

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560284

研究課題名(和文) 触覚・聴覚反応に基づく視覚障害者へのリアルタイム適応型情報保障支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a real-time adaptive information security support system to the visually impaired person, based on the sense of touch and hearing reaction.

研究代表者

精山 明敏 (Seiyama, Akitoshi)

京都大学・医学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70206605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では触覚・聴覚系のヒューマンパフォーマンスモデルを構築し、触覚・聴覚反応に基づく視覚障害者へのリアルタイム・フィードバックシステムによる、全盲視覚障害者へのリアルタイム適応型情報保障支援システムの開発を目指した。健常者、健常者の擬似盲および全盲者の協力を得て、剪断力による2.5次元触覚提示法を実装したタッチパネルにて提示された仮想的な形状とアクリル素材で作成した実際の形状のなぞり実験を行い、マグニチュード推定法による内観報告と近赤外光脳機能計測装置(NIRS)による信号量の変化ならびにfMRIの結果とを比較し、触覚感覚の定量化・規格化とさらにフィードバックシステムの試作をおこなった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we aimed to build a real-time feedback system for the visually impaired persons by constructing a human performance model of the tactile, auditory system. The system is based on the sense of touch and hearing reaction and aimed to support real-time adaptive information to the visually impaired persons. By using NIRS and fMRI, we measured neural responses of the healthy, pseudo-blind healthy, and blind subjects during tracing experiment using the actual stimuli of acrylic material, and the mimic stimuli caused by the touch panel that implements the 2.5-dimensional tactile presentation method by shear force. Then, we quantified and standardized the tactile sensation. Further, based on the present results, we developed a prototype of a real-time feedback system based on the sense of touching.

研究分野：医用工学

キーワード：視覚情報処理 バイオフィードバック NIRS fMRI

### 1. 研究開始当初の背景

今回私が提案した研究課題と類似する技術に、脳波計測や NIRS さらに機能的 MRI などを用いたブレイン・マシン・インターフェイス (BMI) の開発があった。この BMI 開発の現状は、運動系 BMI と感覚系 BMI の二つに分けられ、前者では島津製作所やホンダが参画して ATR では NIRS を用いた運動機能障害者を対象とした運動の介助システムの開発や、筑波大学と日立製作所のパワースーツの開発、理化学研究所では EEG による車椅子の運動制御システムの開発がある。

一方、後者には、視覚障害者を対象に、南カリフォルニア大学 (米)、チュービンゲン大学 (ドイツ)、オプトバイオニクス社 (米) など欧米での、CCD や人工網膜等を用いた技術開発が行われており、我国でも大阪大学や東北大学などで検討が進められているが、障害者は外科的手術によるデバイスの埋め込みが必要であり、安全性やシステムの耐久性の面からも研究途上の技術であった。

今回私が提案した技術は、従来の BMI 技術開発のような直接的な外部情報の感覚器官への情報入力を工夫するといった技術開発とは異なり、現行の BMI 技術では対応できない感性情報の認知・伝達の問題について対応可能な適応型情報保障支援システムの開発を目指した。

### 2. 研究の目的

本研究提案では、我々がこれまでに行ってきた、NIRS を用いた感覚系の脳活動信号の高精度検出化ならびに、視覚障害者 (特に先天盲) が聴覚と触覚でどのように対象を把握しているか推し量る研究を発展させ、NIRS を用いた感覚系の無侵襲 BMI の開発を主テーマとして取り組むことにより、従来の BMI 技術開発のような直接的な外部情報の感覚器官への情報入力を工夫するといった技術開発ではなく、

- 1) 障害者がいまどのような心理状態にいるのか、
- 2) 見えない人は、いま聞いている、触っている対象をどれくらい理解できているかが説明できない、
- 3) そのまわりにいる人はその対象をどれくらい理解できているか分からない、だから、
- 4) 情報を付加するにせよ手助けするにせよ、これまでは適応的にできなかった、

など、現行の BMI 技術では対応できない感性情報の認知・伝達の問題について対応可能な適応型情報保障支援システムの開発を目的とし、具体的には近赤外光脳機能計測装置 (NIRS) を用いた触覚反応に基づくリアルタイム・フィードバックシステムを構築し、全盲視覚障害者の知覚状態に応じたリアルタイム適応型情報保障支援システムへの応用を目指した。

### 3. 研究の方法

触覚フィードバック方式として、触覚における錯覚を利用し、仮想的な凹凸刺激を実現する剪断力による 2.5 次元触覚提示法が Saga, et al. により提案されている [1-4]。本研究では Saga (嵯峨) らより提供を受けたこの剪断力による 2.5 次元触覚提示法を実装したタッチパネルにて提示された仮想的な形状とアクリル素材で作成した実際の形状のなぞり実験を行い、マグニチュード推定法による内観報告と近赤外光脳機能計測装置 (NIRS) による NIRS 信号量の変化ならびに Blood Oxygen Level Dependent fMRI (BOLD-fMRI) 法と比較し、触覚感覚の定量化・規格化とさらにフィードバックシステム構築の試みをおこなった。

図 1 および図 2 に嵯峨らより提供を受けた剪断力による 2.5 次元触覚提示法を実装したタッチパネルとアクリル素材で作成した実際の形状の模型を示す。



図 1. 2.5 次元触覚ディスプレイ (文献 1～4 を参照)

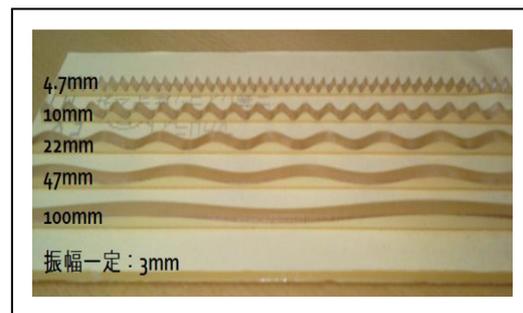


図 2. アクリル模型 (図 1 のディスプレイ中の濃淡で表した 5 つのサイン波形と同じ空間波長を持つ)

実験では、各条件下でのなぞり運動における脳機能計測のため、21-26 歳の男女 12 名の被験者 (全員右利き) にピンクノイズを聞かせた状態で右手人差し指で左右になぞり運動を行ってもらった。被験者を半数に分け 2 つのグループを作成した。一方を開眼状態の後閉眼状態でなぞり運動を行う “開→閉グループ” とし、もう一方を閉眼状態の後開眼状

態で同様の運動を行ってもらい“閉→開グループ”とした。なぞり運動として、仮想刺激である図1に示した触覚提示タッチパネルもしくは、実刺激である図2に示した実形状の亚克力模型（約120 mm）の上で、速度統制のためのメトロノーム音に合わせて1 Hz程度で往復運動をしてもらい、「静止10秒+なぞり10秒+静止10秒」を1セットとして計10セットなぞり運動してもらった。

#### 4. 研究成果

提案装置により奥行き方向の凹凸表現が可能であること、剪断力の制御により空間波長の違いによらず定量的な奥行き提示が提示可能であることを確認している[1-4]。しかしマグニチュード推定法では被験者へのインタビューを用いるため、心理的な要因を排除した実験が困難である。そこで本研究は提示された刺激に対する反応を心理的要因が排除された形で客観的に評価することを目的とし、近赤外分光法（NIRS）を用いてなぞり運動中の脳活動を計測し、得られたデータを分析した。具体的にはなぞり動作前となぞり動作中の間の脳機能の賦活状態変化を対象に下記の4点について検定を用いて検証した。

- A) 脳機能の賦活状態変化での領野間の違いの有無
- B) 脳機能の賦活状態変化での短波長と長波長による違いの有無
- C) 脳機能の賦活状態変化での仮想，実刺激条件の違いの有無
- D) 脳機能の賦活状態変化での開閉順序条件の違いの有無

まず、空間波長4.7, 10, 22, 47 mmの4種類の仮想刺激（タッチパネル）と実刺激（以下、亚克力模型）を用い、マグニチュード推定法とNIRSを用いて、

(1) 主観的アンケート結果と運動野および感覚野の脳活動の間に正の線形相関が見られることがわかった（図3）。この相関は閉眼時に強く現れ開眼時には相関がなくなることが認められた。

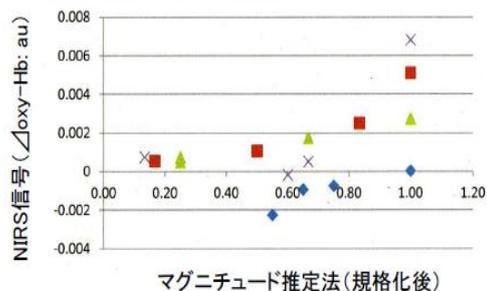


図3. 閉眼時の左運動野のNIRS信号とマグニチュード推定法による感覚値の相関（記号の違いは被験者の違いを表している。）

(2) 空間波長との脳活動の関係では亚克力模型とタッチパネルの間で被験者ごとに反応のパターンは異なるが同様の反応が認められることを確認した（図4）。

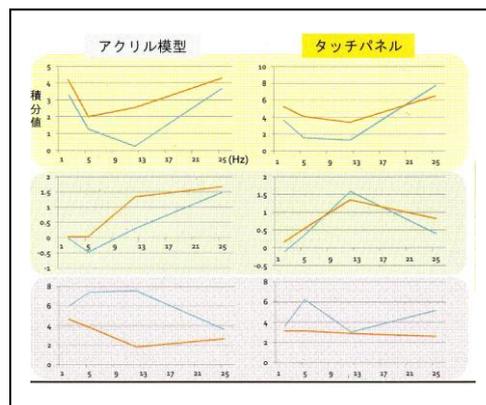


図4. NIRSによる脳活動変化（亚克力模型とタッチパネルの比較）。縦軸はNIRS信号値（ $\Delta$ oxyHbの積分値）横軸は空間周波数を示す。青いラインは運動野を赤ラインは体性感覚野の変化を示す。

次に、NIRS測定をより詳細におこなうために仮想刺激、実刺激共に、空間波長4.7 mm（以後、短波長と定義）及び空間波長47 mm（以後、長波長と定義）の2つを用いて、波形形状を交互に計10セットなぞり運動してもらった。図5にはNIRSによる測定部位を示している。なお、閉眼状態における波長間の移動は実験者の誘導により行った。

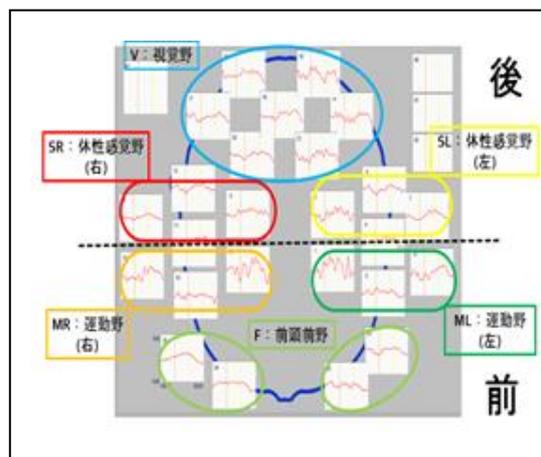


図5. NIRS計測部位

#### A) 領野間の反応差検証の結果

4条件（例：亚克力模型-閉眼）それぞれにつき領野に順位を付け、領野間に反応差がないという帰無仮説のもとフリードマン検定を行い(A) 領野間の検証を行ったものを表1に示した。有意差が見られたものの中で、長波長(全)と短長両波長の閉→開グループではML（左運動野）、SL（左体性感覚野）の脳活動信号値が1.0前後であり、他領野では条件によっては高い信号値も見

受けられるが大部分が 1.0 に満たない。これは右人差し指からの触覚入力による左運動及び感覚野の賦活による血流増加が、他の領域に対し大きいことを示している。また表 1 を順位付けして検討した結果では、全被験者平均において ML, SL の次点が V (視覚野) でありこの脳活動信号値は F (前頭前野), MR (右運動野), SR (右体性感覚野) と比較して高いため、触覚の入力により視覚野も一定の活性化が起こっており、触覚と視覚になんらかの相互作用が働いている可能性が考えられた (特に、閉眼時)。この結果は、これまでに報告されている全盲者の点字読み取り中の PET や fMRI を用いた視覚野の活動の検出報告 [5, 6] との関係が示唆される。

表 1 正規化脳活動信号 ( $\Delta$ oxy-Hb) 平均値

(a)全被験者・短							
短波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	1.027	0.485	1.000	0.649	1.209	0.543
	閉	2.208	0.951	1.000	0.921	1.456	1.445
タッチパネル	開	0.879	0.278	1.000	0.654	0.952	0.874
	閉	0.494	0.791	1.000	0.242	0.895	0.593
(b)全被験者・長							
長波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	0.121	0.928	1.000	0.181	0.832	0.651
	閉	1.506	-0.150	1.000	-2.199	0.828	-0.210
タッチパネル	開	0.839	-1.178	1.000	-2.108	1.086	-0.986
	閉	0.547	0.290	1.000	0.438	1.864	0.476
(c)開→閉グループ・短							
短波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	1.703	0.140	1.000	0.651	1.422	0.614
	閉	3.995	1.341	1.000	0.627	2.062	1.972
タッチパネル	開	1.501	0.679	1.000	0.826	1.204	1.040
	閉	1.911	1.094	1.000	-0.001	0.827	0.320
(d)開→閉グループ・長							
長波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	-0.184	1.385	1.000	-0.057	0.870	0.946
	閉	0.384	0.120	1.000	0.644	0.876	0.706
タッチパネル	開	0.794	0.511	1.000	2.240	2.072	0.889
	閉	2.345	1.384	1.000	2.533	2.207	1.835
(e)閉→開グループ・短							
短波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	0.371	0.630	1.000	0.646	0.997	0.473
	閉	0.471	0.562	1.000	1.236	0.829	0.918
タッチパネル	開	0.256	0.477	1.000	0.482	0.699	0.309
	閉	-0.024	0.487	1.000	0.484	0.753	0.635
(f)閉→開グループ・長							
長波長		V	F	ML	MR	SL	SR
アクリル模型	開	0.436	0.471	1.000	0.420	0.794	0.355
	閉	2.628	-0.421	1.000	-5.040	0.981	-1.126
タッチパネル	開	0.937	-2.866	1.000	-6.487	0.109	-2.090
	閉	-1.251	-0.805	1.000	-1.651	1.121	-0.882

### B) 短・長の波長における反応差の検証

短-長波長間では有意差がないという結果であった。今回実験を行った短波長は波長 4.7 mm の波上を 1 秒間に約 120 mm の間隔でなぞるため、時間周波数に直すと約 25 Hz で波形をなぞることとなる。計測時の NIRS のサンプリング間隔は 70 ms であり、約 14 Hz でサンプリングしていることとなるため、短波長をなぞっている際の脳活動を測りきれず、波長依存的差異が確認出来なかった可能性も考えられた。

### C) 仮想-実刺激における反応差の検証

仮想-実刺激間でも有意差が見られなかったことから、仮想刺激と実刺激どちらを提

示しても脳の賦活状態は似た変化を示したと考えられる。このことから Saga, et al. が提案する 2.5 次元触覚提示法による仮想刺激は、心理的要素を排除しても実刺激と同程度の感覚が提示可能であると確認できた。

### D) 目の開閉順序における反応差の検証

目の開閉順序に関して検定結果は有意差なしだった。前述の通り触覚入力と視覚野の相互作用は認められたが、視覚情報を得る順序は影響しないと考えられた。

次に、触覚と視覚の相互作用を詳細に検討するため、以下の 2 点を触覚刺激のなぞり運動中の脳活動を NIRS により測定して検討した。

- 1) 触覚刺激に視覚情報がともなった場合の脳賦活への影響
- 2) 触覚刺激の周波数による脳賦活への影響

本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 触覚刺激に視覚情報が伴った場合の影響  
低周波では「視覚情報なし>視覚情報あり」、高周波では「視覚情報あり>視覚情報なし」の有意差が認められたことから、視覚情報による触覚情報への介入が示された。これらの有意差は特に低周波で大きく、高周波では視覚的情報と触覚的情報の差が少ないのに対し、低周波ではその差が大きかった、すなわち純粋な触覚情報のみでは低周波の方が刺激が不確かであり、指先への意識集中が高まったことが示唆された。

### (2) 触覚刺激の周波数による影響

視覚情報のある実験 A では「高周波>低周波」、触覚情報のみの実験 B では「低周波>高周波」の有意差が認められたことから、周波数の違いによって体性感覚野の脳賦活に差が生じることが示唆された。またこの結果から、低周波では感覚の不確かさから指先への意識集中が、高周波では視覚情報から刺激の強さを認識し、指先への意識集中が高まったことが示唆された。

以上より、視覚情報は触覚情報に影響を及ぼしており、またその働き方は周波数によって異なることが示唆された。また、本研究において得られた波形の観察から、賦活開始時間や賦活のピークといった点にも相違が認められる傾向があり、本研究で定めた脳賦活量だけでなく、脳賦活の仕方についても視覚情報の有無や刺激周波数の違いによる影響がある可能性が示唆された。さらに、実験 A と実験 B の比較において、触覚情報のない、すなわち対照実験である条件 motor で右運動野のみ A>B の有意差が認められた(図 7 下)。このことから、視覚情報によって右運動野の支配領域である左手の運動錯覚が生じたことが示唆された。

これらを踏まえ、今後の課題として以下の4点が挙げられる。

- ①条件間の活動相対量（血流増加量）の比較に加え、血液量増加開始速度、増加量のピーク時間、増加継続時間など、脳賦活の仕方の比較による検証
- ②視覚情報から運動錯覚が生じるなど、視覚情報による運動情報への影響の検証
- ③実際の運動触覚刺激とは異なる視覚刺激を与えた際の脳賦活の関連性の検証
- ④健常者だけでなく視覚障がい者や感覚麻痺患者などを対照とした検証。

次に、NIRS を用いた触覚用バイオフィードバックシステムを考案するにあたり、頭皮上から測定する NIRS と同じ血流変化を脳活動の指標としていながら脳実質の活動が測定可能な fMRI を用いて、同様の実験を行い、検出信号の変化や脳活動部位を比較検討した（図6に例を示す。本実験では、実刺激の亚克力模型のみを用いている）。

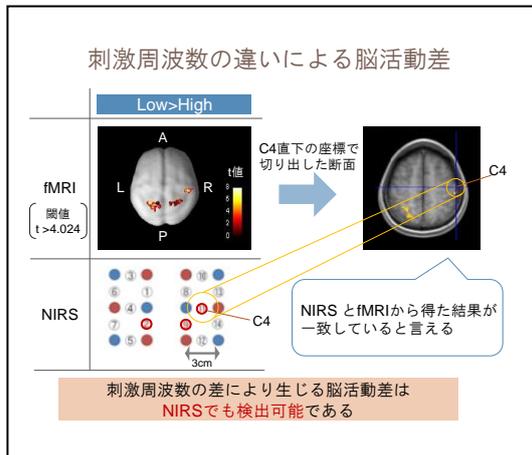


図6. fMRI と NIRS との脳賦活測定と比較

本研究の結果は、NIRS が刺激受容時の脳活動に皮膚血流などのアーチファクトが重畳する場合があるものの、空間周波数の異なる触刺激に伴う脳活動の差異を検出可能であることを示唆しており、剪断力を用いた触覚情報提示装置の有用性評価に NIRS が使用可能であることを示したと考える。

最後に、全盲者3名の協力を得て NIRS 測定でこれまでと同様の研究を行い、健常者、擬似盲、全盲者との違いを検討した。その結果、運動野、感覚野、視覚野のいずれにおいても NIRS 信号の反応性（立ち上がり）が速く、また、信号変化量が大きく現れることがわかった。しかしながら、前頭前野での有意な差は見られなかった。

以上の結果を基に、触覚反応に基づくリアルタイム・フィードバックシステムを考

案した（図7）。本アルゴリズムは、先に光・音・脳のプロジェクトで用いられた視覚情報に基づくリアルタイム・フィードバックシステムのアルゴリズムを応用している[7]。

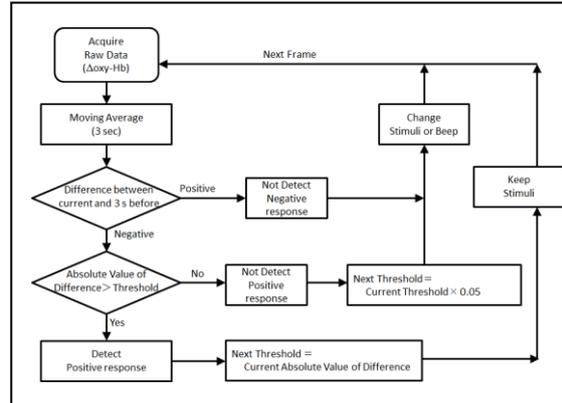


図7. 触覚反応に基づくリアルタイム・フィードバックシステムのアルゴリズム

今後の課題として、①NIRS を用いた場合の閾値設定や状況によっては皮膚（頭皮）血流をどのように考慮するかの問題、②情動レベルの反応を検出できるかどうか、③反応性の個人差の評価が残されている。さらに、今回は主として触覚反応に基づくリアルタイム・フィードバックシステムの提案に終わった、今後聴覚反応に基づくリアルタイム・フィードバックシステムの提案を検討したい。

#### 参考文献

- 1) 嵯峨智, 出口光一郎. 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける定量的凹凸感提示手法. 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集(2011 年 9 月)
- 2) 嵯峨智, 出口光一郎. S153021 剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイによる凹凸感提示手法の検討. 日本機械学会 2011 年度年次大会 [2011. 9. 11-14]
- 3) Satoshi Saga and Koichiro Deguchi. Lateral-force-based 2.5-dimensional tactile display for touch screen. In Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2012, pp. 15-22, 2012.
- 4) 嵯峨智, Ramesh Raskar. 剪断力による形状とテクスチャの重畳提示手法. 情報処理学会 インタラクシオン 2013 (2013-Interaction (13INT016)).
- 5) Sadato N, Pascual-Leone A, Grafman J, Ibañez V, Deiber MP, Dold G, Hallett M. Activation of the primary

visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*. 380(6574): 526-528, 1996.

- 6) Cohen LG, Celnik P, Pascual-Leone A, Corwell B, Falz L, Dambrosia J, Honda M, Sadato N, Gerloff C, Catalá MD, Hallett M. Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature* 389(6647): 180-183, 1997.
- 7) Hori S, Mori K, Mashimo T, Seiyama A. Development and inspection of NIRS-based real-time feedback BCI system: Fusion of Neuroscience and Media-Art. The 35th Annual International IEEE EMBS Conference 2013 年 7/3-7/7 (Osaka/Japan)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Yoshida M, Origuchi M, S, Takatsuki A, Kan S, Aso T, Shiose T, Sawamoto S, Miyauchi S, Fukuyama H, Seiyama A. fMRI evidence of improved visual function in patients with progressive retinitis pigmentosa by eye-movement training. *NeuroImage: Clinical* 5: 161-168, 2014.
2. Oonishi S, Hori S, Hoshi Y, Seiyama A. Influence of subjective happiness on the prefrontal brain activity: an fNIRS study. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 812: 287-293, 2014.
3. Seiyama A, Higaki K, Takeuchi N, Uehara M, Takayama N. Estimation of skin blood flow artefacts on NIRS signals during a verbal fluency task. *Adv Exp. Med. Biol.* 876: 327-334, 2016

[学会発表] (計 6 件)

1. Sayuri Oonishi, Shota Hori, Yoko Hoshi, Akitoshi Seiyama. Influence of subjective happiness on the prefrontal brain activity: an fNIRS study. The 41st Annual ISOTT Meeting 2013 年 6/22-6/26 (Hanover/USA)
2. Shota Hori, Koichi Mori, Takehisa Mashimo, Akitoshi Seiyama. Development and inspection of NIRS-based real-time feedback BCI

system: Fusion of Neuroscience and Media-Art. The 35th Annual International IEEE EMBS Conference 2013 年 7/3-7/7 (Osaka/Japan)

3. Masako Yoshida, Maki Origuchi, Shin-ichi Urayama, Hidenao Fukuyama and Akitoshi Seiyama. Improved visual function of tunnel vision patients by Eye-Movement training: fMRI study. The 34th World Ophthalmology Congress 2014 年 4/2-4/6, (Tokyo, Japan)
4. Akitoshi Seiyama, Kotona Higaki, Nao Takeuchi and Naoko Takayama. Estimation of Skin Blood Flow Artefacts on NIRS Signals during a Verbal Fluency Task. The 42nd Annual ISOTT Meeting 2014 年 6/28-7/2 (London/UK)
5. Akitoshi Seiyama, Yasuhiro Ooi, Junji Seki. Implication of output signal from functional NIRS and MRI. The 10th World Automation Congress 2014 年 8/3-8/7 (Hawaii/USA)
6. 辻田奈津来, 吉田雅子, 精山明敏. 網膜色素変性症における視野角と眼球運動の関係. 第 27 回 BME on dementia 研究会 2016 年 2 月 21 日 (京都大学、京都)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

精山明敏 (SEIYAMA, Akitoshi)  
京都大学大学院・医学研究科・教授  
研究者番号: 70206605

##### (2) 研究分担者

宮内 哲  
独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター・研究員  
研究者番号: 80190734