

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650314

研究課題名(和文) 実時間光覚シミュレーションによる大脳皮質刺激型視覚再建の検討

研究課題名(英文) Real-time phosphene simulation for assessment of artificial vision that uses cortical stimulation

研究代表者

奥野 弘嗣 (Okuno, Hirotsugu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30531587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：大脳皮質視覚野を電気刺激した際に惹起される光覚を模擬するシステムを開発した。本システムは、過去の生理学や臨床研究に基づき、アレイ電極によって脳を刺激した際に惹起されるであろう模擬光覚画像を生成する。本システムは、画像処理機能を備えたCMOSイメージセンサ、小型の処理装置、及びヘッドマウントディスプレイから構成されており、生成した模擬光覚画像を、移動する被験者に実時間で提示することができる。この光覚画像提示装置は、視覚野刺激型人工視覚システムによって再建される視覚レベルの検討や、人工視覚システム設計の際に強力なツールとなる。

研究成果の概要(英文)：We developed a system that simulates phosphene, which is the perception of a spot of light, elicited by electrical stimulation on the visual cortex. The system generates a simulated phosphene image that would be perceived by the client in response to electrical stimulation applied by an electrode array on the cortex; the simulated image is based on previous physiological and clinical studies. The system is composed of a CMOS image sensor that has image processing circuits, a single board computer, and a head-mounted display. Taking advantages of its wearable feature, the system displays simulated phosphene images to the freely moving subject in real time. The system could be an effective tool for evaluating the level of vision that would be perceived by the client, and for designing a visual prosthetic system.

研究分野：電子工学

キーワード：人工視覚 シミュレーション 視覚野

1. 研究開始当初の背景

大脳皮質視覚野を電気刺激した際、光の感覚(光覚, phosphene)が惹起されることが、半世紀近く以前に発見された [1]。以後、視覚野への電気刺激を利用した人工視覚システムについて様々な研究がなされてきたが [2]、実用化されて久しい人工内耳に比べ、人工視覚システム実現へむけた研究成果は決して捗々しいものではなかった。

しかしながら近年、生体測定技術の向上から、人工視覚システム実現に向けて必要な知見が集まりつつある。ヒトを含めた様々な生物において、脳表上の刺激位置と、光覚が知覚される視野上の位置の対応関係(以下では視野地図と呼ぶ)が徐々に明らかとなってきた [3][4]。また、実際にヒトの視覚野に対する電極刺入を行って、電気刺激と、光覚の位置・サイズ・時間変化の関係も詳しく調べられた [3]。

光覚について理解が進みつつある今日、人工視覚システム実現に向けての大きな問題点の一つは、視野地図に従った目的的部位を、どういった情報処理を施し、またどういった時空間的な刺激パターンを用いれば効果的な視覚が得られるのかが全く分からないという点である。視覚野に埋め込める電極数には当然限りがあるため、この限られた本数の電極によりできるだけ多くの視覚情報を患者に伝えなくてはならないが、そのための方策が定まっていないのである。この点が、人工内耳(聴覚再建のために効果的な信号処理・刺激方法が確立されている)と決定的に異なっている。

以上の背景を受け、人工視覚システム実現に向けて、視覚情報の処理方法や刺激パターンの生成方法を検討する手段が求められている。脳に電気刺激を加えるという危険を伴うシステムの性質上、実際にヒトの脳に刺激を行うことは著しく制限されるため、より安全な代替策が必要である。

そこで、コンピュータシミュレーションを活用して、電気刺激により惹起されるであろう光覚画像を視覚健常者に提示する手段が提案されたが(総説として [5])、現実的なシミュレーションを行うために必要な以下の点を全て備えたシミュレータは本研究以外では開発されていない。①被験者が自然に動作している状態のシミュレーションが行えるようウェアラブルである。②刺激部位に至るまでの、視覚神経系の情報処理を考慮している。③適切な視野地図を利用している。④脳の形状を反映している。⑤電気刺激に対する視覚野細胞の時空間的応答特性を考慮している。これらの五点を備えたシミュレータが求められる。

2. 研究の目的

前節の背景を受け、本研究の目的は、②の視覚神経系における情報処理を検討するためのシミュレータを開発すること(次節の

(1))、並びに①から⑤の要素をすべて備えた光覚画像提示装置を開発すること(次節の(2)-(4))である。本研究における検討は、人工視覚開発に役立つだけでなく、脳内の視覚情報表現・処理についての深い洞察を与える。

3. 研究の方法

(1)まず、初期視覚系(網膜、外側膝状体および低次の視覚野で構成される)における情報処理を検討するため、視覚入力に対する初期視覚系細胞の応答を実時間で模擬するハードウェアエミュレータの開発を行った。細胞の時空間特性の模擬は、従来のデジタル処理装置では計算量が大きく、実時間での模擬は困難であるため、複数の並列演算用ハードウェアを活用した。

網膜神経細胞応答の模擬を行うため、抵抗回路網(神経同士の電氣的結合の模擬に最適)を備えたシリコン網膜と、プログラム可能なデジタル回路であるFPGA(field-programmable gate array, Xilinx XC6SLX45)を活用した。以下、この網膜模擬用ハードウェアを網膜エミュレータと呼ぶ。

また、視覚野細胞応答の模擬を行うため、SpiNNaker(マンチェスター大学によって開発された神経シミュレーション用メニーコア処理装置 [6])を用いた。網膜エミュレータとSpiNNakerを接続するインターフェースボードを、FPGAを利用して製作し、網膜エミュレータから送られる信号を元に、視覚野内の応答を模擬するプログラムをSpiNNakerに実装した。

(2)光覚画像提示装置を開発するため、まず視覚野電気刺激と光覚知覚の対応関係(位置・サイズ・時間等)の確立を行った。電気刺激と光覚知覚の関係は、定量的に測定することができないため、先行研究(ヒトを被験者とした臨床実験や、実験動物を利用した生理学実験)を参考に、この関係付けを行った。

本研究で行うシミュレーションは、左脳への刺激を想定しているため、右側の半側視野が再建されることになる。このため、電気刺激と光覚知覚の位置関係の確立は、右側半側視野について行った。

(3)次に、正方アレイ多点電極を用いて一次及び二次視覚野を刺激することを想定し、その際に惹起される光覚を模擬するアルゴリズムの開発を行った。

上記で確立した電気刺激と光覚の関係を基に、視野-視覚野マッピングアルゴリズムを開発し、このアルゴリズムに、刺激電流の特性を変化させた際の光覚の明るさ・サイズ・持続時間の変化を加えることにより、模擬光覚画像生成アルゴリズムを開発した。仮想刺激電流を印加する位置の選定方法は、輪郭抽出や明暗の閾値処理等、複数用意した。これにより、状況に適した画像処理を検討す

ることが可能である。

(4) 上記で確立したシミュレーション用アルゴリズムを、ウェアラブルなハードウェアに実装し、光覚画像提示装置を開発した。本装置には、シリコン網膜、FPGA、SBC (single board computer, Raspberry Pi B)、HMD (head-mounted display) を利用した。シリコン網膜内の抵抗回路網を活用することにより、デジタル処理が苦手とする空間処理を効率よく行った。HMD は、被験者と提示画像の位置関係を保ち、かつ頭部や体の移動を伴う状況における光覚画像を被験者に提示するために用いられた。

4. 研究成果

(1) 図 1 に、前節(1)に記した、初期視覚系細胞の応答を実時間で模擬するハードウェアエミュレータの外観を示す。本エミュレータは、網膜エミュレータ、SpiNNaker ボード、並びにこれらを接続するインターフェースボードから構成される。シリコン網膜によって 200Hz で撮像された 128×128 ピクセルの画像を入力として、網膜および視覚野細胞群の模擬応答が、本エミュレータから得られた。図 2 に、エミュレータの出力画像例を示す。図 2(a) は、シリコン網膜によって撮像された未処理画像であり、図 2(b) 以降の模擬応答は全てこの画像を元に生成された。図 2(b) は、網膜神経系における時空間応答を模擬する

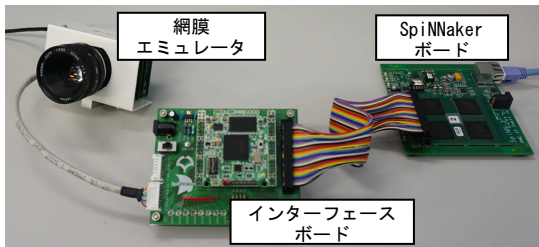


図 1：初期視覚系細胞応答を模擬するエミュレータの外観。

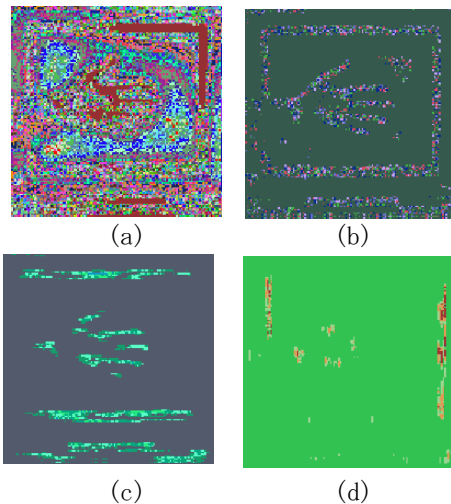


図 2：初期視覚系細胞応答を模擬するエミュレータの出力。

処理を、図 2(a) に施した際に得られた出力である。網膜はスパイクと呼ばれるパルス状の電位出力を行うため、このスパイクを発生したピクセルが白で示されている。

図 2(c) (d) は、SpiNNaker によって模擬された、方位選択性をもった細胞の応答である ((c) は横方向, (d) は縦方向)。これらの出力は、インターフェースボードを介して届けられた網膜スパイクを元に生成された。図 2(c) (d) から、方位選択性を模擬できていることが確認できる。本報告書では方位選択性神経の応答のみを示したが、運動方向選択性神経をはじめとした複数の神経回路をプログラムし、その応答を検証した。

このエミュレータは、自然環境下におけるモデル視覚神経回路の応答を実時間で模擬することができるため、実環境における様々なモデル回路の機能的役割を検討するための強力なツールとなる。

(2) 図 2 に、前節(4)に記した、実時間ウェアラブル光覚画像提示装置のブロック図(a)と外観(b)を示す。本装置は、頭部前方に設置されたシリコン網膜により撮像された画像を元に、SBC によって擬似光覚画像を生成し、

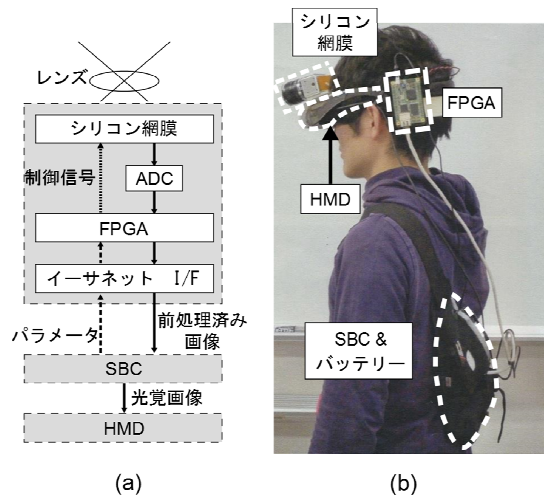


図 3：光覚画像提示装置のブロック図(a)と外観(b)。

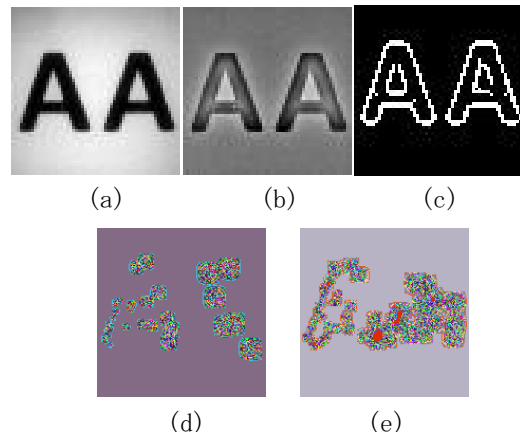


図 4：光覚画像提示装置の出力。

これをHMDによって被験者に提示する。この装置によって得られた擬似光覚画像の例を図4に示す。図4(a)はシリコン網膜によって撮像された未処理画像であり、(b)は抵抗回路網による輪郭強調出力、(c)は(b)から抽出された輪郭二値化画像である。図4(d)(e)は、(c)の二値化画像から生成された擬似光覚画像である。(d)(e)はそれぞれ、電極間隔2.0mm、1.0mmで左脳の脳表を電気刺激した際に知覚されるであろう擬似光覚画像である。画像左端の上下中央が視野中心であり、中心ほど光覚が密に現れ、周辺ほど疎になることが確認できる。また、当然ながら電極間隔が狭いほうが光覚は密となり、視認性が高くなることが予想される。

本報告書では、輪郭抽出画像を元に生成した光覚画像を対象として、電極間隔の違いによる影響のみを示したが、実際には画像処理の方法や光覚の時間特性の影響等も比較検討できる。この光覚画像提示装置は、視覚野刺激型人工視覚システムによって再建される視覚レベルの検討や、人工視覚システム設計の際に強力なツールとなる。

<引用文献>

- [1] G. S. Brindley, et al., "The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex," *J. Physiol.*, vol. 196, no. 2, pp. 479-493, 1968.
- [2] W. H. Dobbins, et al., "Artificial Vision for the Blind: Electrical Stimulation of Visual Cortex Offers Hope for a Functional Prosthesis," *Science*, vol. 183, no. 4123, pp. 440-444.
- [3] E. M. Schmidt, et al., "Feasibility of a visual prosthesis for the blind based on stimulation of the visual cortex," *Brain: J. Neurology*, vol. 119 (Pt 2), pp. 507-522, 1996.
- [4] J. R. Polimeni, et al., "Multi-area visuotopic map complexes in macaque striate and extra-striate cortex," *Vision Research*, vol. 46, no. 20, pp. 3336-3359, 2006.
- [5] S. C. Chen, et al., "Simulating prosthetic vision: I. Visual models of phosphenes," *Vision Research*, vol. 49, no. 12, pp. 1493-1506, 2009.
- [6] S. B. Furber, et al., "Overview of the SpiNNaker system architecture," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 62, iss. 12, pp. 2454-2467, 2013.

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 (査読あり) Hirotsugu Okuno, Jun Hasegawa, Tetsuya Yagi, "Real-Time Emulator for

Reproducing Graded Potentials in Vertebrate Retina," *IEEE Transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 9, iss. 2, pp. 284 - 295, 2015.

- ② (査読あり) Takumi Kawasetsu, Tadashi Sanada, Ryoya Ishida, Hirotsugu Okuno, "A hardware system for emulating the early vision utilizing a silicon retina and SpiNNaker chips," *Proceedings of the IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pp. 552-555, 2014.

- ③ (査読あり) Hirotsugu Okuno, Tamas Fehervari, Masaru Matsuoka, Seiji Kameda, Tetsuya Yagi, "Portable phosphene image generator simulating cortical visual prosthesis," *Proceedings of the IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pp. 188-191, 2012.

[学会発表] (計7件)

- ① Takumi Kawasetsu, Tadashi Sanada, Ryoya Ishida, Hirotsugu Okuno, "A hardware system for emulating the early vision utilizing a silicon retina and SpiNNaker chips," *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, 2014年10月22-24日, ローザンヌ (スイス).

- ② 神谷雄斗, 亀田成司, 奥野弘嗣, 鎌田隆嗣, 八木哲也, "A Wearable Artificial Vision Simulator for Visual Cortical Prosthesis," 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム, 2014年09月17-19日, 金沢大学 (金沢市).

- ③ 奥野弘嗣, 川節拓実, 石田椋也, 八木哲也, "A real-time emulation system for reproducing neural activities in the retina and the primary visual cortex," 日本神経科学会大会, 2014年9月11-13日, パシフィコ横浜 (横浜市).

- ④ (招待講演) Hirotsugu Okuno, "Emulating the retina : efficient hardware architecture for robotic vision and neural simulation," *Symposium on Engineering, Medicine and Biology Applications 2013*, 2013年2月1-3日, 台南 (台湾).

- ⑤ Hirotsugu Okuno, Tamas Fehervari, Masaru Matsuoka, Seiji Kameda, Tetsuya Yagi, "Portable phosphene image generator simulating cortical visual prosthesis," *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, 2012年11月28-30日, 新竹 (台湾).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥野 弘嗣 (OKUNO, Hirotugu)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30531587