

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03258

研究課題名(和文) 光受容タンパク質を用いた単純細胞受容野型フィルター素子の作製と画像処理

研究課題名(英文) Photoreceptor protein-based simple cell receptive field for image processing

研究代表者

岡田 佳子 (Okada-Shudo, Yoshiko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号：50231212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,820,000円

研究成果の概要(和文)：光受容タンパク質バクテリオロドプシンをインクジェット印刷した視覚情報処理素子を作製し、特徴抽出に適用した。透明電極上への印刷条件を最適化し、一次視覚野単純型細胞の応答範囲「受容野」の空間構造を模倣した7値化5ローブcos-on中心型および4ローブsin-on中心型Gaborフィルターを作製した。時空間周波数特性はバンドパスを示し、マカクザルの単純細胞受容野の電気生理学的応答と定性的に一致した。さらにエッジ検出や方向検出、錯視検出に適用し、ソフトウェアや複雑な回路、電源を使わずに生体膜の特性だけで、人間の目のエッジ検出機能と方向検出機能を再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タンパク質自身が好塩菌の太陽電池であり、微分演算/畳み込み機能をもつため、これをセンサー材料として用いた視覚神経細胞受容野形状を模倣した素子は、バイアス電源や外部演算回路が不要である。無機材料を使用せず、生体をインクジェット印刷した環境に優しい視覚ハードウェアの実現は、デジタル画像処理における計算負荷の軽減や消費電力の低減に貢献し、ビジョンチップや生体機能LSIといった生体模倣分野にもインパクトを与える独創的な試みである。構成論的手法、すなわち作ることによる視覚機能の理解にもつながり、画像工学と神経生理学分野を繋ぐ架け橋として基礎と応用研究の両面から有用である。

研究成果の概要(英文)：A visual information processing device with ink-jet printed photoreceptor protein bacteriorhodopsin (bR) was fabricated and applied to feature extraction. The printing conditions (bR concentration, discharge frequency and droplet spacing) on transparent electrodes were optimised to fabricate a 7-valued 5-lobe cos-on-centre Gabor filter and a 4-lobe sin-on-centre Gabor filter that mimics the spatial structure of the response range 'receptive field' of simple cells in the primary visual cortex. The spatio-temporal frequency response showed a bandpass with a spatial frequency of 0.10 mm⁻¹ and a temporal frequency peak of 4 Hz for both filters. Edge detection, direction detection and optical illusion detection were performed using this device. The human eye's edge detection and orientation detection functions were successfully reproduced using only the properties of the biomembrane, without the use of software, complex circuitry or a power supply.

研究分野：視覚情報処理

キーワード：バクテリオロドプシン 一次視覚野単純型細胞 受容野 Gaborフィルター 画像処理 錯視検出

1. 研究開始当初の背景

(1) 一次視覚野にある単純細胞の空間的応答特性「受容野」は2次元 Gabor 関数で記述され[1]，特定の空間周波数，方位，位相パターンを抽出する画像フィルターに対応する．従来の Gabor 型デジタルマスクによるたたみ込み処理は，膨大な演算量と消費電力を要するため，まず全アナログ回路で作製された時空間フィルターで計算効率を上げ，計算負荷が低減した後デジタルを用いる手法がとられている．多数の電子素子を必要としないアナログ画像フィルターを実現するための新規光機能材料が求められていた．

(2) 高度好塩菌の細胞膜から単離される視物質類似の光合成タンパク質バクテリオロドプシン (bR) は，光駆動プロトンポンプ機能をもつため，透明電極にはさんで光を照射すると，ON/OFF の瞬間だけ極性の異なる「時間微分応答」を示す．このユニークな視覚応答性を単純細胞受容野の興奮/抑制領域に対応させた Gabor フィルターを実現し，アナログ欠陥検出などアナログ画像処理に適用してきた[2]．しかし従来のディップコート法では，bR が一定の膜厚に成膜されるため，興奮と抑制の出力を2値とした2値化素子しか作製できなかった．Gabor 関数を2値に単純化すると，もとの Gabor 関数より感度が低下し，空間周波数特性もずれるので設計段階で補正が必要である．BR 懸濁液をインクとしたインクジェット多層印刷によって，3次的になめらかな膜厚分布をもつ Gabor フィルターが作製できれば，視覚神経細胞受容野の応答特性をデバイスによって模倣でき，視覚ハードウェアをより実用的なレベルへ具現化することができると考え，本研究の着想に至った．

2. 研究の目的

本研究は光受容タンパク質の視覚機能をデバイスレベルで取り入れた視覚受容野型の画像フィルターを作製し，アナログ画像処理に適用することを目的とする．視覚情報の基本的な処理を担っている一次視覚野単純細胞に着目し，そのモデルである Gabor 関数を模倣した cos 型および sin 型 Gabor フィルターを作製する．それぞれの時空間周波数特性を検討し，エッジ検出や方向検出，錯視検出に適用し，走査するだけでたたみ込み演算結果が得られることを確認する．電源や外部演算回路のいらぬ生体フィルターを，従来の画像処理システムの計算負荷と消費電力を低減するアナログ演算素子として，また構成的手法に基づいて視覚情報処理の機構を研究するためのハードウェアとして適用する．

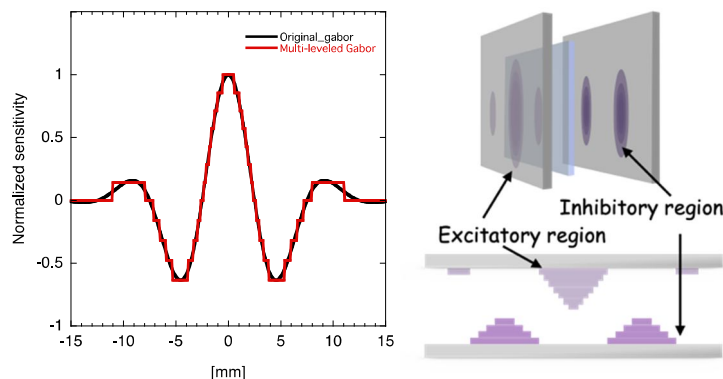
3. 研究の方法

(1) BR 膜印刷条件の最適化

インクジェット法は，液体材料の吐出により局所的なパターンニングが可能であり，材料の省資源性，作製プロセスへの順応性が高く，プリンタブルエレクトロニクスの一翼を担う技術である．マテリアルプリンター DMP-2850 (Fujifilm dimatix 製) は，プリントヘッド内のピエゾ素子への電圧印加によりインクを吐出する機構をもち，入力されたパターンファイルをもとにプリントヘッドを走査して印刷する．はじめに bR インク濃度と印刷パラメーターを調整し，透明電極上に印刷した bR 膜の表面粗さが最も低くなる印刷条件を決定した．上記条件で1~11層の bR 膜をパターンニングして膜厚の層数依存性を検討し，さらに積層 bR 膜と対向する透明電極の間に電解質溶液を封入した光検出器を作製し，明滅白色光入力に対するピーク出力の印刷回数依存性を測定した．

(2) 視覚受容野形状パターンの設計と印刷

視覚受容野形状を3次的に模倣した分布をもつ Gabor フィルターを作製するため，Gabor 関数を多値化して各層のパターンを設計した．Cos 型 Gabor 関数は中心興奮領域，両側興奮領域，抑制領域の感度をそれぞれ7値，1値，4値に分け，sin 型 Gabor 関数は内側領域，外側領域の感度をそれぞれ7値，4値に分ける．領域間で1値あたりの感度が一定となるように各領域の多値化数を算出する．この設計で1値ごとに印刷パターンを作成し，興奮領域と抑制領域を，それぞれ異なる透明電極上に印刷する．対向させた電極間に電解質溶液を封入して7値化 Gabor フィルターを作製した．図1(a)に cos 型 Gabor 関数の1次元感度プロファイルと(b)bR を印刷した cos-Gabor フィルターの構造概略図を示す．



(a) 1次元感度プロファイル (b) 概略図
図 1.7 7 値化 cos 型 Gabor 関数と bR-cos-Gabor フィルター

の多値化数を算出する．この設計で1値ごとに印刷パターンを作成し，興奮領域と抑制領域を，それぞれ異なる透明電極上に印刷する．対向させた電極間に電解質溶液を封入して7値化 Gabor フィルターを作製した．図1(a)に cos 型 Gabor 関数の1次元感度プロファイルと(b)bR を印刷した cos-Gabor フィルターの構造概略図を示す．

(3) 時空間周波数特性の測定

輝度を正弦波変調した格子画像をプロジェクターでフィルター上に走査し，7 値化 Gabor フィ

ルターの光電流応答特性を測定した。空間周波数および時間周波数特性は、格子間隔および格子の走査周波数を変えてピーク出力を測定し、縦軸を空間周波数、横軸を時間周波数、応答強度の等高線マップを作成した。

(4) 欠陥検出への適用

BR-Gabor フィルターは、単純型細胞受容野と同様に空間周波数および方位選択性をもつため、線幅や間隔、方向の違い、あるいは欠陥をもつ入力画像を走査すると、光電出力が急激に減少する。回転させた矩形格子や、格子の一部に空間周波数の異なる部分や穴といった欠陥を含む格子を用いてフィルター上を走査し、入力画像の欠陥検出に適用した。

(5) 錯視検出への適用

BR-Gabor フィルターの方向認識性を利用して、方位錯視の一種であるカフェウォール錯視検出に適用する。これは交互に並んだ白黒レンガ間のモルタル線が傾いて見える錯覚で、Gabor カーネルによるたたみ込みシミュレーションを行うとモルタル線の部分に twisted code(ねじれ模様)が観測される[3]。BR-Gabor フィルターを 90 度回転させて走査し、得られた出力波形の最大値を白、最小値を黒に変換して 256 階調のたたみ込み出力画像を作成した。

4. 研究成果

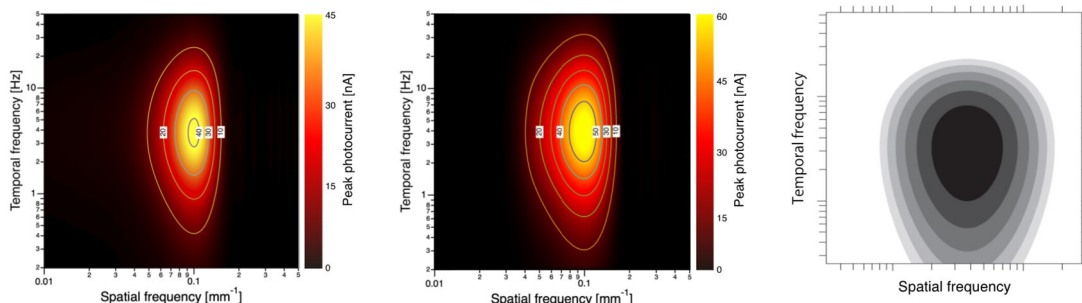
光受容タンパク質バクテリオロドプシンをインクジェット印刷した視覚情報処理素子を作製し、特徴抽出に適用した。

(1) BR 膜印刷条件の最適化と Gabor フィルターの作製

bR インク濃度と印刷パラメーターを検討した結果、濃度 4.0 mg/ml、吐出周波数 2.0 kHz、液滴間隔 30 μm のとき最小表面粗さ 38 nm を得た。この条件で 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11 層の bR 膜を印刷したところ、膜厚は層数に対して線形に増加し、1 層の平均膜厚は 23 nm だった。積層 bR 膜を用いた光検出器のピーク出力は、7 層(膜厚約 150 nm) のときに最大となったため、Gabor 関数のピークを 7 値に対応させた。

(2) 時空間周波数特性

入力する正弦波格子定数を 4~50 mm(空間周波数 0.25 mm^{-1} ~0.02 mm^{-1})、走査周波数を 2, 4, 6, 8 Hz としてピーク出力を測定した。空間周波数特性は多値化 Gabor 関数のフーリエ変換 FFT、時間周波数特性は視覚系ニューロンの時間インパルス応答である Difference of gamma 関数の FFT に一致した。縦軸を空間周波数、横軸を時間周波数とした応答強度の等高線マップを図 2 に示す。7 値化 Gabor フィルターは cos 型, sin 型ともに格子定数 10 mm(空間周波数 0.10 mm^{-1})、時間周波数 4 Hz をピークとするバンドパスを示し、マカクザルの単純細胞受容野の電気生理学的応答と定性的に一致した。また、また 2 値化 Gabor フィルターでみられた高調波成分のサブピークがなくなり、周波数選択性が向上した。



(a) 7 値化 cos-Gabor フィルター (b) 7 値化 sin-Gabor フィルター (c) マカクザルの電気生理学的応答[4]
図 2. 時空間周波数特性の比較

(3) アナログ画像検出への適用

欠陥検出の結果、入力格子の方向が 0 度の場合に強く応答し、他の角度では急激に出力が低下した。また異なるピッチの格子および欠陥に対応する出力プロファイルが大きく減少した。入力画像を拡大して投影、フィルターを走査するだけで、光電流プロファイルから欠陥検出可能であることを示した。電子回路欠陥検出の前処理過程に適用すれば、演算量と消費電力の大幅な低減が期待できる。

さらに代表的な幾何学的錯視画像であるカフェウォールパターンを走査したところ、たたみ込み出力画像に twisted code が観測され、計算機シミュレーション結果とよく一致した。これまでカフェウォール錯視のシミュレーションはほとんどすべて DOG カーネルが用いられてきた。カフェウォール錯視は方向依存性のある錯視のため、脳の視覚系方向エンコード機構に基づいて Gabor で説明することは妥当である。

特徴検出に成功しただけでなく、当初予定していなかった「錯視の検出」に成功した。これまで心理学実験や、DOG/Gabor カーネルを用いた計算機シミュレーションによる構成論的手法によるアプローチしか行われていなかった錯視の研究に、デバイスを用いた実験的構成論的手法が加えられたことになる。「錯視するデバイス」の実現によって「作ることによる視覚機能の理解」につながる成果が得られたと考える。

参考文献

- [1] J. P. Jones and L. A. Palmer, *J. Neurophysiol.* **58**, 1233-1258 (1987).
- [2] Y. Okada-Shudo, T. Tanabe, T. Mukai, T. Motoi and K. Kasai, *SPIE Newsroom*, doi:10.1117/2.1201509.006132 (2015)
- [3] T. Takeuchi, *Perception & Psychophysics*, **67**, 1113-1127 (2005).
- [4] N. J. Prieve, S. G. Lisberger, and J. A. Movshon, *J. Neurosci.* **26**, 2941-2950 (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Kako, N. Fukunaga, and Y. Okada-Shudo	4. 巻 119980
2. 論文標題 Protein-based Gabor filter for visual illusion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of SPIE Photonics West, Organic Photonic Materials and Devices XXIV	6. 最初と最後の頁 1 - 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2608950	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 岡田佳子	4. 巻 18
2. 論文標題 光受容タンパク質を用いた視覚機能光検出器	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告（IEICE Technical Report）OME	6. 最初と最後の頁 35 - 40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 坂本海里, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 大友明, 岡田佳子
2. 発表標題 Gaborフィルタ搭載ロボットカーの動体認識システムの開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加古彰子, 岡田佳子
2. 発表標題 光合成タンパク質を用いた Gabor フィルター素子による錯視検出
3. 学会等名 2022年材料技術研究協会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本海里, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 大友明, 岡田佳子
2. 発表標題 バクテリオロドプシンGaborフィルタを用いた画像認識
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kako, N. Fukunaga, and Y. Okada-Shudo
2. 発表標題 Protein-based Gabor filter for visual illusion
3. 学会等名 SPIE Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Okada-Shudo
2. 発表標題 Molecular Electronics and Image Engineering Applications of Photosynthetic Protein Bacteriorhodopsin
3. 学会等名 22nd Romanian International Conference on Chemistry and Chemical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Itoh-Kako and Y. Okada-Shudo
2. 発表標題 Detection of the Cafe Wall illusion using protein-based artificial receptive fields
3. 学会等名 6th International Workshops on Nano and Bio-Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本海里, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 大友明, 岡田佳子
2. 発表標題 バクテリオロドプシンGaborフィルタを用いたパターン認識
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本海里, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 大友明, 岡田佳子
2. 発表標題 バクテリオロドプシン Gabor フィルタのインクジェット作製とパターン認識の試み
3. 学会等名 第 68 回応用物理学会春季学術講演 会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船木康平, 長谷川裕之, 岡田佳子
2. 発表標題 バクテリオロドプシン多値化DOGフィルターによる画像処 理
3. 学会等名 第 68 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 正村和也, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明
2. 発表標題 インクジェット法によるバクテリオロドプシン人工視覚機能デバイスの構築 (5)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Okada-Shudo and H. Fukazawa
2. 発表標題 Protein based DOG filter for image processing and image illusion
3. 学会等名 SPIE Security + Defence, Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XVI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fukazawa, K. Funaki, K. Kasai, and Y. Okada-Shudo
2. 発表標題 Bacteriorhodopsin based binarized DOG filter for image processing,
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2019, Information Photonics, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船木康平, 笠井克幸, 岡田佳子
2. 発表標題 バクテリオロドプシン2値化DOGフィルターによる明るさの錯視
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 正村和也, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明
2. 発表標題 インクジェット法によるバクテリオロドプシン人工視覚機能デバイスの構築 (4)
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 正村和也, 長谷川裕之, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明
2. 発表標題 バクテリオロドプシンのインクジェットパターンニングと視覚情報処理デバイス
3. 学会等名 2019年材料技術研究協会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 落合俊弘, 船木康平, 大坪純一, 長谷川裕之, 笠井克幸, 岡田佳子
2. 発表標題 インクジェット法によるバクテリオロドプシンGaborフィルターの作製
3. 学会等名 Optics & Photonics JAPAN 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiko Okada-Shudo
2. 発表標題 Spatiotemporal frequency characteristics of a protein-based DOG filter
3. 学会等名 SPIE Security + Defence, Berlin, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深澤 光, 笠井 克幸, 岡田佳子
2. 発表標題 光受容タンパク質を用いた2値化DOGフィルターによる画像処理
3. 学会等名 Optics & Photonics JAPAN 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川裕之, 佐野由佳, 笠井克幸, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明
2. 発表標題 インクジェット法によるバクテリオロドプシン視覚情報処理デバイスの作製
3. 学会等名 2018年 材料技術研究協会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠井克幸, 山田俊樹, 富成征弘, 梶貴博, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明
2. 発表標題 バクテリオロドプシンを用いた昆虫型ビジョンセンサーの開発
3. 学会等名 2018年 材料技術研究協会討論会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷川 裕之 (Hasegawa Hiroyuki) (10399537)	島根大学・学術研究院教育学系・准教授 (15201)	
研究分担者	西岡 一 (Nishioka Hajime) (70180586)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	
研究分担者	高橋 裕樹 (Takahashi Hiroki) (80262286)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授 (12612)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笠井 克幸 (Kasai Katsuyuki) (90359084)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員 (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関