

for brain-machine interface. Neurosci Res, Suppl. 2011. (P2-t13)

Toyama, S., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. Gel-based EEG electrode for Brain-Machine Interface. Neurosci Res, Suppl. 2011. (P2-t10)

Wada, M., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. FMRI activities in the left inferior parietal lobule with left arm over right arm crossing. Neurosci Res, Suppl. 2011. (P2-o17)

書籍

神作憲司. 神経難病の生活を支援する BMI. 「CLINICAL REHABILITATION」別冊: 神経難病疾患のリハビリテーション-ケーススタディーを通して学ぶ. 医歯薬出版, (印刷中)

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, (in press)

Kansaku, K. Brain-Machine Interfaces for persons with disabilities. Systems Neuroscience and Rehabilitation. (Eds) Kansaku, K., Cohen, L.G., Tokyo, Springer, pp. 19-33, 2011.

2. 学会発表

講演等

Kansaku, K. BCI applications to expand range of activities for persons with disabilities. Seminar. Tuebingen University. February 2012; Tuebingen, Germany.

神作憲司. 神経科学と倫理. 東京大学法科大学院・生命倫理と法. 2012年1月; 東京.(講師)

神作憲司. BMI 技術のリハビリテーション分野への応用. 日本神経回路学会/神経科学・リハビリテーション・ロボット工学のシナジー効果に関する研究会+Brain-IS 研究会. 2011年6月; 北九州.(基調講演)

シンポジウム等

神作憲司. 脳機能計測手法の障害者自立支援に向けた応用. 第2回マルチモーダル脳機能研究会. 2011年11月; 東京.

神作憲司. 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. 第48回日本リハビリテーション医学会学術集会・パネルディスカッション. 2011年11月; 千葉.

池上史郎, 神作憲司, 近藤清彦, 佐伯直勝. ALS 患者に対する BMI 環境制御システムの開発. 第70回日本脳神経外科学会総会・シンポジウム. 2011年10月; 横浜

一般口演・ポスター

Wada, M., Suzuki, M., Agarie, H., Takaki, A., Miyao, M., Kansaku, K. Tactile temporal order judgment in autistic children: an initial report. The 89th Annual Meeting of the Physiological

Society of Japan. March 2012; Matsumoto, Japan.

Ora, H., Wada, M., Salat, D.H., Kansaku, K. Functional connectivity of the left posterior parietal cortex during arm crossing. The 89th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan. March 2012; Matsumoto, Japan.

池上史郎、佐伯直勝、高野弘二、和田真、神作憲司. 視覚誘発型 P300 ブレイン-マシン・インターフェイス (BMI) における背景脳活動. 第 51 回日本定位・機能神経外科学会. 2012 年 1 月; 東京.

和田真、鈴木繭子、東江浩美、高木晶子、宮尾益知、神作憲司. 触覚時間順序判断における自閉症者の応答特性. 第 28 回国立障害者リハビリテーションセンター業績発表会. 2011 年 12 月; 所沢.

櫻田武、川瀬利弘、高野弘二、神作憲司. 多様なリハビリ運動実現のための BMI 型女子アシストスーツ. 第 28 回国立障害者リハビリテーションセンター業績発表会. 2011 年 12 月; 所沢.

大良宏樹、小松知章、中島八十一、神作憲司. P300 と定常視覚誘発電位を併用した BMI 型環境制御装置. 第 28 回国立障害者リハビリテーションセンター業績発表会. 2011 年 12 月; 所沢.

池上史郎、佐伯直勝、高野弘二、小松知章、和田真、神作憲司. 視覚誘発型 BMI 使用時における背景脳活動の評価. 第 22 回千

葉臨床神経生理研究会. 2011 年 11 月; 千葉.

Takano, K., Sekihara, K., Iwaki, S., Kansaku, K. Mapping functional connectivity during P300-BCI: an MEG study. The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Nov 2011; Washington, DC, USA.

Sakurada, T., Takano, K., Kansaku, K. A BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities: a combination of sensorimotor rhythm, P300 and SSVEP. The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Nov 2011; Washington, DC, USA.

Ora, H., Komatsu, T., Nakajima, Y., Kansaku, K. A BMI based environmental control system: a combination of sensorimotor rhythm, P300 and SSVEP. The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Nov 2011; Washington, DC, USA.

Wada, M., Kansaku, K. Effect of eyes opening and closing on tactile temporal order judgment. The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Nov 2011; Washington, DC, USA.

池上史郎、高野弘二、近藤清彦、神作憲司. ALS 患者に対する視覚誘発型 BMI システムの開発. 第 48 回日本リハビリテーション医学会学術集会. 2011 年 11 月; 千葉.

Takano, K., Toyama, S., Komatsu, T., Nakajima, Y., Kansaku, K. Metal pin electrode for brain-machine interface. The 34th Annual

Meeting of Japan Neuroscience Society.
September 2011; Yokohama, Japan.

Toyama, S., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. Gel-based EEG electrode for Brain-Machine Interface. The 34th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society. September 2011; Yokohama, Japan.

Wada, M., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K. FMRI activities in the left inferior parietal lobule with left arm over right arm crossing. The 34th Annual Meeting of Japan Neuroscience Society. September 2011; Yokohama, Japan.

櫻田武、高野弘二、小松知章、神作憲司。
BMI 型上肢アシストスーツによる多様なリ
ハビリ運動実現のための多関節制御手法。第
5回 Motor Control 研究会。2011年6月；岡崎。

B. 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。脳波測定
用電極、脳波測定用部材、及び、脳波測定装
置。(特願 2011-262032)。出願日 2011.11.30。

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

厚生労働科学研究費補助金（障害者対策総合研究事業）

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に関する研究

分担研究課題名 ロボットスーツ HAL の障害者自立支援機器への展開に関する研究

分担研究者 山海 嘉之 筑波大学大学院システム情報工学研究科教授

研究要旨

本研究は、活動領域拡張医療機器開発事業として、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に関して、研究を推進するものである。BMI に関しては、非侵襲型のインタフェースを用いることとし、また、障害者自立支援機器として、これまで研究開発を進めてきたロボットスーツ HAL を改良・活用する。本年度は、従来装置を改良することによって、下肢用試験システムの開発推進、ならびに、上肢用試験システム、把持動作支援用のハンド・フィンガー部を準備し、実験を行った。

A. 研究目的

本研究では、活動領域拡張医療機器開発事業として、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に関して、研究を推進することを目的としている。

従来装置を改良することによって、下肢用試験システムの開発推進、ならびに、上肢用試験システム、把持動作支援用のハンド・フィンガー部を準備し、基礎的実験を行う。

B. 研究方法

現状の BMI 技術による分解能を検討すると、侵襲型であっても非侵襲型であっても高い分解能を期待する事は現時点では困難であるため、検討の結果、本研究では非侵襲型の適用が当面は妥当であると判断し、これを想定して研究を進めている。また、運動機能障害者の自立支援機器として、これまで研究開発を進めてきたロボットスーツ HAL を改良・活用することで研

究推進の効率化をはかり、改良型試験装置の製作と基礎実験を行う。

（倫理面への配慮）

人支援技術の研究開発の推進には、被験者に対する適切な対応が求められるため、当該研究では、厚生労働省の臨床研究に関する倫理指針を遵守した。

C. 研究結果

研究開発方針に従って、従来から研究開発を進めてきた下肢用試験システムの開発推進、ならびに、上肢用試験システム、把持動作支援用のハンド・フィンガー部を当該研究開発推進のために改良を行い（機構的／電子的／制御論的機能の拡充）、動作試験等の実験を継続している。

従来より開発を進めてきた装着型サイバニックハンド・フィンガーに改良を加え（図 1）、さらなる小型軽量化や制御精度向上を目指し、現在改良試作および動作検証を進めている。準備を進めている上肢と接合すべく改良を加えている。



図1 装着型サイバニックハンド・フィンガー(改良版)

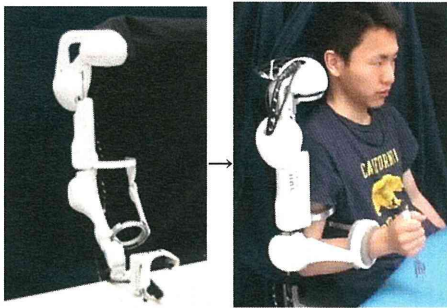


図2 上肢用 HAL

また、従来より開発を進めてきた上肢用 HAL についても図2に示すような改良を加え、動作検証を実施中である。

さらに、単関節下肢用 HAL のインタフェース部に対して、BMI との連動が可能となるよう、機構的／電子的／制御論的機能の改良を行っている。更に、BMI に関しても可能な範囲で試行を実施した。図4に示すような試作品を制作した。システム全体を組み上げてゆく過程で、要素技術が機能していることを確認するために、簡単なシステムを構成し、脳活動パターンの信号を用

いて基礎実験を試みている。



図3 単関節下肢用 HAL (インタフェース改良版)

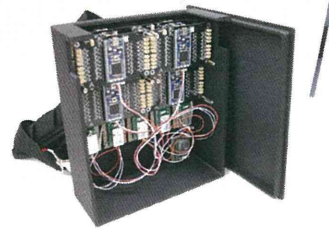
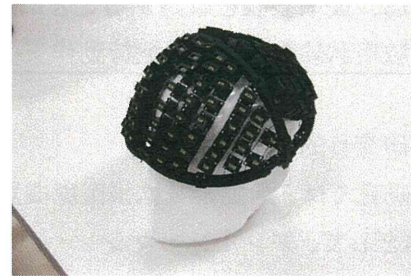


図4 新開発 BMI ヘッドセットと
コントロールボックス

D. 考察

各要素の技術的な改良を行なうことができた。システム全体については、現在、全体の動作検証を進めている。別途インタフェースユニットを構成することも検討する。

E. 結論

当該研究推進のため、機構的／電子的／制御論的機能を自律システムとして適用で

きるよう要素技術の研究開発を進めることができた。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

(関連研究の成果を含む)

1. 関連する論文発表

- 1) Atsushi Tsukahara, Yasuhisa Hasegawa and Yoshiyuki Sankai, "Gait Support for Complete Spinal Cord Injury Patient by Synchronized Leg-Swing with HAL," Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2011), San Francisco, CA, USA, pp. 1737 - 1742, 2011.
- 2) S.R. Taal and Y. Sankai, "Exoskeletal spine and shoulder girdle for full body exoskeletons with human versatility", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation 2011, May 2011, pp. 2217-2222
- 3) Cota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto, Yoshiyuki Sankai, Typical Risks and Protective Measures of Wearable Walking Assistant Robots, Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2011 (in press)
- 4) Hiroaki Kawamoto, Tomoya Shiraki, Tasuku Otsuka and Yoshiyuki Sankai, Meal-Assistance by Robot Suit HAL using Detection of Food Position with Camera, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 (in press)
- 5) Tasuku Otsuka, Ko Kawaguchi, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai, Development of Upper-limb type HAL and Reaching Movement for

Meal-Assistance, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 (in press)

- 6) K. Hasebe, H. Kawamoto, K. Kamibayashi, A. Matsushita, and Y. Sankai. Stepwise Process of Clinical Trials in Safety-Conscious Development of Human Assistive Robots, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 (in press)
- 7) K. Yamawaki, H. Kawamoto, K. Eguchi, Y. Nakata, Y. Sankai and N. Ochiai, Gait training for a spinal Canal Stenosis Patient using Robot Suit HAL -A Case Report-, Proceedings of the 5th world congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine, 2011 (in press)
- 8) 山海嘉之, 鍋島厚太、河本浩明, ロボットスーツHALの安全技術, 日本ロボット学会誌 Vol. 29 No. 9 pp. 780~pp. 782 2011
- 9) Shiori Oshima, Yoshiyuki Sankai, "Development of Red Blood Cell-Photon Simulator for Optical Propagation Analysis in Blood using Monte Carlo Method", IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, Volume: 15, Issue: 3.
- 10) 林 知広, 岩月 幸一, 山海 嘉之, "神経・筋活動の制御に支障がある重度対麻痺患者の脚上げ意思推定と歩行アシスト", 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 774 (2011), pp. 439-449
- 11) 長谷部浩二, 河本浩明, 上林清孝, 松下明, 山海嘉之. 段階的な臨床試験プロセスによる人支援型ロボット開発の提案, 日本ロボット学会誌, vol. 29 (3), pp. 14-18, 2011
- 12) 山田 陽滋, 山海嘉之, 河本浩明, 李秀雄, 鍋島厚太, 山海嘉之: パワー

- アシスト機器の安全, 日本機械学会誌, 114巻1106号, pp.45-48, 2011.
- 13) Yoshiyuki Sankai, "HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics", Robotics Research, The 13th International Symposium ISRR, pp.25-34, 2010.
 - 14) Tasuku Otsuka and Yoshiyuki Sankai, "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
 - 15) Atsushi Saito and Yoshiyuki Sankai, "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
 - 16) Kousuke Hiramatsu and Yoshiyuki Sankai, "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
 - 17) Hiromasa Hara and Yoshiyuki Sankai, "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
 - 18) Hiroaki Kawamoto, Stefan Taal, Hafid Niniss, Tomohiro Hayashi, Kiyotaka Kamibayashi, Kiyoshi Eguchi, and Yoshiyuki Sankai "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
 - 19) 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
 - 20) 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
 - 21) 新宮正弘, 江口清, 山海嘉之, "バイオフィードバックを用いたポリオ経験者の筋神経系制御能力の改善とロボットスーツ HAL による麻痺肢動作支援", 日本機械学会誌(C編), 76 巻, 772 号, pp. 3630-3639, 2010
 - 22) Shiori Oshima, Yoshiyuki Sankai, "Development of Optical Sensing System for Noninvasive and Dynamic Monitoring of Thrombogenic Process", ASAI0 Journal 56(5):460-7, 2010
 - 23) 佐藤帆紡, 川畑共良, 田中文英, 山海嘉之, ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援, 日本機械学会誌(C編), 76 巻, 762 号, pp.227-235, 2010
 - 24) Hayato Koba, Kin-ichi Nakata, Yoshiyuki Sankai, "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
 - 25) S. Tsujimura, H. Yamagishi, Y. Sankai, "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, pp. 1746-1751, Nov., 2010
- 26) Kenta Suzuki, Gouji Mito, Hiroaki Kawamoto, Yasuhisa Hasegawa, Yoshiyuki Sankai, "Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patient with Robot Suit HAL", Climbing and Walking Robots, pp. 383-408, 2010
2. 関連する学会発表
(関連研究の成果を含む)
- 1) Yamawaki K, Kawamoto H, Nakata Y, Eguchi K, Sankai Y, Ochiai N. _Gait Training for a Spinal Canal Stenosis Patient using Robot Suit HAL -A Case Report-, 6th World Congress of the International Society of Physical & Rehabilitation Medicine (ISPRM) World Congress, Puerto Rico, 2011
 - 2) 山海嘉之, サイバニクスが切り開く人支援技術の現在と未来, 日本機械学会東北支部第47期周期講演会, 山形, 2011
 - 3) 山海嘉之, サイバニクスを駆使したロボットスーツHALの現状と近未来, 第29回ロボット学会学術講演会, 東京, 2011
 - 4) Sankai Y., Cyberrnica: fusion of human, machine and information system, The 7th Asian Conference on Computer-Aided Surgery (ACCA 2011), Bangkok, 2011
 - 5) 山海嘉之, 『新しい自立支援スタイルの提案』～介護福祉分野におけるロボットスーツHALの可能性～, 第18回社団法人日本介護福祉士会関東・甲信越ブロック大会, 水戸, 2011
 - 6) 山海嘉之, サイバニクスを駆使したHAL / サイバニックレグ最前線, 第18回日本義肢装具士協会学術大会, 大阪, 2011
 - 7) 山海嘉之, ハイテク時代の介護力: 介護ロボットHAL, 第26回老年精神医学会, 東京, 2011
 - 8) 山海嘉之, 温故知新「新」-次世代の医療機器に向けて-, 第86回日本医療機器学会大会, 横浜, 2011
 - 9) 長谷部浩二, 河本浩明, 松下明, 上林清孝, 山海嘉之, 人支援技術開発における臨床試験のためのガイドライン策定に向けた試み, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会, 225-228, 2010
 - 10) 河本浩明, 長谷部浩二, 上林清孝, 松下明, 山海嘉之. 人支援型ロボットの開発における段階的な臨床試験プロセスの提案. 第28回日本ロボット学会学術講演会, RSJ20101AC2J2-3, 2010.
 - 11) 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).
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) Shiori Oshima, Yoshiyuki Sankai, "Prediction of Thrombus Formation with Non-invasive Optical Monitoring System", 18th Congress of the International Society for Rotary Blood Pumps, October 2010, Berlin, Germany.
 - 16) Shiori Oshima, Tadashi Motomura, Yoshiyuki Sankai, and Yukihiko Nose', "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.
 - 17) 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.
- 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) Stefan Taal and Yoshiyuki Sankai,
“Practical Design of Full Body
Exoskeletons”, International
Conference on Biomedical
Electronics and Devices (BIODEVICES
2010) January 20-23, 2010, Valencia,
Spain
3. 著書
- 1) 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
- H. 知的財産権の出願・登録状況
(これまでの関連研究の成果を含む)
1. 関連する特許取得
 - 1) 発明の名称: 血流計測装置および血流
計測装置を用いた脳活動計測装置
出願人: 筑波大学
出願番号: 特願 2011-021936
 - 2) 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
 - 3) 発明の名称: 診断装置
出願人: 筑波大学
出願番号: 特願 2010-198554
 - 2 実用新案登録
該当なし。

III. 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
Kansaku, K	Brain-Machine Interfaces for persons with disabilities	Kansaku, K., Cohen, L.G.	Systems Neuroscience and Rehabilitation	Springer	Tokyo	2011	19-33
神作憲司	神経難病の生活を支援するBMI	江藤文夫・中馬孝容・葛原茂樹	「CLINICAL REHABILITATION」別冊: 神経難病疾患のリハビリテーション-ケーススタディーを通して学ぶ	医歯薬出版	東京		印刷中
Kansaku, K	The Intelligent Environment: Brain-Machine Interfaces for Environmental Control	Ferguson-Pell, M., Stefanov, D	Smart Houses: Advanced Technology for Living Independently	Springer	Berlin		in press

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Ikegami, S., Takano, K., Saeki, N., Kansaku, K.	Operation of a P300-based brain-computer interface by individuals with cervical spinal cord injury	Clinical Neurophysiology	122	991—996	2011
Takano, K., Hata, N., Kansaku, K.	Towards intelligent environments: an augmented reality-brain-machine interface operated with a see-through head-mount display	Frontiers in Neuroscience	5	60	2011
神作憲司	BMIによる環境制御とコミュニケーションの補助	ヒューマンインタフェース学会誌	13(3)	15-18	2011
神作憲司	神経画像手法のBMIへの応用	まぐね・日本磁気学会誌	6(4)	191-194	2011

神作憲司	BMI技術を利用した障害者自立支援	日本義肢装具学会誌	27(2)	80-83	2011
Oshima, S., Sankai, Y.	Development of Red Blood Cell- Photon Simulator for Optical Propagation Analysis in Blood using Monte Carlo Method,	IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine,	15(3)	356-363	2011
長谷部浩二, 河本浩明, 上林清孝, 松下明, 山海嘉之	段階的な臨床試験プロセスによる人支援型ロボット開発の提案	日本ロボット学会誌	29(3)	14-18	2011
山海嘉之, 鍋嶋厚太, 河本浩明	ロボットスーツHALの安全技術	日本ロボット学会誌.	29(9)	780-782	2011

IV. 研究成果の刊行物・別刷

特集記事 ブレイン・マシン・インタフェース特集

BMI による環境制御とコミュニケーションの補助

国立障害者リハビリテーションセンター研究所 神作 憲司

1. はじめに

脳からの信号を計測し、それを利用して機器操作を行い、コミュニケーションの補助、生活環境の制御、運動の補助などを行おうとする、「ブレイン・マシン・インタフェース (Brain-Machine Interface: BMI)」もしくは「ブレイン・コンピュータ・インタフェース (Brain-Computer Interface: BCI)」と呼ばれる新たなヒューマンインタフェースのための技術が注目されている^[1,2]。

BMIは、脳からの信号を測定する電極等を留置するために手術を必要とする『侵襲型』と、手術を必要としない『非侵襲型』に分類される。手術を必要とせず、非侵襲的に脳からの信号を測定する手法としては、脳波 (EEG)、陽電子断層撮影 (PET)、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、脳磁図 (MEG)、近赤外分光法 (NIRS) 等があげられる。脳波は、頭皮上の電極から比較的簡便に測定することができ、時間分解能も高いため、BMIで多く利用されている。これまで、脳波の空間分解能は低く、得られる情報に制限があり複雑な情報を引き出すことは難しいと考えられていたが、信号取得や解析の手法を工夫することでこうした点が改善されてきた。感覚運動の変換過程における脳波の周波数特性や、P300等の認知機能を反映する成分等が、脳波を用いたBMIの研究開発で着目されている。

本稿では、著者らの開発しているBMIに基づいた環境制御システム等を紹介しながら、BMIが患者・障害者の自立支援に貢献する可能性について論じていきたい。

2. BMIによるワープロと環境制御

2.1 視覚誘発性脳波の利用

著者らは、視覚刺激にて誘発された脳波信号をもとに、ワープロ文字入力およびデスク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や情報機器等の操作を行うシステムを開発した。このシステムでは、操作パネル上に配

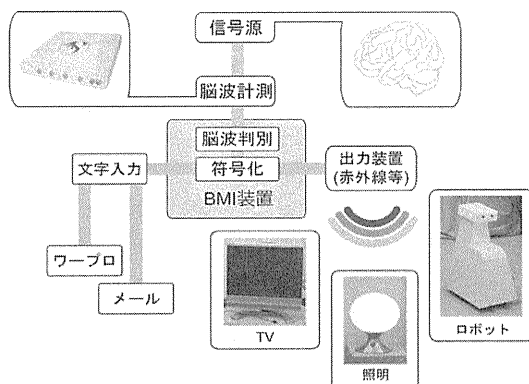


図1 BMIに基づいた環境制御システム概念図(文献13より改変)

置したアイコンや文字からなる視覚刺激を提示しながら、頭皮上に装着した脳波電極から信号を計測し、それを解析することで、提示したアイコンや文字のうちどれを注視しているのかを判別し、その特定されたコマンドを赤外線家電等の機器に送る。こうすることで、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が可能となる(図1)。

操作パネルとしては、Donchinらによって提案されたP300スペラー^[3]と呼ばれる方式を変更した。このP300スペラーでは、6×6マスのマトリクス上にアルファベットと数字を配置しており、マトリクス上のセルを1行または1列ずつ同時に強調表示するといった手法を用いることで、被験者が注視しているセルに特徴的な脳波信号を誘発し、これによって行と列をそれぞれ特定する。著者らは、C3/C4レベルの頸髄損傷により四肢麻痺のある障害者が、特段の訓練なしに本システムを操作可能であることを報告した^[4]。

2.2 視覚刺激の工夫

上記のBMI型環境制御システムを実用化するにあたり、機器の使用感や安全性、そして効率についても考慮する必要がある。Parraらは、緑と青の色変化がてんかんの発作に対してより安全と報告した^[5]。これに基づき著者らは、上記のシステムの操作精度を、従来の輝度変化および緑と青の色変化を用いて比較した。また、その使用感について視覚アナログスケールを用いた評価を行なった。課題としてはデスクライトの操作と平仮名の入力を行なった。

輝度変化および緑と青の色変化を用いて比較したところ、デスクライトの操作においては精度が輝度変化では平均53.8%であったのに対し、色変化では平均82.8%、平仮名の入力においては精度が輝度変化では平均51.7%であったのに対し、色変化では平均78.3%と、課題を問わず色変化を使用した場合に20%前後の精度の向上が有意に観察された。また被験者別に見た場合、輝度変化で特に低い精度を示した被験者で40%程度という顕著な精度の向上が観察された^[6]。また、使用感においても、色変化が有意に高い評価を得た^[7]。

さらに視覚刺激の与える影響を詳細に調査するべく、輝度変化、緑と青の等輝度での色変化、色と輝度の両方の変化の3条件を用意し、特段の訓練を行っていない被験者に対して、平仮名の入力15文字分を各条件で行なった。輝度変化の条件と等輝度色変化の条件では正答率に有意差は観察されなかったが、輝度変化の条件と色と輝度の両方を変化させる条件では、色と輝度の両方を変化させる条件において有意に高い正答率を示した^[8]。

2.3 背景脳活動の評価

各種神経画像手法を利用することで、BMI使用時の背景脳活動を評価する研究も並行した。特に著者らは、脳波と

機能的磁気共鳴画像法の同時計測手法 (EEG-fMRI) および脳磁図 (MEG) を利用した研究を行っている。

EEG-fMRI 実験の視覚刺激としては、P300 スペラーを改変したものを用い¹⁰⁾、被験者には、アルファベットと数字を表示した6×6マスのマトリクスよりなる操作パネル上の指定されたセルを注視する課題を与えた。輝度変化および緑と青の色変化を用いてそれぞれを比較した。各条件で21文字分の課題を行い、その間のfMRI信号およびEEG信号を計測した (EEG-fMRI)。その計測には、1.5TのMR装置およびMRI対応脳波記録システムを用いた。

fMRIでは、各条件において両側の後頭-頭頂領域に有意な活動を認めた ($P < 0.001$, uncorrected)。緑と青の色変化条件と輝度変化条件とを比較すると、後頭-頭頂領域が色変化条件でより強く活動していた ($P < 0.001$, uncorrected)。記録された脳波から、眼球運動、瞬きや撮像に伴う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解析したところ、fMRIにおいて色変化条件でより強く活動した脳領域にて両条件ともに刺激後300-600msに陽性波を認め、輝度変化条件と比較して色変化条件で有意に高い振幅を認めた ($P < 0.05$)⁹⁾。さらに著者らは、MEGに関しても同様の課題を用いた実験を行っており^{10), 11)}、こうしたBMI使用時の背景脳活動を評価する研究をもとに、システムのさらなる効率化へと繋げたいと考えている。

2.4 臨床評価用装置の開発

これまでの研究で、こうしたシステムの実用可能性が高いことが明らかとなってきた。しかし、実験に用いてきたBMIシステムは、コンピュータとして主に大型のデスクトップパソコンを使用しているため日常的に持ち運びをすることが困難であったり、またその取り回しも煩雑であった。これらを踏まえ著者らは、実用的な臨床評価用装置を開発した。装置はPCを含めてドック化し、取り回しの良いものとした。脳波計 (24bit, 1024Hz) は連結による拡張を可能とし、4ch, 8ch, 12chの3種類で構成できるように設計し、筋電スイッチ信号等他の生体信号入力端子を確保した。このシステムのソフトウェア部も独自に開発し、コミュニケーション機能として、日本語入力、電子メール、インターネット電話、ウェブブラウジング環境を実装した。また、着脱が容易で実用的な電極も試作した。そして、病院等障害の現場にこの装置を持ち込み、研究を展開している。

2.5 臨床評価研究

著者らは、まず頸髄損傷者を対象として、開発したシステムを実証評価する研究を行った。対象は頸髄損傷者10名と年齢・性別を合わせた対照健康者10名とした。実験には8×10マスに文字を配列した操作パネルを用い、これを輝度変化および緑と青の色変化の条件で強調表示した。脳波を頭皮電極から記録・解析し、被験者がどの文字を注視していたかを判別し、その正答率を評価した。その結果、頸髄損傷者群、対照群ともに緑と青の色変化の条件で高い操作精度が認められた。特に頸髄損傷者群で緑と青の色変化の条件では、その操作精度は90.7%に達した¹²⁾。頸髄損傷者はこのシステムを操作可能であり、さらに緑と青の色変化を導入することで操作精度が改善した。

さらに著者らは、意思決定が可能でもそれを出示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、視覚刺激によるBMI機器の操作精度の違い等を検討している。そして、これらの臨床評価研究から得られたデータを開発にフィードバックさせている。

3. 今後の展望

3.1 拡張現実 (AR) 技術の付加

こうしたこれまでに開発したBMI技術に基づき、脳からの信号で操作できるインテリジェントハウスの開発、さらにはインテリジェントホスピタルの開発へと展開させることも夢ではない¹³⁾ (図2)。その将来的な普及においては、使用可能なエリアの拡張が容易であることが望まれる。従来のBMI型環境制御システムでは、状況に合わせて適切な操作パネルを使用者に提示することは難しかった。そこで著者らは、環境 (位置や物) に情報を付与しそれを使用者に提示する技術である拡張現実 (Augmented Reality: AR) とBMI技術とを融合させ、環境に応じて操作パネルを提示可能な『AR-BMI技術』を開発した。これを利用することでシステムが環境に応じた情報を取得し、それに合わせたBMI用操作パネルを使用者に提示することが可能となる。

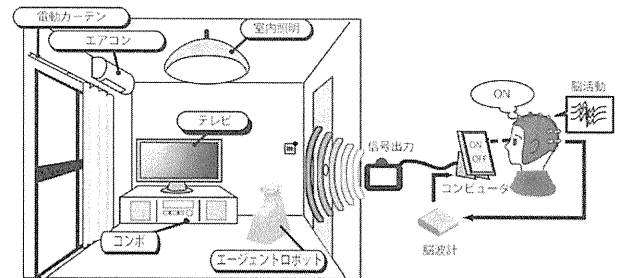


図2 インテリジェントハウスの概念図 (文献13より改変)



図3 HMDを用いたAR-BMI (文献14より改変)

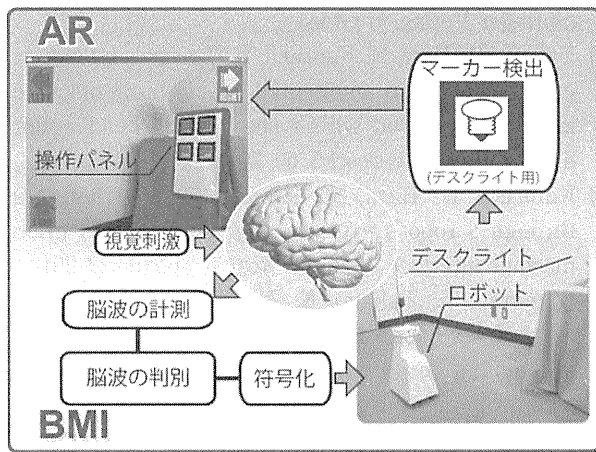


図4 エージェントロボットを用いたAR-BMI(文献15より改変)

著者が開発したシステムでは、操作すべき対象に対して関連付けられたARマーカを使用者が身に付けたカメラで認識することで、対象に合わせた操作パネルが提示される(図3)。このシステムを用いて、健常者(15名)を対象としてテレビの操作を行わせる実験を行い、その操作精度を評価した。操作パネルは、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)もしくは液晶モニターを通して提示した。その結果、HMDを用いた場合に82.7%、液晶モニターを用いた場合に88%の操作精度が得られた。HMDを用いた場合でも液晶モニターを用いた場合と同様に操作が可能であることが示された。また、頭のどの部分から計測した脳波信号が精度の向上に寄与しているかを調べたところ、後頭・頭頂領域からの信号が精度向上に高く寄与していることも見いだされた^[14]。

さらに著者は、これを応用し、アイカメラをつけたエージェントロボットを介するAR-BMIシステムも構築した(図4)。このシステムでは、BMIにより制御可能なエージェントロボットのアイカメラがARマーカを認識すると、そのARマーカに関連付けられた家電等の操作パネルが提示される。すなわち、本システムを用いることで、操作者が移動しなくても、ロボットを代理として移動させ、隣室など、ネットワーク上にある離れた空間の操作対象を制御できるようになる。このシステムを使用した実験において、ロボットの制御とデスクライトの操作を各15回ずつ行なったところ、ロボットの制御で90.0%、デスクライトの操作で80.7%の精度で動作が可能であった^[15]。

3.2 各種BMI手法の組み合わせ

これまでに紹介したP300課題を用いたシステムにマスタースイッチを用意することを試み、右上肢の運動イメージに伴う脳波変化を検出する機構を組み込んだ^[16]。このシステムは適切に動作したが、運動イメージによるマスタースイッチを安定的に操作するためには、事前にかかりの訓練をする必要があった。このため、もう一つのマスタースイッチとして定常視覚誘発電位(SSVEP)の検出機構を追加した。SSVEPの惹起には、チェッカーボード状に配列された緑と青の発光ダイオード(LED)が特定の周波数で交替して明滅する視覚刺激を用いた。実験中、明滅周波数

の第二高調波の近傍に脳波信号のパワーの増加が観察された。この実験にそれまで参加したことのなかった健常者は、このSSVEPを用いたマスタースイッチを特段の訓練をすることなく操作することができた^[17]。特段の訓練を必要としないSSVEP方式を用いることによって、容易にマスタースイッチを操作することが可能となった。

3.3 運動の補助へ向けて

BMIの今後の展開に関して注目されているものの一つとして、脳からの信号を利用して運動の補助を行う取り組みがある。Pfurtschellerらは、左肘の屈曲運動のみ残されたC4/5レベルの頸髄損傷者が、数か月の訓練ののちに、両足の運動イメージで左手の装具を閉じ、右手の運動イメージで装具を開くことがほぼ100%の精度で可能となったと報告した^[18]。

著者らの研究室でも、これまでに開発したBMI技術を発展させ、脳からの信号で駆動可能であり、かつ作業療法様の合目的動作の補助を可能とする上肢アシストスーツ(BMI/BCI based Occupational Therapy-Assist Suit:『BOTAS』)を開発している。これまで、上肢アシストスーツの駆動に用いるBMI手法として、P300様脳波、運動イメージに伴う脳波、SSVEPを使用可能とした。P300様脳波を用いたシステムでは、患者・障害者にアシストスーツで実現したい運動の選択を行わせることで、意図により「握る」等の動作を駆動することに成功させた^[19]。SSVEPを用いたシステムでは、アシストスーツ近傍に設置した発光ダイオード(LED)を注視することで他動運動(手掌を開く・閉じる等)を駆動させることができる^[20]。必要に応じて各種BMI手法をうまく組み合わせ、効率的なシステムの構築を目指したい。

現状ではまだ日常生活での使用に耐えうるものではないが、患者・障害者を対象とし、作業療法的なりハビリテーションへの応用を想定した実験を開始している。脳からの信号を取り出して上肢アシストスーツにつなぎ、さらに同機器からの信号を脳にフィードバックするといった閉回路を作成することで、適切な可塑性を誘発することが期待されている^[21]。

4. おわりに

近年、脳情報を活用したヒューマンインタフェースのための技術であるBMIが脚光を浴び様々な研究開発がなされている。これまで「脳を知る」といった研究の方向性を中心であったシステム脳神経科学も、このBMIというテーマで応用への道を見出しつつある^[22]。BMI技術の応用・実用化には、医学、工学などの、分野間のこれまで以上の連携が不可欠と考えられる。また、応用・実用化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だろう。

BMI技術をさらに研究開発していくことで、外傷や神経難病などにより発話の困難や四肢の運動麻痺を伴い、コミュニケーションや日常動作に支障をきたしている患者・障害者の自立支援へとつなげたい。

参考文献

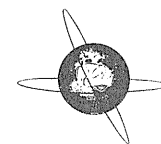
- [1] 神作憲司: ブレイン・マシン・インターフェイスによる福祉機器の新たな展開. *Journal of Clinical Rehabilitation* 16, pp.891-895, 2007.
- [2] Birbaumer, N. & Cohen, L.G.: Brain-computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis. *Journal of Physiology* 579, pp.621-636, 2007.
- [3] Farwell, L.A., Donchin, E.: Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 70, pp.510-523, 1988.
- [4] Komatsu, T., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K.: A non-training EEG-based BMI system for environmental control. *Neurosci Res Suppl* 61, S251, 2008.
- [5] Parra, J., Lopes da Silva, F.H., Stroink, H., Kalitzin, S.: Is colour modulation an independent factor in human visual photosensitivity? *Brain* 130, pp.1679-1689, 2007.
- [6] Takano, K., Komatsu, T., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K.: A non-training BMI system for environmental control: a comparison between white/gray and green/blue flicker matrices Neuroscience Meeting Planner. Washington, DC: Society for Neuroscience, 2008. Online. Program No. 863.9, 2008.
- [7] Takano, K., Ikegami, S., Komatsu, T., Kansaku, K.: Green/blue flicker matrices for the P300 BCI improve the subjective feeling of comfort. *Neurosci Res Suppl* 65, S182, 2009.
- [8] Takano, K., Komatsu, T., Hata, N., Nakajima, Y., Kansaku, K.: Visual stimuli for the P300 brain-computer interface: a comparison of white/gray and green/blue flicker matrices *Clin Neurophysiol* 120, pp.1562-1566, 2009.
- [9] 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. Neuroscience Meeting Planner. San Diego: Society for Neuroscience, 2010. Online. Program No. 688.13, 2010.
- [10] Takano, K., Kansaku, K.: Neuromagnetic activities during the P300-BCI: a comparison of white/gray and green/blue flicker matrices. Neuroscience Meeting Planner. Chicago: Society for Neuroscience, 2009. Online. Program No. 664.21, 2009.
- [11] Takano, K., Sekihara, K., Iwaki, S., Kansaku, K.: Mapping functional connectivity during P300-BCI: an MEG study. Neuroscience Meeting Planner. Washington, DC: Society for Neuroscience, 2011. Online. (in press).
- [12] Ikegami, S., Takano, K., Saeki, N., Kansaku, K.: Operation of a P300-based brain-computer interface by individuals with cervical spinal cord injury. *Clin Neurophysiol* 122, pp.991-996, 2011.
- [13] Kansaku, K.: Brain-Machine Interfaces for persons with disabilities. in *Systems Neuroscience and Rehabilitation* (eds. Kansaku, K. & Cohen, L.G.) (Springer Verlag, in press).
- [14] Takano, K., Hata, N., Kansaku, K.: Towards intelligent environments: an augmented reality-brain-machine interface operated with a see-through head-mount display. *Front Neurosci* 5, 60, 2011.
- [15] Kansaku, K., Hata, N., Takano, K.: My thoughts through a robot's eyes: an augmented reality-brain machine interface. *Neurosci Res* 66, pp.219-222, 2010.
- [16] Komatsu, T., Takano, K., Nakajima, Y., Kansaku, K.: A BMI based environmental control system: a combination of sensorimotor rhythm, P300, and virtual reality. Neuroscience Meeting Planner. Chicago: Society for Neuroscience, 2009. Online. Program No. 360.14, 2009.
- [17] Ora, H., Komatsu, T., Nakajima, Y., Kansaku, K.: A BMI based environmental control system: a combination of sensorimotor rhythm, P300 and SSVEP. Neuroscience Meeting Planner. Washington, DC: Society for Neuroscience, 2011. Online. (in press).
- [18] Pfurtscheller, G., Guger, C., Muller, G., Krausz, G., Neuper, C. Brain oscillations control hand orthosis in a tetraplegic. *Neurosci Lett* 292, pp.211-214, 2000.
- [19] Komatsu, T., Takano, K., Ikegami, S., Kansaku, K.: A development of a BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities. Neuroscience Meeting Planner. San Diego: Society for Neuroscience, 2010. Online. Program No. 295.9, 2010.
- [20] Sakurada, T., Takano, K., Kansaku, K.: A BCI-based OT-assist suit for paralyzed upper extremities: a combination of sensorimotor rhythm, P300 and SSVEP. Neuroscience Meeting Planner. Washington, DC: Society for Neuroscience, 2011. Online. (in press).
- [21] 神作憲司: オーバービュー: 神経科学からみた片麻痺の手の治療. *Journal of Clinical Rehabilitation* 16, pp.909-912, 2007.
- [22] 川人光男: ブレイン・ネットワーク・インターフェイスによる操作脳科学. *生体の科学* 57, pp.315-322, 2006.

著者紹介



神作 憲司 (かんさく けんじ):

千葉大学医学部卒業。脳神経外科医師として勤務後、同大学院医学研究科修了、博士号取得。米国立衛生研究所(NIH) 上級客員研究員などを経て2006年より国立障害者リハビリテーションセンター研究所・感覚機能系障害研究部・感覚認知障害研究室長、2010年より脳機能系障害研究部・脳神経科学研究室長。専門はシステム脳神経科学、神経画像。



Operation of a P300-based brain–computer interface by individuals with cervical spinal cord injury

Shiro Ikegami^{a,b}, Kouji Takano^a, Naokatsu Saeki^b, Kenji Kansaku^{a,*}

^a Cognitive Functions Section, Department of Rehabilitation for Sensory Functions, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Tokorozawa, Saitama 359-8555, Japan

^b Department of Neurological Surgery, Chiba University Graduate School of Medicine, Chiba 260-8670, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Accepted 23 August 2010

Available online 28 September 2010

Keywords:

BCI

BMI

P300

Chromatic change

Cervical spinal cord injury

HIGHLIGHTS

- This study evaluates the efficacy of a P300-based BCI for individuals with cervical spinal cord injury (SCI).
- Two distinct types of visual stimuli, white/gray and green/blue, in an 8 × 10 flicker matrix were used.
- The P300 BCI with the green/blue flicker matrices is effective for use not only in age- and sex-matched able-bodied controls, but also in individuals with cervical SCI.

ABSTRACT

Objective: This study evaluates the efficacy of a P300-based brain–computer interface (BCI) with green/blue flicker matrices for individuals with cervical spinal cord injury (SCI).

Methods: Ten individuals with cervical SCI (age 26–53, all male) and 10 age- and sex-matched able-bodied controls (age 27–52, all male) with no prior BCI experience were asked to input hiragana (Japanese alphabet) characters using the P300 BCI with two distinct types of visual stimuli, white/gray and green/blue, in an 8 × 10 flicker matrix. Both online and offline performance were evaluated.

Results: The mean online accuracy of the SCI subjects was 88.0% for the white/gray and 90.7% for the green/blue flicker matrices. The accuracy of the control subjects was 77.3% and 86.0% for the white/gray and green/blue, respectively. There was a significant difference in online accuracy between the two types of flicker matrix. SCI subjects performed with greater accuracy than controls, but the main effect was not significant.

Conclusions: Individuals with cervical SCI successfully controlled the P300 BCI, and the green/blue flicker matrices were associated with significantly higher accuracy than the white/gray matrices.

Significance: The P300 BCI with the green/blue flicker matrices is effective for use not only in able-bodied subjects, but also in individuals with cervical SCI.

© 2010 International Federation of Clinical Neurophysiology. Published by Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Brain–computer interfaces (BCI) or Brain–machine interfaces (BMI) are devices that use neurophysiological brain signals to control external computers or machines (Wolpaw et al., 2002; Daly and Wolpaw, 2008; Kansaku, in press). One approach to using these devices, invasive BCI, relies on electrical signals recorded directly from the cortical surface (electrocorticograph; ECoG) or a single neuron (unit recording) (Kennedy et al., 2000; Leuthardt

et al., 2004; Hochberg et al., 2006). The other approach, non-invasive BCI, uses electrical signals from the brain in the absence of surgery. The primary approach for non-invasive BCI is electroencephalography (EEG), where neurophysiological signals are recorded from an array of scalp electrodes.

Several types of electrical brain activity have been proposed for controlling EEG-based BCI. These include sensorimotor rhythm, slow cortical potential, steady state visual evoked potential, and P300 event-related potential. If the chosen communication system results in more than 70% correct responses, it has potential for practical use as a BCI system in people with disabilities (Sellers et al., 2006; Kübler and Birbaumer, 2008; Nijboer et al., 2008). Some BCI systems have already reached this level. Thus, BCI systems based on P300 signals were tested in patients with amyotrophic lateral sclerosis (ALS) and other diseases either in a laboratory

* Corresponding author. Address: Cognitive Functions Section, Department of Rehabilitation for Sensory Functions, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, 4-1 Namiki, Tokorozawa, Saitama 359-8555, Japan. Tel.: +81 4 2995 3100x2573; fax: +81 4 2995 3132.

E-mail address: kansaku-kenji@rehab.go.jp (K. Kansaku).

setting (Piccione et al., 2006; Sellers and Donchin, 2006; Hoffmann et al., 2008) or the patient's home (Nijboer et al., 2008). The majority of subjects used in these studies were patients with ALS, and no studies have examined age- and sex-matched controls for comparison.

Our research group recently developed a BCI system for environmental control and communication (Komatsu et al., 2008; Kansaku et al., 2010), in which we applied several flicker panels that were modified from the "P300 speller" (Donchin et al., 2000), which uses P300-like evoked signals. We previously reported that a male volunteer quadriplegic SCI (C3/C4) patient successfully controlled our device without significant training (Komatsu et al., 2008). However, we sought to develop better visual stimuli because the white/gray flicker stimuli used could possibly induce discomfort or seizures, particularly in subjects with a history of epilepsy. Parra et al. evaluated the safety of chromatic combinations for those with photosensitive epilepsy (Parra et al., 2007). Five single-color stimuli (white, blue, red, yellow, and green) and four alternating-color stimuli (blue/red, red/green, green/blue, and blue/yellow with equal luminance) of four frequencies (10, 15, 20, and 30 Hz) were used as the visual stimuli. Under white stimulation, flickering stimuli with higher frequencies, especially those greater than 20 Hz, have been found to be potentially provocative. Under the alternating-color stimulation condition, as suggested by the Pokemon incidence, the 15-Hz blue/red flicker was the most provocative. It is noteworthy that the green/blue chromatic flicker emerged as the safest and evoked the lowest rates of EEG spikes. Accordingly, we used the green/blue chromatic combination for the visual stimuli used to elicit visually evoked responses (Takano et al., 2009b). We prepared a white/gray flicker matrix for the luminance flicker, a green/blue isoluminance flicker matrix for the chromatic flicker, and a green/blue luminance flicker for the luminance and chromatic flicker. We applied the experiments to the able-bodied subjects, and showed that accuracy rates were significantly higher in response to the luminance chromatic flicker condition than in response to the luminance or chromatic flicker condition. We also found that the green/blue luminance flicker matrices significantly improved subjective feelings of comfort in able-bodied subjects compared to the white/gray flicker matrices (Takano et al., 2009a).

This study focuses on the efficacy of the P300 BCI in individuals with chronic cervical SCI, who are potential users of the system (Daly and Wolpaw, 2008). We compared individuals with chronic cervical SCI and age- and sex-matched able-bodied controls. Subjects had no prior experience with the P300 BCI and were required to input hiragana (Japanese alphabet) characters using our P300 BCI system using either white/gray or green/blue luminance flicker matrices. We show that the P300 BCI with the green/blue flicker matrix is effective not only for use in able-bodied subjects, but also in individuals with cervical SCI.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Ten individuals with chronic cervical SCI (age 26–53, mean 41.9, all male) with no prior experience with BCI devices were recruited as participants. The mean time since SCI was 18.2 years (range, 5.5–29.2 years). Five individuals were diagnosed with complete tetraplegia according to the American Spinal Injury Association (ASIA) impairment scale (Maynard et al., 1997) (summarized in Table 1). All of the SCI patients had severe upper extremity dysfunction and needed the help of caregivers to use appliances for emailing and other tasks, and most needed Alternative Augmentative Communication (AAC) devices (e.g., mouth stick). All SCI subjects were outpatients and visited the laboratory in wheelchairs. In addition, 10 age- and sex-matched able-bodied controls (age 27–52, mean 42.1, all male) with no prior experience with BCI devices were recruited. This study was approved by the Institutional Review Board, and all subjects provided written informed consent according to institutional guidelines.

3. Experimental procedure

We modified the so-called P300 speller (Farwell and Donchin, 1988). The P300 speller uses the P300 paradigm and involves the presentation of a selection of icons arranged in a matrix. According to this protocol, the participant focuses on one icon in the matrix as the target, and each row/column, or a single icon of the matrix is then intensified in a random sequence. The target stimuli are presented as rare stimuli (i.e., the oddball paradigm). We elicited P300 responses to the target stimuli and then extracted and classified these responses with respect to the target.

All subjects sat approximately 100 cm away from a liquid crystal display that displayed a flicker matrix and input window (Fig. 1). SCI subjects used their own wheelchair, and control subjects sat in a desk chair. We prepared an 8×10 hiragana matrix for the P300 speller, modified from a 6×6 matrix using the English alphabet (Takano et al., 2009b). We used two types of intensification/rest flicker conditions, white/gray and green/blue. Luminance was measured using a chromatic meter (CS-200, Konica Minolta Sensing Inc., Osaka, Japan), and was 20 cd/cm(white)/6.5 cd/cm(gray), and 20 cd/cm(green)/6.5 cd/cm(blue), for each condition. The duration of intensification (green or white) was 100 ms, and that of rest (blue or gray) was 75 ms (Blankertz et al., 2006; Sellers et al., 2006). Each row and column of the matrix was intensified once per sequence in random order and, according to the P300 paradigm, the target stimuli were presented as rare stimuli (i.e., the oddball paradigm). One complete cycle of eight row and ten column intensifications constituted a sequence. Online performance

Table 1
Summary of spinal cord injury subjects.

	Age	Sex	Level of SCI at injury	Time since injury (years)	ASIA impairment Scale	
SCI	37	M	C3/4	16.3	Incomplete	
	45	M	C2/3	5.5	Complete	
	43	M	C5/6	25.3	Complete	
	40	M	C4/5	15.9	Incomplete	
	42	M	C4/5	10.4	Complete	
	37	M	C3/4	20.5	Incomplete	
	48	M	C4/5	27.1	Complete	
	48	M	C5/6	21.8	Incomplete	
	26	M	C4/5	9.9	Complete	
	53	M	C5/6	29.2	Incomplete	
	Mean	41.9			18.2	

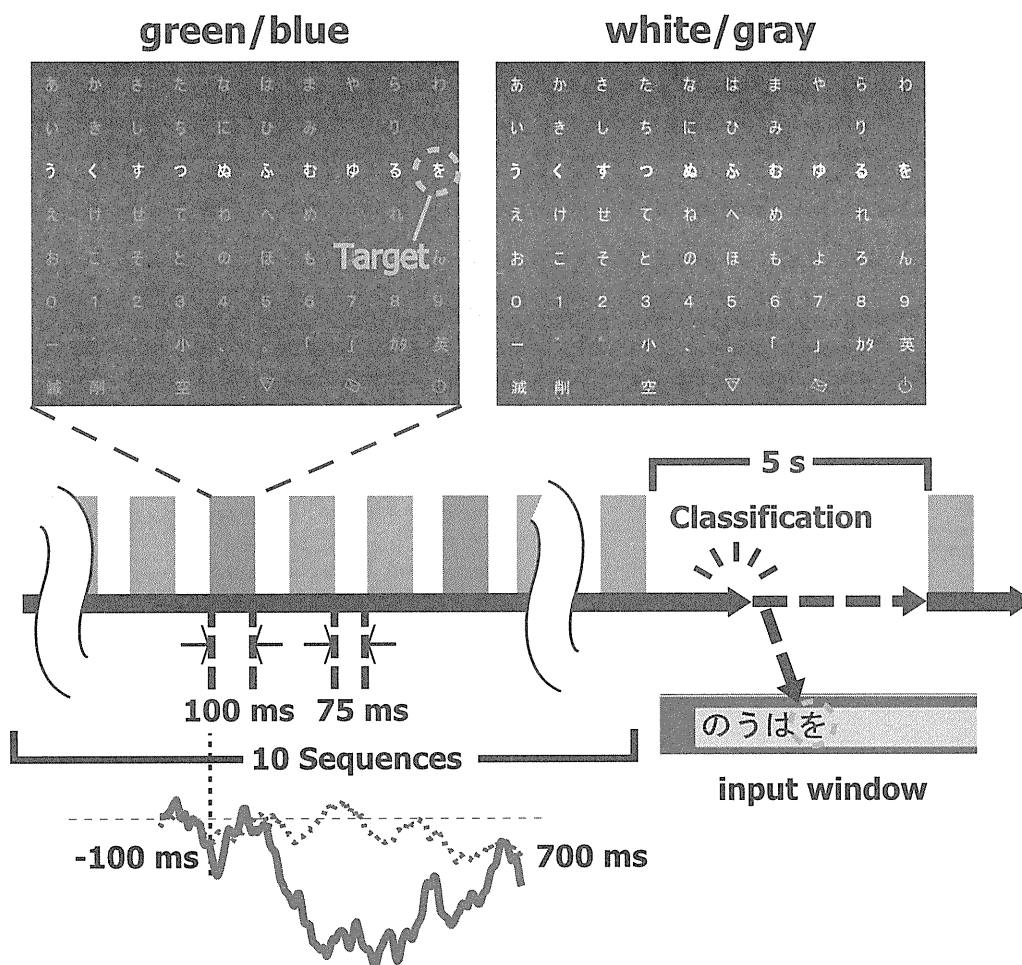


Fig. 1. Task timing for hiragana spelling. Two types of matrix were presented (white/gray and green/blue). The stimulus onset asynchrony was 175 ms, consisting of 100 ms intensification and 75 ms rest. EEG data were collected and used for classification over 10 sequences (180 intensifications). Averaged ERP data (Pz) of the SCI group for the green/blue condition are shown in red (target: thick line, non-target: dotted line).

was evaluated, and each letter was selected in a series of 10 sequences (180 intensifications for each hiragana character).

We first collected EEG data to derive feature vectors for the subsequent test session. All subjects were instructed to attend to six successive letters of the matrix under each condition (training session). In the test session, using the feature vectors, all subjects were required to input 15 letters from the 8×10 hiragana matrix under each flicker condition. The order of the experimental conditions (white/gray or green/blue flicker matrix) was counterbalanced between subjects.

3.1. EEG recording and analysis

Eight-channel (Fz, Cz, Pz, P3, P4, Oz, PO7, and PO8) EEG data were recorded with a g-Tec cap and g.USBamp acquisition system (Guger Technologies OEG, Graz, Austria) (Krusienski et al., 2008; Takano et al., 2009b). EEG signals were band-pass filtered (0.1–50 Hz), digitized at 256 Hz, and stored. All channels were referenced to Fpz and grounded to AFz. Recorded EEG data were downsampled to 21 Hz for analysis. A total of 800 ms of EEG data were segmented according to the timing of flash onset. The first 100 ms, occurring just prior to flash onset, was used for baseline correction, and the remaining 700 ms was used for classification. In the training session, feature vectors were derived for each condition (white/gray and green/blue). During the test session, using these feature vectors, target and non-target characters were discriminated using Fisher's linear discriminant analysis. The result

of this classification, as the maximum of the summed scores for the each row and column, was used to determine the icon to which the subjects were attending. The intersection of the calculated row and column was regarded as the target.

During online performance, the percentage of characters entered correctly was defined as the classification accuracy and was also translated into bit rate (Wolpaw et al., 2002). Correlations between SCI subjects' accuracy and their demographic characteristics (age, time since injury, ASIA impairment scale score) were evaluated using Spearman's rank correlation coefficient. The effects of patient group (SCI vs. control) and type of flicker matrix (white/gray vs. green/blue) on online accuracy were examined using two-way repeated-measure analysis of variance (ANOVA).

For offline analysis, the accuracy for each sequence was calculated. The effects of subject group (SCI vs. control), type of flicker matrix (white/gray vs. green/blue), and sequence on accuracy in each sequence were evaluated by three-way repeated-measure ANOVA followed by post hoc paired *t*-tests with Bonferroni correction.

4. Results

4.1. Online performance

All subjects completed the 15-letter spelling task in both the white/gray and green/blue conditions. The mean online accuracy of all subjects was 82.7% for the white/gray condition and 88.3% for the green/blue condition. Under the white/gray condition, the