

- Ikegami, S., Takano, K., Saeki, N., Kansaku, K. Operation of the P300 brain-machine interface in individuals with chronic cervical spinal cord injury. *Neurosci Res, Suppl.* (in press)
- Iwaki, S., Takano, K., Kansaku, K. Parieto-temporal activity is correlated with the sense of agency during visual target tracking. *NeuroImage, Suppl.*, 141MT-AM, 2010.
- Sankai, Y., HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics, Robotics Research, *The 13th International Symposium ISRR*, pp.25-34, 2010.
- Otsuka, T. and Sankai, Y., Development of Exo-Finger for Grasp-Assistance, *Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, pp. 410-415, 2010
- Saito, A. and Sankai, Y., Hybrid Sensor for Measurement of Brain Activity, *Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2010)*, pp. 428-433, 2010.
- Hiramatsu, K. and Sankai, Y., Development of Manipulation System with Cybernetic Master Arm based on BES, *Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2010)*, pp. 422-427, 2010
- Hara, H. and Sankai, Y., Development of HAL for Lumber Support, *Proc. of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS&ISIS2010)*, pp. 416-421, 2010
- Kawamoto, H., Taal, S., Niniss, H., Hayashi, T., Kamibayashi, K., Eguchi, K., and Sankai, Y., Voluntary Motion Support Control of Robot Suit HAL Triggered by Bioelectrical Signal for Hemiplegia • *Proc. of 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp.462-466, 2010
- 木村 和正, 青沼 和隆, 山海 嘉之, 心房細動における Complex Fractionated Atrial Electrograms の自動判定に関する研究, *生体医工学会*, 49 巻 1 号, 2011 年
- 古場 隼人, 中田 金一, 秋山 謙次, 折目 由紀彦, 高森 達也, 山海 嘉之, 血管系の数理モデルによる動脈抵抗の評価:動物実験による検証, *生体医工学会*, 49 巻 1 号, 2011 年
- Koba, H., Nakata, K., Sankai, Y., Assessment of Coronary Artery Bypass Grafting based on the Dynamics Characteristics of the Vascular System: Verification by Computer Simulation, *Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and*

11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS 2010), Okayama, Japan, 8-12, Dec., 2010

Tsujimura, S., Yamagishi, H., Sankai, Y., Development of a Bidirectional Data Communication System Using Ultra High Frequency Radio Wave for Implantable Artificial Hearts, *Proc. of IEEE Tencon 2010, Fukuoka, Japan*, 21-24, Nov., 2010, pp. 1746-1751

書籍

Kansaku, K. Brain-Machine Interfaces for environmental control and communication. *Systems Neuroscience and Rehabilitation*. (Eds) Kansaku, K., Cohen, L.G., Tokyo, Springer Verlag, (in press)

Kansaku, K. The Intelligent Environment: Brain-Machine Interfaces for Environmental Control. *Smart Houses: Advanced Technology for Living Independently*. (Eds) Ferguson-Pell, M., Stefanov, D., Berlin, Springer Verlag, (in press)

山海嘉之. ロボットスーツ「HAL®」開発・実用化への舞台裏, *中央公論*, pp.78-85, 2011年3月号

2. 学会発表

一般口演・ポスター

Wada, M., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. fMRI activities in the left

temporoparietal junction during arm crossing. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2011)*. March 2011; Tokorozawa, Japan.

Takano, K., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K. AR-BMI operated with a see-through HMD: effects of channel selection. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2011)*. March 2011; Tokorozawa, Japan.

Ikegami, S., Takano, K., Saeki, N., Kansaku, K. P300 BMI performance in individuals with chronic cervical spinal cord injury. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2011)*. March 2011; Tokorozawa, Japan.

Komatsu, T., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. A BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2011)*. March 2011; Tokorozawa, Japan.

池上史郎、高野弘二、小松知章、和田真、神作憲司、佐伯直勝. 頸髄損傷者を対象としたブレイン・マシン・インターフェイス(BMI). *第40回 千葉大学脳神経外科医会研究会*. 2010年11月; 千葉.

Kansaku, K., Takano, K. AR-BMI for operating home electronics in a robot's environment. *The 40th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2010; San Diego, USA.

- Takano, K., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K. AR-BMI operated with a HMD: effects of channel selection. *The 40th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2010; San Diego, USA.
- Ikegami, S., Takano, K., Wada, M., Saeki, N., Kansaku, K. FMRI activities during P300-BCI: a comparison of white/gray and green/blue flicker matrices. *The 40th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2010; San Diego, USA.
- Komatsu, T., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. A development of a BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities. *The 40th Annual Meeting of the Society for Neuroscience*. Nov 2010; San Diego, USA.
- Wada, M., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. Role of the left temporoparietal junction for arm crossing. *The 33rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. September 2010; Kobe, Japan.
- Takano, K., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K. Augmented reality-brain-machine interface operated with a see-through head mount display. *The 33rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. September 2010; Kobe, Japan.
- Ikegami, S., Takano, K., Saeki, N., Kansaku, K. Operation of the P300 brain-machine interface in individuals with chronic cervical spinal cord injury. *The 33rd Annual Meeting of Japan Neuroscience Society*. September 2010; Kobe, Japan.
- 池上史郎、高野弘二、佐伯直勝、神作憲司. ブレイン-マシン・インターフェイス(BMI)による上肢運動補助の試み. 第 12 回 日本ヒト脳機能マッピング学会. 2010 年 6 月; 東京.
- Iwaki, S., Takano, K., Kansaku, K. Parieto-temporal activity is correlated with the sense of agency during visual target tracking. *The 16th Annual Meeting of the Human Brain Mapping*, Jun 2010; Barcelona, Spain.
- 塚原淳, 長谷川泰久, 山海嘉之, 意思推定機能を有する HAL による完全脊髄損傷患者のための歩行支援 -マネキンによる歩行実験-, 第 11 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp. 291-294, 仙台 (2010).
- 大島志織, 山海嘉之, 光センサを搭載した無侵襲プレ血栓検出システムの開発, 第 13 回 日本栓子検出と治療学会, 2010.11.20, 福岡.
- 大島志織, 山海嘉之, 計算機解析と in-vitro 実験による赤血球凝集の光学特性と活性化凝固時間の比較, 第 13 回 日本栓子検出と治療学会, 2010.11.19, 福岡.
- 大島志織, 山海嘉之, 光学的手法を用いた栓子の無侵襲検出法, 第 13 回 日本栓子検出と治療学会, 2010.11.19, 福岡.
- Oshima, S., Sankai, Y., Prediction of Thrombus Formation with Non-invasive Optical

Monitoring System, *18th Congress of the International Society for Rotary Blood Pumps*, October 2010, Berlin, Germany.

Oshima, S., Motomura, T., Sankai, Y., and Nose', Y., In vitro assessment of cardiac recovery supported by rotary blood pump LVAD, *18th Congress of the International Society for Rotary Blood Pumps*, October 2010, Berlin, Germany.

佐藤帆紡, 山海嘉之, ロボットスーツ HAL による移乗介助動作支援時の装着者と介助動作対象者に関する基礎的主観評価, *第28回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010AC2J1-7*, 2010.

古場隼人, 中田金一, 山海嘉之: 動脈における血管抵抗の評価: 血管系の数理モデルによる血管診断のための手法の提案. *生体医工学シンポジウム2010*. 2010.9.10. 札幌.

白石直人, 山海嘉之, 無線・小型で取り扱いの容易な脈波伝播速度計測装置, *生体医工学シンポジウム2010*, 2010.9.10, 札幌.

木村和正, 山海嘉之, 青沼和隆, 心房細動における心房内異常電位検出に関する研究, *生体医工学シンポジウム2010*, 2010.9.10, 札幌.

白石直人, 山海嘉之, 在宅健康管理のための健康機器情報自動認識装置の開発, *第9回情報科学技術フォーラム*, 2010.9.9, 福岡.

古場隼人, 中田金一, 秋山謙次, 折目由

紀彦, 高森達也, Drost Cornelis J, 谷口由樹, 山海嘉之: バイパスグラフとの吻合部における血管抵抗の推定. *第15回日本冠動脈外科学会学術大会*, p.106, 2010.

Taal, S. and Sankai, Y., Practical Design of Full Body Exoskeletons, *International Conference on Biomedical Electronics and Devices (BIODEVICES 2010)* January 20-23, 2010, Valencia, Spain

講演等

神作憲司. 脳情報の医療福祉応用. ヘルステクノ脳情報クラウド研究会. 2011年3月; 東京.

神作憲司. 医療福祉分野における実用的なブレインマシン・インターフェイス(BMI). *知的障害者・児とIT勉強会*. 2011年1月; 東京.

神作憲司. 脳からの信号を利用する: ブレインマシン・インターフェイス. *第40回千葉大学脳神経外科医会研究会*. 2010年11月; 千葉. (ランチョンセミナー講師)

神作憲司. ブレインマシン・インターフェイス(BMI)技術の医療福祉応用. *第2回神経難病リハビリテーション・ワークショップ*. 2010年6月; 東京. (特別講演)

神作憲司. ブレインマシン・インターフェイス(BMI)の実用化に向けて. *第6回Hyogo Neuroscience Seminar*. 2010年4月; 神戸. (特別講演)

Kansaku, K. NRC D researches I: Brain-Machine Interfaces for persons with disabilities. *Conference on Systems Neuroscience and Rehabilitation (SNR2011)*. March 2011; Tokorozawa, Japan.

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

神作憲司. BMI 技術を利用した障害者自立支援. 第 26 回日本義肢装具学会学術大会. 2010 年 10 月; 川越.

神作憲司. 非侵襲型 BMI による生活環境制御. 第 12 回日本ヒト脳機能マッピング学会. 2010 年 6 月; 東京.

神作憲司. 発達と脳内機構. 第 103 回日本小児精神神経学会研究大会. 2010 年 6 月; 東京

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

外山滋、神作憲司、高野弘二、池上史郎. 脳波測定用電極、脳波測定用電極付きキャップ及び脳波測定装置. (特願 2009-257366). 出願日 2009.11.10. (特願 2010-119930). 出願日 2010.5.25.

発明の名称: 装着式動作補助装置のキャリブレーション装置、及びキャリブレーション用プログラム. 出願人: 筑波大学. 出願番号: 特願 2010-181601

発明の名称: 診断装置. 出願人: 筑波大学. 出願番号: 特願 2010-198554

厚生労働科学研究費補助金(障害者対策総合研究事業(身体・知的等分野))
分担研究報告書

ブレイン-マシン・インターフェイス(BMI)による障害者自立支援機器の開発
分担研究課題: システム脳神経科学に基づいた BMI による障害者自立支援機器の開発

研究分担者	神作 憲司	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部脳神経科学研究室長
研究協力者	和田 真	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部研究員
研究協力者	高野 弘二	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部流動研究員
研究協力者	池上 史郎	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部流動研究員
研究協力者	小松 知章	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 脳機能系障害研究部客員研究員
研究協力者	外山 滋	国立障害者リハビリテーションセンター研究所 障害工学部生体工学研究室長

研究要旨

これまでの研究で、研究分担者らは、視覚刺激による脳波信号を用いた生活環境制御装置を開発した。さらに、従来手法より使用感と精度を向上させる視覚刺激を開発すると共に、頸髄損傷者がシステムを安定使用可能なことを確認した。また、拡張現実(AR)技術を組み合わせ、インテリジェントハウスやホスピタルの開発へと向けた機能拡張を行ない、BMI用脳波計を開発すると共にシステムのソフトウェア部(日本語入力、電子メール等)を実装した。他に運動補助に向けて手指肘肩が動作するBMI型上肢アシストスーツ、脳波筋電ハイブリッド制御に向け筋電計、着脱容易な脳波電極の開発も開始した。これらをもとに平成22年度は、BMI機器のさらなる多機能化に向けた研究開発を進め、より使用範囲を拡張するための積極的なAR技術の利用、定常視覚刺激を用いるSSVEP方式の追加、脳波計の小型化に向けた機能水準検討のための新規プログラム開発、より自由な他動運動を可能とさせるためのBMI型上肢アシストスーツ用新規プログラム開発、より着脱が容易で連続使用可能である電極開発等を行なった。また実証評価として、公立八鹿病院等の協力により、ALSの方を主対象とし病室と自宅でのBMI機器の使用実験を進め、問題点を抽出し機器開発にフィードバックした。またシステムの最適化に向けて各種神経画像手法を用いて脳信号特性を調査する研究も並行した。

分担研究課題 (小課題) : BMI による環境制御

A. 研究目的

脳からの信号を計測し、それを利用して機械操作を行い運動やコミュニケーションの補助、生活環境の制御などを行おうとする「ブレイン-マシン・インターフェイス (BMI)」もしくは「ブレイン-コンピュータ・インターフェイス (BCI)」と呼ばれる新技術が注目されている。

人工内耳や脳深部刺激といったこれまでの BMI 関連技術に加えて、近年注目されている BMI ではより積極的に脳からの信号を利用して、運動やコミュニケーションの補助、生活環境の制御などへの応用を行おうとする。こうしたアイデアは以前よりあったが、昨今の脳信号を計測解析する技術の進歩やシステム脳神経科学等の基礎医学の発展等を元として研究が広く展開し始めた。本研究では、この BMI 技術を障害者が実際に使うべく開発し障害者が失った機能を取り戻し、活動領域を拡張することを目的とする。

特に本分担研究ではシステム脳神経科学の視点から脳波を用いた BMI により障害者の生活環境制御を行うための基礎技術開発を中心に行った。

B. 研究方法

昨年度までの研究で、BMI 型生活環境制御システム (BMI-ECS) が使用可能なエリアを拡げ、ひいてはそれを利用する障害者の活動領域を拡張することを目的として、BMI に拡張現実 (AR) 技術を組み合わせた、AR-BMI を提案し、その実装に成功した

(Kansaku et al., 2010, Neurosci Res)。昨年度までに開発したシステムでは、視覚刺激の提示のために一般的な液晶モニターを使用していたが、将来的に室内の移動や外出などを想定した場合、より持ち運びが簡単な視覚提示装置の利用が想定される。

このため、本年度はウェアラブルな機器としてヘッドマウントディスプレイ (HMD) を利用した AR-BMI の運用について検証を行なった (項目 a)。

また、一般的なディスプレイを必要とせず小型化が容易な BMI の手法として、LED を用いて定常的な光刺激を使用する SSVEP-BMI についても、その装置の開発を行なった (項目 b)。

さらに、BMI 機器の精度向上に向けた基礎研究として、BMI 機器使用時と同様の課題を遂行中の脳機能について、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) と脳波 (EEG) の同時計測 (項目 c) および、脳磁図 (MEG) (項目 d) を用いて評価した。

実験手法

a) ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を利用した AR-BMI

a-1) 実験課題

視覚刺激としては、これまで同様、P300 スペラー (Farwell and Donchin, 1988, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*) を改変したもの (Takano, et al., 2009, *Clin Neurophysiol*) を用いた。被験者には視覚刺激提示中に指定したターゲットへ注意を向けることを課題として与えた。各アイコン

がそれぞれ一度ずつ強調表示されるのを 1 周として 15 週の刺激提示毎に判別を行ない、1 回のコマンド入力を各パネル、各条件においてそれぞれ 5 回ずつ行った。パネルと条件の詳細については次の項目で説明する。

a-2) 実験条件

被験者は健常右利きの 15 名(男性 12 名、女性 3 名)とした。

実験には、これまでに開発した AR-BMI システムを用い(図 1、Kansaku, et al., 2010, Neurosci Res)、視覚刺激の提示には 2 種類の機器(液晶モニタ、HMD)を使用し、脳波を記録した。操作パネルは照明操作パネルとテレビ操作のパネルの 2 種類を使用した。

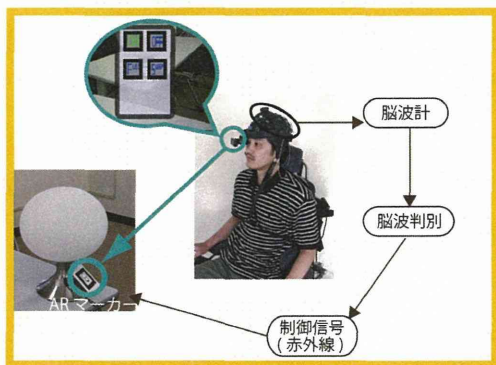


図 1. AR-BMI 概念図

a-3) 実験装置

視覚刺激の提示には一般的なコンピュータの利用に使われている液晶モニタ(DELLE207WFPc)と半透過式の片眼ヘッドマウントディスプレイ(HMD)(Liteye Systems Inc., LE750A)とを使用した。

HMD には、視界を完全に覆う没入型と、本研究で用いたような半透過型があるが、

将来的に外で使用することを考えた場合に映像処理による遅延や視界を塞いだことによる事故を避けるために極力視界を遮らないものとして、片眼半透過型のヘッドマウントディスプレイを使用することとした。

a-4) 評価方法

実験時に記録した脳波を元に判別を行い、2 種類の視覚刺激提示機器(液晶モニタ、HMD)、2 種類の操作パネルでの操作精度を計算し、その比較を行った。

b) SSVEP 用視覚刺激提示機器の開発

視覚誘発型 BMI として、本研究課題では P300 様脳波を利用する手法を主に用いて研究開発を進めてきた。しかしながら、この手法の難点としては、視覚刺激の提示にモニタが必要であることや、自発的な操作開始が困難であるという点があげられるだろう。このため、擬似的にはあるが自発的な機器操作が可能である SSVEP 方式を導入することを検討し、刺激提示機器の開発を行った。

c) fMRI を用いた BMI 機器使用時の脳機能計測

c-1) 実験課題

視覚刺激としては、いわゆる P300 スペラーを改変したもの(Takano, et al., 2009, Clin Neurophysiol)を用いた。被験者にはパネル上の指定された文字を注視する課題が与えられた。注視の間それぞれの行・列はランダムに 175ms 毎に 100ms 強調表示された。全ての行・列が 1 回ずつ強調されるのを 1

周として、一文字あたり 10 周の間注視を行った。

c-2) 実験条件

被験者は全員右ききの健常男性 9 名とした。

実験に用いた刺激パネルは、アルファベットを表示した 6x6 マスのマトリックスで、視覚刺激としては緑/青と白/灰の 2 種類の条件で行った (図 2)。各条件で 21 文字分の課題を行い、その間の fMRI 信号を計測した。さらに、EEG 信号についても同時計測した。

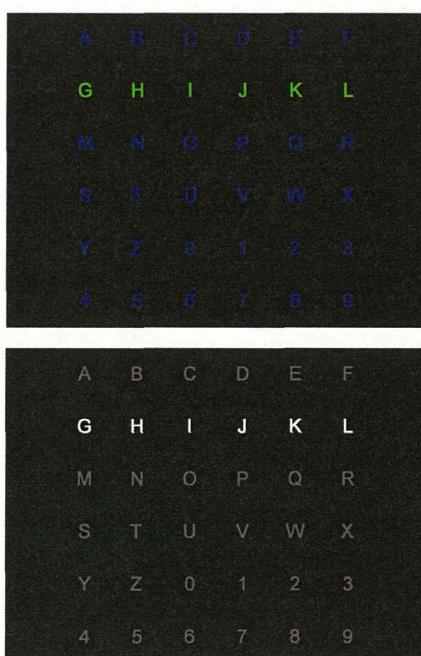


図 2 fMRI および MEG の実験で使
用した視覚刺激 (上: 緑/青、下: 白/灰)

c-3) 実験装置

fMRI は東芝製 1.5T の MR 装置にて記録し、同時にニューロコン製 MRI 対応脳波記録システム (図 3) にて脳波の撮像アーチファクトをオンラインで average subtraction

methods を用いて除いた後に記録した (sampling rate 4000Hz)。

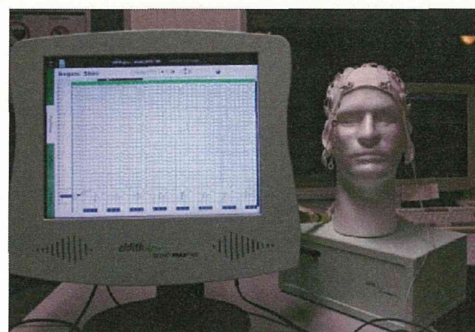


図 3 fMRI 対応脳波計一式

c-4) 評価方法

MRI データについては SPM8 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, Institute of Neurology, University College London, UK) を使い、それぞれの条件および緑/青-白/灰条件を解析、比較を行った。

EEG データについては、64Hz にダウンサンプルした後に誘発電位の解析を行った。

d) MEG を用いた BMI 機器使用時の脳活動の計測

d-1) 実験課題

視覚刺激としては、いわゆる P300 スペラーを改変したもの (Takano, et al., 2009, Clin Neurophys) を用いた。

被験者にはパネル上の指定された文字を注視する課題が与えられた。注視の間それぞれの行・列はランダムに 175ms 毎に 100ms 強調表示された。全ての行・列が 1 回ずつ強調されるのを 1 周として、一文字あたり 10 周の間注視を行った。

d-2) 実験条件および被験者

実験に用いた刺激パネルは、アルファベットの表示した 6x6 マスのマトリックスとし、視覚刺激としては緑/青と白/灰の 2 種類の条件で行った。各条件で 22 文字分の課題を行い、その間の MEG のデータを記録した。

d-3) 実験機器および解析手法

測定には Elekta Neuromag 社 Vectorview を使用した。MEG は固定されたセンサにより計測を行うため、そのままのデータでは実際に脳活動があった場所の計測が困難である。そこで Adaptive spatial filter を導入することで、センサ上のデータを、脳部位の座標上データに変換し、さらに脳内の機能的な繋がりについて、Imaginary coherence を利用して解析する手法を導入し検討した。

(倫理面への配慮)

ヒトを対象とする本研究は、全てヘルシンキ宣言に基づき、また、申請者の所属研究機関の倫理委員会の承認のもと行った。さらに、本研究の非侵襲脳機能計測法を用いた実験は、日本神経科学学会研究倫理委員会「ヒト脳機能の非侵襲的研究」に関する倫理小委員会による「ヒト脳機能の非侵襲的研究」の倫理問題などに関する指針に基づき実施した。

被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、自発的な同意を得た上で実験を行った。実験中は無用な苦痛を与えないように配慮した。

本研究で実施したすべての実験について、被験者の個人情報などに係るプライバシーの保護に配慮し、被験者が如何なる不利益を受けないように配慮した。結果の公表に関しては検査・実験の受諾と同様に被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、承諾を得た。また、個人が特定されないように格別の注意を払った。

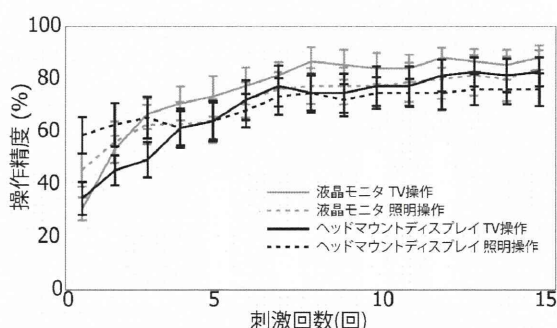


図 4 液晶モニタと HMD 使用時の BMI 機器操作精度

C. 結果

a) ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた AR-BMI

操作パネルの種類に関わらず、液晶モニタ使用時と HMD 使用時の操作精度に有意差は観察されなかった。また、どの条件でも平均正答率は 75%を超え、先行研究における実用可能な BMI の条件とされる 70%を超える結果となった (図 4)。

このことから、HMD を利用した場合でも、BMI 機器が液晶モニターと比較し、精度の面において遜色無く使用可能であることが示された (Takano, et al., 2010, Neurosci Res Suppl)。

また、電極の位置による精度の差について検証を行ったところ、側頭後頭部の電極が精度向上に高く寄与していることが明らかとなった(図 5) (Takano, et al., 2010, Soc Neurosci Abstr)。

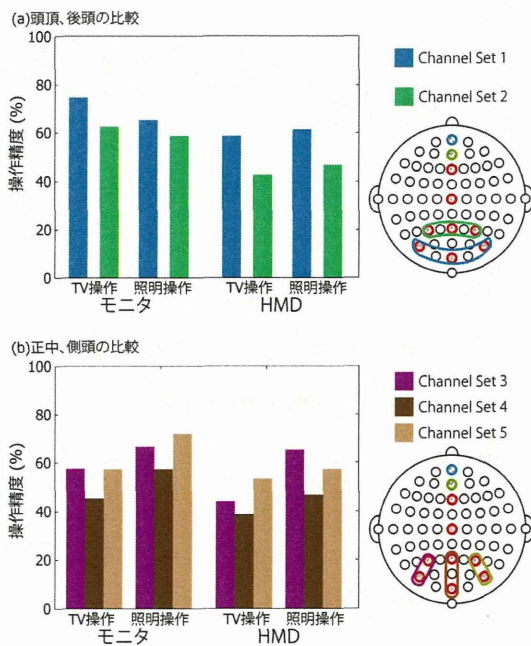


図 5 脳波電極の位置による精度の違い

b) SSVEP 用視覚刺激提示機器の開発

開発した機器の外見について図 6 に示す。機器は、4 つの子機と 1 つの親機からなり、4 つの子機を無線で制御、それぞれ異なる周波数での点滅を行うことが可能である。選択可能な周波数は 1-100Hz とした。

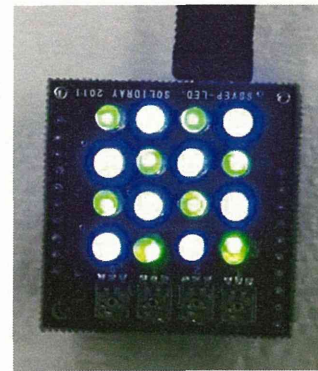


図 6 SSVEP 用刺激提示装置

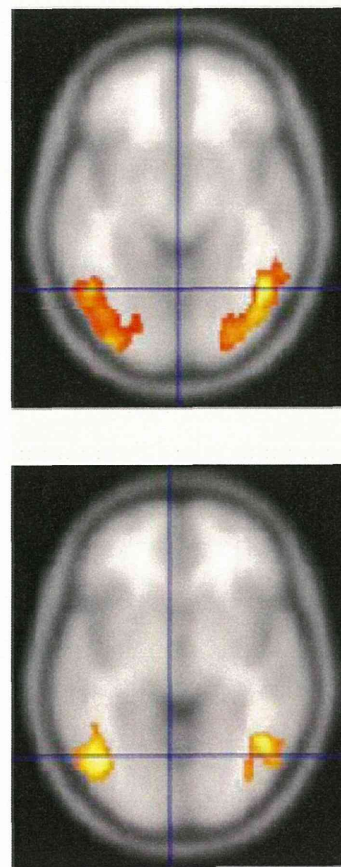
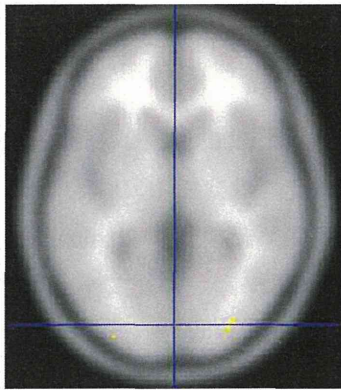


図 7 各条件における fMRI (上; 緑/青 下; 白/灰)

c) fMRI を用いた BMI 機器使用時の脳機能計測

fMRI では、各条件において両側後頭-頭頂領域の有意な活動を認めた ($P < 0.001$, uncorrected) (図 7)。緑/青条件と白/灰条件を比較すると、両側後頭領域が緑/青条件でより強く活動していた (図 8、 $P < 0.001$, uncorrected)。



$P < 0.001$ uncorrected

図 8 fMRI 計測で緑/青条件で白/灰条件より有意に高い活動が認められた部位

記録された脳波から、眼球運動、瞬きや残存撮像アーチファクトを除いた後に、それぞれの被験者の誘発電位を加算平均し、fMRI 結果の緑/青条件でより強く活動していた領域に近い O1、O2 に注目して総加算平均波形を求めた。両条件ともに刺激後 300-600ms に陽性波を認め、白/灰条件と比較して緑/青条件で有意に高い振幅を認めた (paired-t test, $P < 0.05$) (Ikagami, et al., 2010, Soc Neurosci Abstr)。

d) MEG を用いた BMI 機器使用時の脳機能計測

BMI 使用時の脳の活動について、8-12Hz でのデータをセンサ座標から頭部座標に変換し、脳解剖画像に重畳したものおよび、その中の最も強く活動している部分とのコヒーレンスについて解析した。左の後頭においてコヒーレンスが観察され、従来の研究結果である、後頭、頭頂での強い活動と近いものとなっている。ただし、本結果は被験者 1 名分であり、現状は参考データに留め、今後も研究を続けていく。

D. 考察

本年度に行った研究、開発により、従来目標としてきた、インテリジェントハウスやインテリジェントホスピタルなどの実環境で BMI 機器を使用する際の問題となる、機器と操作パネルの結び付けや、装着可能な機器による刺激提示手法、また、自発的な機器の駆動についての端緒を掴むことができた。また、基礎研究として BMI 使用時の脳活動について調査した結果、これまで電極を付けていた領域の周辺で特徴的な脳活動が捉えられた。今後はこれらの結果から、さらに電極の位置や数の調整を行うなどし、さらなる最適化へと向きたい。

分担研究課題 (小課題) : BMI 型環境制御システムの臨床評価

A. 研究目的

脳からの信号を計測し、それを利用して機器操作を行う「ブレイン-マシン・インターフェイス (Brain-Machine Interface: BMI) / ブレイン-コンピュータ・インターフェイス (Brain-Computer Interface: BCI)」の技術を用いることで、筋萎縮性側索硬化症 (ALS)、脊髄損傷、脳卒中などにより運動機能に後遺障害を負った患者や障害者のコミュニケーション補助、生活環境制御や運動機能補助等が可能となる。

Donchin らが報告した P300 スペラーでは操作パネル上に文字などの視覚刺激を配置して、注意を向けていた視覚刺激の輝度変化に応じて生じる P300 様の脳波変化 (odd-ball 効果) を検出する。このシステムでは頭皮上に装着した脳波電極から非侵襲的に信号を抽出、解析することで、提示した記号や文字のうちどれを注目しているのかを判別し、体を動かすことなく、文字入力を行うことを可能としている。

我々は、この P300 スペラーを家電制御に拡張して、視覚刺激に誘発された脳波信号を利用し、ライトの点灯やテレビのチャンネル切り替えといった家電操作等が可能な環境制御システムを開発し (Komatsu, et al., 2007, Neurosci Res Suppl; Komatsu, et al., 2009, Soc Neurosci Abstr)、脳波変化から特定されたコマンドを赤外線や LAN 回線を通じて電化製品などの外部機器に送ることで、手足を動かさずに脳からの信号だけで機器を操作することを可能とした。当初は視覚刺激として輝度変化 (白/灰) を用いていたが、これに色

変化 (緑/青) を加えると、健常被験者の使用感および操作精度 (正答率) が有意に向上することを明らかとした (Takano, et al., 2009, Clin Neurophysiol; Takano, et al., 2009, Neurosci Res Suppl)。さらに、頸髄損傷者による視覚誘発型 BMI の実証評価でも、条件によっては 80%以上の正答率で、実用に耐えうる操作精度 (70%以上) を報告した (Ikegami, et al., 2009, Soc Neurosci Abstr)。

本分担研究では、BMI の実使用者と考えられる慢性期頸髄損傷者 (spinal cord injury: SCI) や、意思決定が可能でもそれを表出することが出来ない進行期の筋萎縮性側索硬化症 (amyotrophic lateral sclerosis: ALS) 患者を対象として、BMI の操作精度や視覚刺激による操作精度の違いを検討した。

B. 研究方法

本研究で用いる視覚誘発型 BMI では、操作パネルに提示される視覚刺激に対して誘発された脳波信号を頭皮上の脳波電極から抽出、解析することで、注目している記号や文字を判別し、外部機器にコマンド送信する。

被験者は、今回初めて BMI の実験に参加した慢性期頸髄損傷者 10 名 (表 1) および ALS 患者 8 名 (表 2) の合計 18 名であった。

B-a.慢性期頸髄損傷者による BMI 使用評価

対象は、受傷後 12 カ月以上の慢性期頸髄損傷者 10 名 (26-53 歳 : 平均 41.9 歳、男性、受傷後 5.5-29.2 年 : 平均 18.2 年) (表 1) および対照健常被験者 10 名 (27-52 歳 : 平均 42.1 歳、男性) で、何れも今回初めて BMI の実験に参加した。

表 1：頸髄損傷者

年齢	性別	受傷高位	受傷後(年)	ASIA 分類	車いす
37	男	C3/4	16.3	不完全	電動
45	男	C2/3	5.5	完全	電動
43	男	C5/6	25.3	完全	電動
40	男	C4/5	15.9	不完全	電動
42	男	C4/5	10.4	完全	電動
37	男	C3/4	20.5	不完全	電動
48	男	C4/5	27.1	完全	手動
48	男	C5/6	21.8	不完全	電動
26	男	C4/5	9.9	完全	電動
53	男	C5/6	29.2	不完全	手動

ASIA: American spinal Injury Association

表 2：ALS 患者

	年齢	性別	ALSFRS-R	発症後(年)	胃瘻	気管切開	呼吸器	意思伝達装置
ALS-1	65	女	0/48	6.2	有	有	有	有
ALS-2	61	男	0/48	16.2	有	有	有	有
ALS-3	66	女	13/48	2.9	有	無	無	有
ALS-4	67	男	1/48	7.2	有	有	有	有
ALS-5	78	男	0/48	3.8	有	有	無	使用不能
ALS-6	79	男	0/48	9.4	有	有	有	使用不能
ALS-7	63	女	8/48	5.3	有	有	有	有
ALS-8	68	男	6/48	2.2	有	有	有	有

ALSFRS: ALS Functional Rating Scale

実験には 8x10 マスの文字盤を用い、これらを白/灰条件（輝度変化のみ：灰→白に変化）、緑/青条件（輝度変化+色変化：青→緑に変化）にて強調表示する 2 条件間で比較した（図 1）。文字盤の行もしくは列は 1 つずつ強調され、全ての行・列がランダムに 1 回ずつ強調されるのを 1 周として、10 周すると文字が入力されるよう設定し、それぞれの刺激条件で 15 回の文字入力を行った。8 か所の脳波電極（図 2）から記録された脳波を解析することで（線形判別分析）、被験者がどの記号に注目していたかをオンラインで判定し、白/灰条件と緑/青条件の操作パネルによる正答率を評価した。得られた平均正答率 P から機器の処理速度の指標として $bit\ rate = \log_2 2N + P \log_2 2P + (1 - P) \log_2 [(1 - P)/(N - 1)] \times 60 / (0.175 \times RC \times S)$ を算出した（N は文字盤のアイコン数、RC は文字盤の行と列の合計数、S はアイコンの強調回数）。

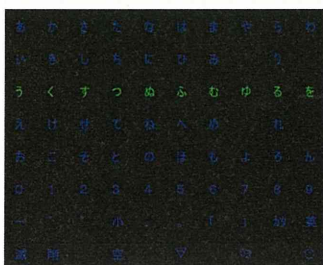


図 1：平仮名入力用パネル
（上：白/灰 下：緑/青）

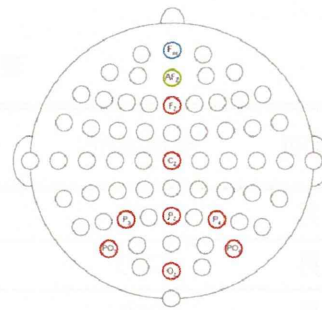


図 2：脳波電極配置図

B-b.ALS 痺者による BMI 使用評価

対象は厚生労働省筋萎縮性側索硬化症の重症度分類 4-5 度に相当する公立八鹿病院通院もしくは入院中の ALS 患者とし、病院施設もしくは在宅環境にて実験を行った（図 3）。

B-a と同様の設定で、文字入力は 6x9 マスの文字盤の行・列毎の強調で、環境制御としてライト操作を 2x2 マスの操作パネルのアイコンを一つずつ強調する方式で、輝度変化に緑と青の色変化を加えた視覚刺激提示（図 4）による視覚誘発型 BMI の操作を行った。コマンド入力の為の強調回数は被験者毎に 5-10 回で設定した。8 か所の脳波電極から記録された脳波をオンラインで解析することで（線形判別分析）、正答率を評価した。



図 3：実験風景（ALS-4）

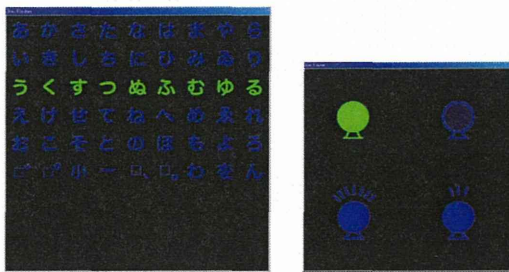


図 4：入力用パネル
(左：文字入力 右：ライト操作)

(倫理面への配慮)

ヒトを対象とする本研究は、全てヘルシンキ宣言に基づき、また、申請者の所属研究機関の倫理委員会の承認のもと行った。さらに、本研究の非侵襲脳機能計測法を用いた実験は、日本神経科学学会研究倫理委員会「ヒト脳機能の非侵襲的研究」に関する倫理小委員会による「ヒト脳機能の非侵襲的研究」の倫理問題などに関する指針に基づき実施した。

被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、自発的な同意を得た上で実験を行った。実験中は無用な苦痛を与えないように配慮した。

本研究で実施したすべての実験について、被験者の個人情報などに係るプライバシーの保護に配慮し、被験者が如何なる不利益を受けないように配慮した。結果の公表に関しては検査・実験の受諾と同様に被験者及び保護者・関係者から、口頭ならびに文書にてのインフォームドコンセントを徹底し、承諾を得た。また、個人が特定されないように格別の注意を払った。

C. 研究結果

C-a. 慢性期頸髄損傷者による BMI 使用評価

オンライン実行時（強調回数 10 回で実験中に入力された結果）の全被験者平均での文字入力正答率は、白/灰条件で 82.7%、緑/青条件では 88.3%であった。頸髄損傷群では白/灰条件：88.0%、緑/青条件：90.7%で、健常対象群では白/灰条件：77.3%、緑/青条件：86.0%であった（図 5）。頸髄損傷群で正答率が高い傾向がみられたが、反復測定分散分析で主効果は有意でなく（ $F(1,9)=1.2, p=0.30$ ）、緑/青条件の主効果のみが有意であった（ $F(1,9)=5.2, p<0.05$ ）。これらの結果は bit rate を指標としても傾向は同じだった。

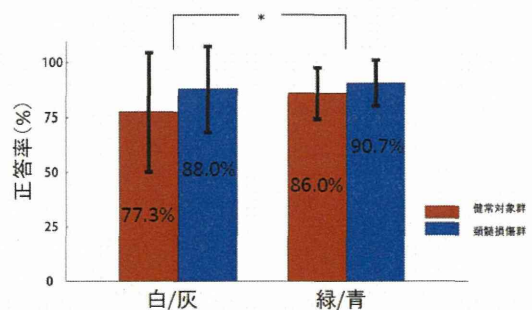


図 5：オンライン正答率

オフラインの解析（オンライン実行時に記録されたデータを実験後に解析）においても反復測定分散分析で被験者群間の主効果は有意でなく（ $F(1,9)=1.9, p=0.20$ ）、緑/青条件（ $F(1,9)=9.4, p<0.05$ ）および強調回数（ $F(9,81)=93.2, p<0.0001$ ）の主効果が有意であった（図 5）。Bonferoni 補正による事後比較では、強調回数 10 回と比べて、8 回までは正答率に有意差を認めなかった。

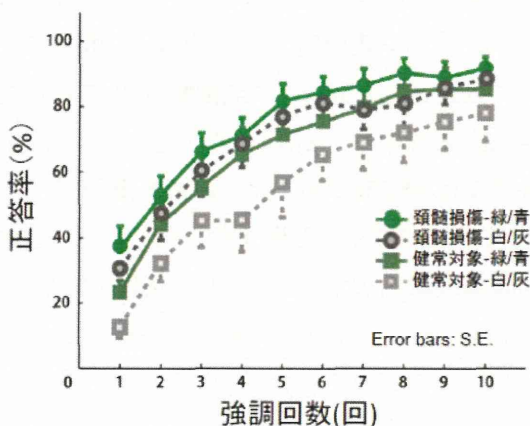


図 6：オフライン解析

実用の指標として少なくとも 70%の正答率が必要とされており、頸髄損傷群では強調回数 5 回でこれを上回った(図 6)。そこで、頸髄損傷群の強調回数を 8 回、5 回まで削減した際のオフライン正答率と bit rate を強調回数 10 回(オンライン正答率)のものと比較した(表 3)。強調回数を 5 回まで減らすと bit rate は有意に向上するが(p<0.05, paired t-test)、正答率は有意に低下した(p<0.05, paired t-test)。強調回数 8 回では正答率の低下は有意でなく、緑/青条件でのみ bit rate が有意に向上した(p<0.05, paired t-test)

(Ikegami, et al., in press, Clin Neurophysiol; Ikegami, et al., 2010, Neurosci Res Suppl)。

強調回数(回)	SCI 白/灰		SCI 緑/青		文字/分
	正答率(%)	Bit rate (bit/min)	正答率(%)	Bit rate (bit/min)	
10	88.0	9.8	90.7	10.2	1.9
8	80.4	10.9	90.4	12.8*	2.4
5	77.2*	16.2*	81.7*	17.5*	3.8

表 3：強調回数の削減

C-b. ALS 患者による BMI 使用評価

ALS 患者 8 名(女性 3 名、男性 5 名)の

方に本システムを用いた実験を行った。ALS Functional Rating Scale (ALSFRS-R) は 0-13 で、発症後 2.2-16.2 年(平均 6.6 年)の経過で、全員が胃瘻処置を受け、1 名を除いて気管切開術を施行されていた(表 2)。2 名(ALS-4,6)は在宅自室にて、他 6 名は公立八鹿病院入院中の病室にて実験に参加した。ALS-5 および ALS-6 の 2 名は僅かな眼球運動や表情により、御家族や介護者との疎通は行えていたが、意思伝達装置(Augmentative and Alternative Communication (AAC) device)は使用できず、実験者との疎通が不確定であったため、検討からは除外した。他の 6 名は、発語不能ではあったが文字盤や口の動き、表情で簡単な応答は可能で、担当医師や理学療法士と共に反応を確認しながら実験を行った。

病室、在宅いずれにおいても人工呼吸器等の医療器具によるアーチファクトは明らかではなかったが、電動ベッドなどからの商用周波数由来のノイズの混入があり、測定のセッティングに注意を要した。

ALS 患者(n=6)平均では、アイコンが 1 つずつ強調されるライト操作では平均 67%の正答率と先行研究と同程度であったが、行と列による視覚刺激提示による文字入力では平均 39%の文字入力精度であった。

ALSFRS-R 低値の患者で正答率が低い傾向を認めた。また、文字が小さくて見難いといった訴えもあった。

D. 考察

視覚誘発 BMI に関する先行研究(Takano et al, 2009, Clin Neurophysiol)により、健常者での実用的な精度が実証されたため、本研究では、BMI の実使用者と考えられる慢性期

頸髄損傷者や、意思決定が出来てもそれを表示することが困難な進行期 ALS 患者を対象に BMI の操作精度を検証した。

慢性期頸髄損傷者において、健常被験者同等に視覚誘発型 P300 BMI を操作可能で、健常者同様に輝度変化に色変化を導入した視覚刺激により操作精度が有意に向上することが明らかとなった。また、入力時間短縮のために強調回数を削減する際にも、輝度と色変化を組み合わせた視覚刺激が有用であることも示された (Ikegami, et al., in press, Clin Neurophysiol; Ikegami, et al., 2010, Neurosci Res Suppl)。

ALS 患者での予備的検討によると、アイコンが 1 つずつ強調されるライト操作では平均 67% の正答率と先行研究と同程度であったが、行と列による視覚刺激提示による文字入力では平均 39% の文字入力精度であった。文字が小さくて見難いといった訴えもあり、また、行と列による視覚刺激提示では、同一の行や列に間違いが生じることも知られており、今回、体位制限や眼瞼下垂などの視機能制限を認めたことも、文字入力での正答率低下の一因と考えられる。さらなる視覚刺激提示方法の工夫が必要と考えられた。

頸髄損傷者を対象とした先行研究では (Ikegami, et al., 2009, Soc Neurosci Abstr) 亜急性期頸髄損傷者において正答率が低い傾向を認めたが、今回の検討により回復期を経

た慢性期頸髄損傷者では、実用に耐えうる操作精度 (70%以上) が確認された。一方、Nijboer らの ALS 患者の検討によると、ALSFRS と BMI の使用成績の相関は明らかではないが、Kubler らのメタアナリシスでは完全閉じ込め症候群 (complete locked-in state: CLIS) を含めた検討では相関を示すといった報告もある。ALSFRS の低下した患者では視覚刺激提示方法により正答率が異なる傾向を認め、ALS などの進行性の病態では、その導入時期、方法も考慮する必要があることが示唆された。

E. 結論

臨床研究を継続し、使用者本人や御家族からのフィードバックを反映していくことで、個々の患者・障害者のニーズに対応できる柔軟なシステムの開発が可能となる。また、こうした実用・応用への取り組みを進めていくためには、倫理的な問題を十分に配慮しながら進めていくことが前提となる。

今後とも、BMI 技術を福祉機器として実用化するために、高精度で、操作感も良いシステムの開発を継続し、神経難病や神経外傷などにより、日常生活動作やコミュニケーションに支障をきたしている患者・障害の自立支援へとつなげたい。

分担研究課題（小課題）：BMI システムの開発

A. 研究目的

BCI/BMI 自体の研究目的は別項に譲るとして、本分担研究（小課題）の目的は、医療施設および在宅といった現場で障害者が実際に運用しうるよう、安定性と拡張性とを両立した実用的な BMI システムを構築するところにある。

本分担研究はその原点において、オーストリア企業より導入した市販の BCI 研究開発パッケージおよび既知の BCI アルゴリズムを参考にしつつ、それを新規のプログラムコードとして内製化することから開始された。しかし QoL を拡大する技術基盤として用いる段階に至った現在、そのように直截な手段を続けることは難しくなっている。何故なら障害者のニーズに即した実際的な BMI アプリケーションは、BCI/BMI 先端圏のひとつである北米においてすら、ワズワースセンターなどで現在進行中であり、そのまま参考に出来るノウハウが未だ存在しない領域である為だ。

本研究は非侵襲 BCI に的を絞っているため、そのカスケードは小型化のはかられた『脳波計』から、コミュニケーション手段や環境制御装置(ECS)としての機能などを提供する各種の『BMI アプリケーション』までを結ぶものとなる。また脳波計とアプリケーションとの中間には、計測された脳波を信号処理し、各アプリケーションを制御するために符号化する段階が必要であり、これが『BCI エンジン』である。これら三要素からなる BMI システムを、ハードウェアおよびソフトウェアの両輪について同時並行的に開発・改良する。

ただし同アプリケーションの一つである OT 向けパワーアシストスーツ（上肢用の動力外骨格）については独立の分担研究課題であるため、そちらの報告を参照されたい。また厳密には脳波計の上流として頭皮上電極なども存在するが、それらの報告も別立てとする。なお、昨年度までは独立な分担研究小課題だった脳波計の開発については、本年度は本稿に取り込んで扱う。

B. 研究方法

BCI エンジンおよび BMI アプリケーションのコーディング言語は初年度から引き続きで C++を用い、開発の継続性を確保するため徹底的なモジュール化を目指した。開発環境も昨年同様に、ラピッドプロトタイプングには Borland 社製の、本実装には Microsoft 社製の統合開発環境 (RAD) を継続利用している。システムの実行環境も、当初選定された WindowsXP を引き継いだ。

各論[1]：新たな BCI アルゴリズムの適用

上記目的に沿って昨年度までに、脳波における P300 様電位および運動イメージ生起時の周波数成分変化を信号源としてもちいる 2 つのアルゴリズムが、BCI エンジンへと実装された。前者は「視覚提示された多数選択肢からの択一」を行えるが、その裏返しとして提示されない行動は選べない。後者は「視覚提示に依存しない任意のコマンド発行」を行えるが、利用できるチャンネル数の少なさ（現状で 3 ないし 4 チャンネル）および運用までに長期のトレーニング

グを要するという問題を抱えている。両者を組み合わせることでそれぞれ不得手とする要素が打ち消され、実際的な BMI アーキテクチャの実現が期待される。

一昨年度から手掛けられており実装および運用で先行する P300 型 BCI に対し、昨年度は、右上肢の運動をイメージした際の脳波を判別することで、健常者による BCI コアの動作を新たに確認している。

それらの運用実績なども鑑み、本年度はさらに定常状態視覚誘発電位 (SSVEP) を信号源としてもちいるアルゴリズムも、BCI コアに追加実装することを決定した (実装行程は来年度も引き続き行う予定)。SSVEP とは、100Hz 程度までを上限とした周期的な光刺激によって誘発される、それと同等の周波数成分を含んだ頭皮上電位の連続的な変化のことである。30Hz 程度より高周波での明滅は連続した点灯として認識されるため、常に視覚刺激を提示しておいてもユーザの負担となりにくく、さらに運動イメージよりトレーニングを要しないため、既存の 2 アルゴリズムをさらに実運用性の面で補完 (図 1) することが期待される。

各論[2]: フィールドテスト指向の実装

昨年度までの段階で実装された、メールや Skype といった意思疎通のための一連のアプリケーション群にはテキスト入力が含まれており、それには予測変換機能が備わっている。これは健常者向け機器、例えば携帯等で一般的にみられるように使い勝手を向上せしめるという意図のほか、使用時間がそのまま疲労に直結しやすい身障者をユーザと想定した、負担軽減の策でもある。

しかし、制御された環境を離れたさらなるフィールドテストに向けて、介助者などオペレータの負担軽減も考慮する必要性については論を待たない。そこで本年度は、その問題を解消すべくアプリケーション開発を行った。

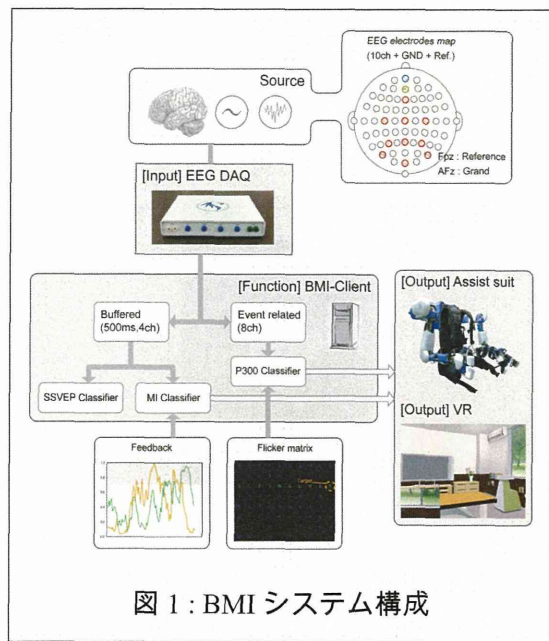


図 1: BMI システム構成

C. 結果

一昨年度および昨年度に引き続き、開発の一部は企業への委託として行った。本年度のシステム開発は昨年度以前のものを基本的に踏襲しているため、実装済み要素については昨年度の分担報告を参照されたい。

脳波計は一昨年度のプロトタイプ開発、昨年度の性能向上および小型化を経て、P300 型および運動イメージ型 BMI の研究ならびに実用機としてはおおよそ過不足ない機能を実装し得ていた。しかし上述の SSVEP を新たに BCI の源泉として用いた