梢神経系の運動指令信号を用いた歩行状態模倣ロボットの開発	電気学会医用・生体工学研究会抄録集		7-11	2011/05/12
満洲邦彦	末梢神経感覚線維の電気刺激による人工感覚の生成とその応用	第4回日本ニューロモデュレーション学会抄録集		13	2011.05.21
荒木 望, 帆足勇希, 小西 康夫, 満洲 邦彦, 石垣 博行	義手の運動制御のための生体信号からの手指関節角度推定—表面筋電信号と針筋電信号を中心とした 信号源の違いによる処理方法の検討—	日本機械学会ロボテイクス・メカトロニクス講演会 2011 抄録集		2P1-H13	2011.05
新納弘崇, 荒木望, 國本雅也, 帆足勇希, 鈴木隆文, 深山理, 満洲邦彦, 下条誠	感覚神経線維刺激を用いた義手への感覚提示機能の実装に関する研究	日本機械学会ロボテイクス・メカトロニクス講演会 2011 抄録集		2P1-O16	2011.05.28

IV. 研究成果の刊行物・別刷

平成 20 (2008) 年度

第19章 ブレインマシンインタフェース

満洲邦彦*

1 ブレインマシンインタフェース—その定義と用語—

近年、生体の神経系と機械系の情報ラインを神経電極などで接続し、相互に入出力を行う事によって、生体の神経系の情報で義手や義足などの外部機器を操作したり、逆に外部機器のセンサ類によって検出した物理的・化学的刺激情報に従って、生体の感覚神経系を刺激してやる事により、人工的に視覚や聴覚などの特殊感覚や体性感覚などの感覚を人工的に作り出してやろうとする研究が進み、これらのシステムは、「脳と機械系を繋ぐ」、あるいは、「脳とコンピュータを繋ぐ」などという意味から、Brain-machine

interface (BMI)、あるいはBrain-computer Interface (BCI) などと呼ばれているが(図1)、これらの言葉の定義に関しては、現時点では、まだ明確には確立されていない面がある。初期の研究は、Locked-in syndrome (閉じ込め症候群) や Amyotrophic lateral sclerosis (筋萎縮性側索硬化症: ALS) などにより重度に随意運動が障害された患者さんが、脳波などの非侵襲的な手法で計測した脳機能を用いてコンピュータのカーソルなどを操作し、自分の意志を伝達できるようなシステムを開発しようと言う事から始まっており、文字通りコンピュータを操作する事を主目的としていたので Brain-computer Interface (BCI) と呼ばれたが、現在では、このBCIという言葉は、Electroencephalography (脳波: EEG) や Magnetoencephalography (脳磁図: MEG), Near

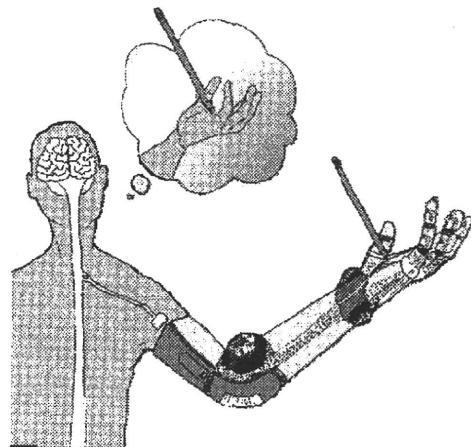


図1 Brain-machine Interface (BMI)

Brain-machine Interface (BMI) は、生体の神経系 (脳や末梢神経系) と外部機器の情報ラインを直接接続し、相互に入出力を行う事によって、生体の神経系の情報で義手などの外部機器を操作したり、逆に外部機器のセンサ類によって検出した物理的・化学的刺激を生体の感覚神経系を刺激してやる事により、人工的に視覚や触・圧覚などの感覚を人工的に作り出してやろうとするシステムである。

* Kunihiro Mabuchi 東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻 教授

Infrared spectroscopy (近赤外分光法：NIRS) や functional MRI (機能的MRI：fMRI) などの非侵襲的な計測法を用いて神経系（脳）の活動情報を取得し、その情報を用いて外部機器一般を操作するシステムに対して用いられている。これに対して、Brain-machine interface (BMI) という言葉は、BCI と対比させて狭義的に用いられる場合は、観血的・侵襲的な外科手術的手段によって神経系（脳）に電極を刺入、あるいは留置することにより、神経系との間で情報を入出力するシステムに対して用いられている。しかしながら、非侵襲的な手法も含め、脳と外部機器との間で情報の入出力を行うデバイス全般を広義的に BMI という言葉で呼ぶ場合も多い。

また、脳 (brain) ではなく、末梢神経系において情報の入出力を行うシステムもあるが、一般的にはこれらも BMI と呼ばれる事が多く、研究者によっては、このようなシステムを一般的に包含して、「神経-機械インタフェース」や「神経インタフェース」などと呼んだり、あるいは、非侵襲型の神経活動計測手法を組み合わせたシステムをブレインネットワーク・インタフェースなどの言葉で呼んだりしている。

一方、脳や神経系を含む運動系器官や各種臓器などを電気刺激する事によって、筋肉を収縮させたり、臓器機能を賦活化させたりして、運動麻痺やその他の疾患の治療を行おうとする手法があり、これらは、機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation：FES)、あるいは、治療的電気刺激 (Therapeutic Electrical Stimulation：TES) などと呼ばれているが、その中で神経系の刺激を行うものに関しては、Neuromodulation などと呼ばれている (日本語でも、そのまま「ニューロモデュレーション」と呼んでいる)。この範疇に入るものとして、脳の深部に電極 (リード) を刺入し、高頻度の電流刺激を加える事により不随意運動などを抑制する脳深部刺激療法 (Deep brain stimulation) があり、1980年代から広く行われるようになってきているが、これらも BMI に含まれる事がある。また、BMI、BCI も含んだより広い意味で、神経補綴 (neural prosthesis, sensory prosthesis, neuromotor prosthesis) などの用語も用いられている。

2 BMI の分類とその実際

BMI は、基本的には、脳からの遠心性 (出力) 情報を用いて外部機器を操作する出力型 BMI と、外部機器 (センサ類) からの情報を脳へ求心的に入力し、人工的に感覚等を生じさせる入力型 BMI の2種類に大別されるが、さらに、近年、脳を刺激する事によって、脳の機能を調整したり、脳の異常活動による不随意運動などの発生を抑えたりする Neuromodulation と呼ばれるシステムが BMI の一つの形として注目されている。

2.1 出力型BMIシステム

出力型BMIは、脳からの出力信号を、非侵襲的、あるいは侵襲的な方法により計測し、外部機器をその意図に基づいて制御・操作させると言うものである。脳からの出力系としては運動神経系と自律神経系があるが、臓器機能や血管運動などを支配する自律神経系の情報を用いたBMIに関しては、自律神経系信号に基づいた内臓型人工臓器機能の制御などの試みは行われているものの、まだ報告もほとんど無く、現在行われている出力型BMIの大部分は、ロボットアームの制御など、運動神経系に関するものである。

2.1.1 出力型BMIシステムの基本構成と技術的要素

出力型BMIの基本的な構成は、1) 運動や臓器制御に伴って発生する神経系(脳)の活動、あるいは出力信号を検出するための計測装置、2) 計測した信号を処理し、その信号がどのような運動や臓器機能の変化を指示しているのかを推定(デコード)するための処理装置、および、3) その推定に従って操作されるロボット(人工肢)や人工臓器などの外部機器、から成っており、以下に、その個々の要素について述べる。

2.1.2 神経系活動計測装置・電極

神経系活動の計測装置には、最初の項で述べたように非侵襲的方法と、侵襲的方法とがあるが、運動系出力型のBMIでは、義手のように一般に複雑・微細な操作を目的としているので、得られる情報量の問題から、脳に電極を直接刺入、あるいは留置するという侵襲的方法を必要とする場合が多い。刺入タイプの電極は、針型やブレード型の刺入部を有し、この刺入部の先端、あるいはシャフトの途中に金属等でできた電極部を配置するという形をとっており、これを脳や脊髄内に刺入・留置し、近くに存在するニューロンの活動電位を細胞外計測する。この刺入型の電極に関しては、金属のワイヤなどを電気的絶縁物質でコーティングし、先端の絶縁を剥いで電極部とした、いわゆるワイヤ電極を基本としたものと、近年発達してきた、シリコンプロセスを応用した超微細加工技術(Micro-electro-mechanical system: MEMS 技術)を用いて作製した、シリコン基板などの上に、非常に微細な電極を多数配置した多チャンネル電極との2種類がある。前者に関しては、異なるニューロンの神経活動を個別に分離(スパイクソーティング)する^{1, 2)}事を目的として、このワイヤ電極を複数本束ねて用いたり、あるいは1本のシャフトの複数の位置に電極を配置する事が行われており、束ねる数(あるいは配置する電極数)に応じて、ステレオトロード(2本)、テトロード(4本)、ドデカトロード(12本)などと呼ばれているものが用いられている。また、個々の電極線の刺入する深さを、リニアアクチュエータなどを用いて調節できるようにしたものも開発されており、マイクロドライブ⁴²⁾と呼ばれている。これらの電極は、基本的には手作りされてきたもので、個々の電極を目的とする位置や深さに配置しようとするものであるが、小型化は困難で、電極の本数にも限界がある。これに対して後者のタイプの電

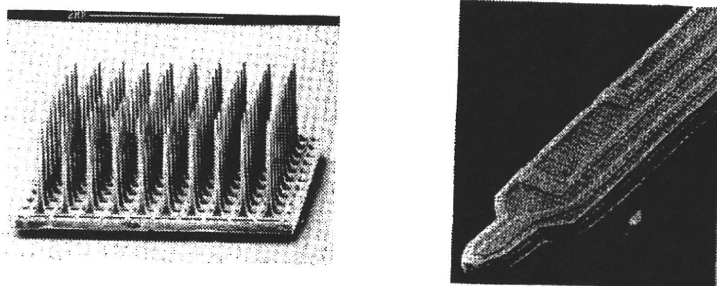


図2 BMIシステムにおいて神経系との間で入出力を行うために用いられる電極類
ユタ大学の剣山電極⁴⁰⁾、ミシガン大学のプローブ電極⁴¹⁾ (©1985 IEEE)

極は、電極の超微細化、高密度化、および、大量生産が可能で、多くの施設で、非常に多種類の電極が開発されている。有名なものとしては、ユタ大学のグループによる剣山型電極³⁾やミシガン大学のいわゆるミシガン電極^{4, 5)}などがあり(図2)、また、日本国内のオリジナリティある電極としては、豊橋技科大のグループによるウイスキー結晶を応用した電極⁶⁾などや、パリレンなどの柔軟な素材を用い、流路を備えた電極など⁷⁾が研究開発されている。

2.1.3 運動推定のためのデータ処理

外部機器、例えば義手や義足を思い通りに操作するためには、前述の電極類を用いて計測した神経情報から、どのように腕や足を動かそうとしているかという意図を推定(デコード)する必要があるが、一般には、複雑な動作は1つのニューロンの情報のみから推定する事は困難で、多数の電極を用いて複数のニューロンの活動を検出し、それぞれのニューロン活動の情報を総合して求める運動情報に変換するという処理が必要となる。この処理に関しては、確立された方法は無いが、多くは以下のような流れを取る。まず、特定の動作を行った際の手足の動きと発火データの対応付けを行うが、個々の神経細胞の発火が持つ意味は異なっているので、電極群で計測した多数のニューロンの活動を、個々のニューロンに関する時系列の発火系列に分けてやる(スパイクソーティング)必要がある。この際、1つのニューロンの発火の波形は固有で時間的に変化しないということが前提となっているが、波形の特徴抽出・クラスタリングや、独立成分分析などを用いて、各電極から得られたスパイク列を個々のニューロンの発火に分類し^{2, 8)}、個々のニューロンの時系列の発火を求める。この後の処理も様々であるが、一例を挙げると、個々のニューロンのある時間幅(bin)における発火数を求め、この値のすべてのニューロンに関するセットを、主成分分析(PCA)などによって次元を下げた後、線形モデルや人工ニューラルネットワーク、あるいは、ポピュレーションベクトル⁹⁾など、種々の手法を用いて動作と対応付けを行い、並に各ニューロンの発火からその時点での動作推定を行う、などという方法がとられている。

2.1.4 外部機器の操作の臨床・研究例

よく用いられる外部機器としては、ロボットアームやロボットハンド（義手）、あるいはそれに類した装置（2足歩行ロボットなど）などがあり、これらを意図通りに操作させるというシステムが典型的なものである（図3）。この種の研究は多数行われているが、有名なものとしては、1999年に報告されたChapinらのラットを用いた実験¹⁰⁾や、2002年のNicoletisらによるサルを用いた実験^{11, 12)}がある。前者のChapinらの実験は、レバーを押すと、押された際のレバーからの信号で水滴が出て来て水が飲めるようになっている装置を用いて、ラットに前足でレバーを押してアームを操作させ、水を飲む訓練を行い、次いで、脳の大脳皮質運動野に電極を刺入・留置し、これらの電極で計測される数十個のニューロンの活動に重み付けして加算する事により、前足でレバーを押した際に得られたニューロン活動と前足の動きを対応付ける。その後、前足でレバーを押した際に、これまではレバーからの信号でアームが動き水滴が得られるようにセットされていたものを、レバーからの信号ではなく、運動野からの信号でアームが動くようにモードを切り替えてやると、ロボットアームはラットが前足でレバーを押した際の脳からの信号で操作され、ラットは同様に水を飲む事が出来た、と言うものである（図4）。Chapinらは、この後、

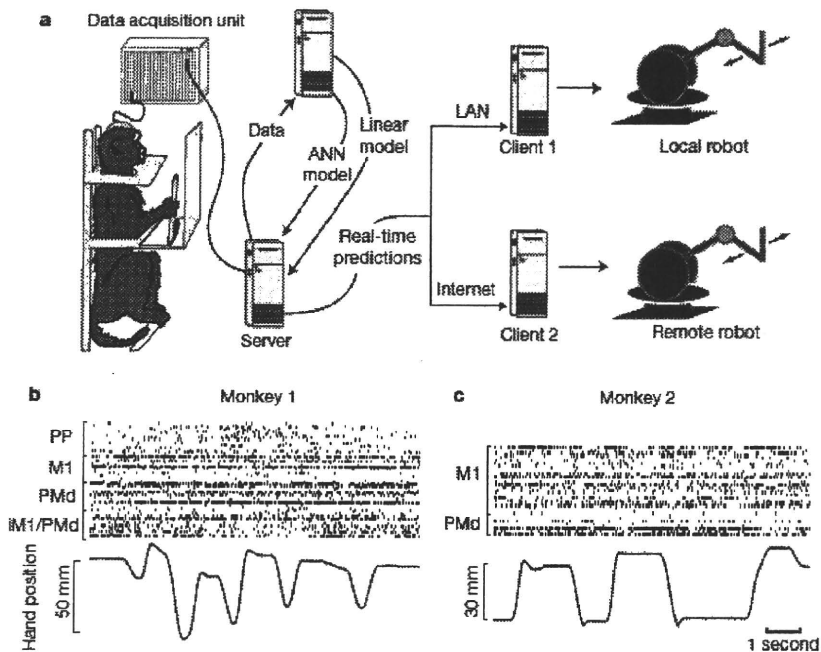


図3 出力型BMSシステムの例

埋め込み型電極などを用いて運動やその意図に伴って発生する神経系（脳）の活動を検出し、線形モデルや人工ニューラルネットワークなどを用いて処理し、その信号がどのような運動を指示しているのかを推定（デコード）し、その推定に従ってロボットハンド（人工肢）を操作する。（J. Wessberg, M. A. L. Nicoletis, et al., 2000¹¹⁾）

ラットが前足でレバーを押さずにロボットアームを操作している事を発見し、ラットの脳が進化し、実際に足を動かさなくても脳の活動のみでロボットアームを操作する事が出来るようになったとコメントしている。また、後者の Nicoletis らの実験では、彼らは、ヨザルの運動野に約100本のワイヤ電極を刺入し、ヨザルが手を伸ばしてフルーツ片をつかみ、口に持ってくる際の腕の動きと、その際に記録された各ニューロンの活動を記録・対比させ、記録されたマルチニューロン活動から逆に腕の動きを推定する事を行っている。基本的には、計測されたスパイクを個々のニューロン活動に分離し、各々について50~100ミリ秒の時間幅(bin)毎に含まれるスパイク数をニューロン活動の値とし、これらを全てのニューロンについて重み付けして線形加算するという処理をリアルタイムで行わせ、その結果からロボットアームの3次元の動きを予測し操作させるという実験を行い、その結果、彼らは、ヨザルがジョイスティックを左右に動かした際に、

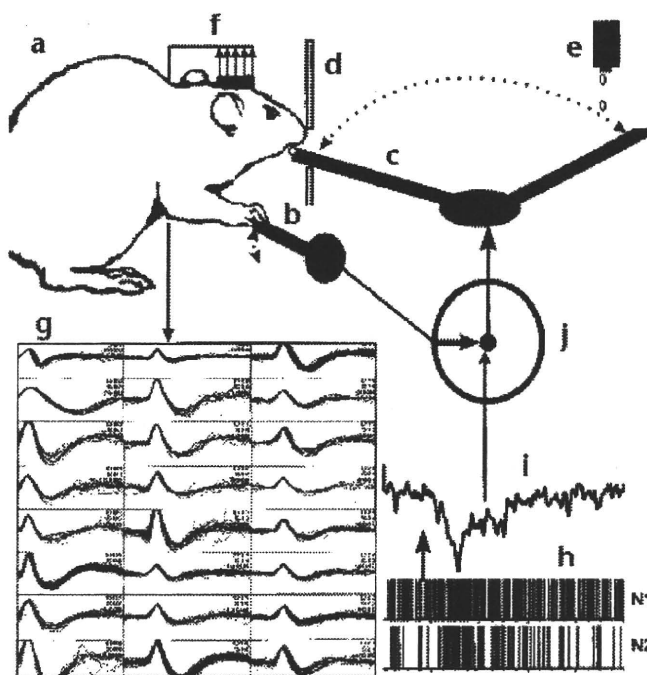


図4 1999年に報告されたChapinらの実験

レバーを押すと、押された際のレバーからの信号で水滴が出て来て水が飲めるようになっている装置を用いて、ラットに前足でレバーを押してアームを操作させ、水を飲む訓練を行う。次いで、脳の大脳皮質運動野に電極を刺入・留置し、前足でレバーを押した際に得られたニューロン活動と前足の動きを対応付け、これまではレバーを押した際のレバーからの信号でアームが動き水滴が得られるようにセットされていたものを、運動野からの信号でアームが動くようにモードを切り替えてやると、ロボットアームはラットが前足でレバーを押した際の脳からの信号で操作され、ラットは同様に水を飲む事が出来た。なお、この後、ラットは前足でレバーを押す事なく、ロボットアームを操作出来るようになった。(Chapin, et al., 1999¹⁰)

ロボットアームにヨザルの腕の動きと同じ動作を取らせる事が出来たと報告している。

侵襲型システムに関しては、このような動物実験のみならず、臨床応用も試みられるようになっており、ブラウン大学の Donoghue らは、Cyberkinetics 社がユタ型の針電極を発展させて作製した電極システム（ブレインゲートシステム）を脊髄損傷による四肢麻痺患者の脳皮質運動野に埋めこみ、患者に（運動神経活動の変化によって）コンピュータのカーソルを操作させたり、スイッチングを行わせたりする実験を行っている¹³⁾ (図5)。

2.2 入力型BMIシステム

入力型BMIシステムは、求心性である感覚神経系に人為的に刺激を入力する事によって人工的に感覚を発生させようというシステムであり、人工聴覚（人工内耳）は30年の歴史と10万人以上の患者を持つ確立された治療法となっている。人工視覚もまだ実験段階ではあるが、多くの施設で研究が進められており、人を対象とした実験も行われつつある。

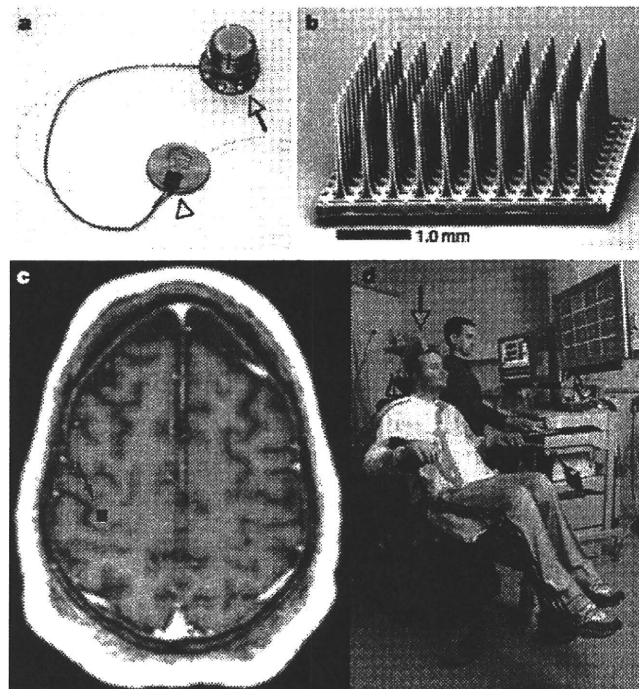


図5 Cyberkinetics社の“ブレインゲートシステム”によるBMIシステムの構築
 大脳皮質一次運動野に刺入したユタ大学の剣山型プローブを介し、脊髄損傷による四肢麻痺の患者さんが、コンピュータのカーソル等を自在に動かす事が出来る。(Hochberg, L. R. et al., 2006⁴³⁾)

2.2.1 人工聴覚システム（人工内耳）

(1) 人工内耳システム開発の歴史

人工内耳は、最も早く臨床応用され、もっとも成功している感覚系BMIである。歴史的には、聾の患者の内耳にワイヤー電極を埋め込み、電気刺激する事によって音の感覚を発生させる事に成功した1957年のパリの神経生理学者Djournoと耳鼻科医Eyriesの実験¹⁴⁾に始まるが、その後、1970年代からいくつかのグループにより本格的な開発が始まり、1980年代にはすでに市販品として製品化されている。主なものを挙げると、ロサンゼルスにおけるHouse兄弟、Jack Urbanらと3M社によるシングルチャンネルの埋め込み人工内耳システムの開発^{15, 16)}、カリフォルニア大学サンフランシスコ校の耳鼻咽喉科医のRobin Michelson、Michael Merzenichらによる多チャンネルのインプラントシステムの開発^{17~19)}と、そのライセンスを用いたAlfred MannによるAdvanced Bionics社の設立（バイオニック イヤー システム）、オーストラリアのメルボルン大学におけるGraeme Clarkによる多チャンネル人工内耳システムの開発^{20, 21)}と、開発された22チャンネルの人工内耳システムのコクレア社による製品化、また、IngeborgとHochmairによる多チャンネル人工内耳システムの開発着手と製品化²²⁾、およびMED-EL社（メドエル社）の設立などがある。

これらの人工聴覚システムは、内耳の蝸牛内に電極を挿入し、聴神経の螺旋神経節を刺激する事により音感覚を発生させる形をとっているが、近年、脳幹部にある聴神経の蝸牛神経核に対する刺激を行う聴性脳幹インプラントシステムの研究・開発も進んでいる²³⁾。

(2) 生体における聴覚発生と人工内耳のメカニズム

生体においては、外界から入力された音刺激は、外耳道・鼓膜・3つの耳小骨の振動を介して、最終的に蝸牛内のリンパ液を振動させ、蝸牛の中の管を前庭階と鼓室階という2つの半管に分けている基底膜を揺らす。その際、早い周波数の振動ほど、基底膜の入口に近い部分を揺らし、遅い周波数の振動ほど、入口から離れた奥の部位の基底膜を揺らす結果となる。この基底膜に振動（変位）を検出する有毛細胞（コルチ器）が配列されており、コルチ器で検出された振動はラセンの中に存在するラセン神経節から伸びる蝸牛神経を通して、延髄、さらに中枢（大脳皮質の第一次聴覚野、第二次聴覚野）に伝達され、その結果、音感覚が発生する事になる。

人工内耳システムにおいては、蝸牛内の鼓室階に刺激電極を挿入し、ラセン神経節を電気刺激する形をとるが、前述のように、ラセンの入口に近いところでは高い周波数が、先端の入口から離れた部分では低い周波数がコードされているので、入口に近い位置の電極を刺激すると高い周波数の音を感じ、先端に近い位置の電極を刺激すると、装着者は低い周波数の音を感じる事になる。現在最も多数用いられているコクレア社の製品では電極数が22チャンネル、メドエル社のシステムでは12対24個、アドバンスド・バイオニック社のハイレゾバイオニック イヤー シ