

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560004

研究課題名(和文) 導電性プラスチックと視覚機能タンパク質を用いたフレキシブル動画センサーの開発

研究課題名(英文) Flexible sensor with conducting polymers and photosensitive protein

研究代表者

岡田 佳子 (Okada-Shudo, Yoshiko)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：50231212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水溶性ポリマーを用いた導電性プラスチックと、視覚機能タンパク質バクテリオロドプシン(bR)を組み合わせた柔らかい微分応答光センサーを開発し、ロボットビジョンやマシン操作に適用することを目標とした。最初にITOガラスセルの積層による出力増強を図った。さらに受光部の形状やbR成膜配置に異方性をもつ1画素センサーを作製して照射光の走査方向と速度を検出したところ、速く動く物に対して強く応答することがわかった。最後にITOガラスを導電性ポリマーPETに変更したが、導電率と入射光透過率が低く、ITOガラスで得られた出力値には届かなかったが、大面積で曲率をもつセンサー実現の可能性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We designed photosensors based on the bacteriorhodopsin (bR) pigment found in the cell membrane of Halobacteria and showed that motion detection is possible using only one sensing element. The photocell consists of a bR dip-coated thin film and electrolyte sandwiched between glass plates with ITO electrodes. We fabricated a simple direction sensor by patterning the bR films on electrodes. When light scans the sensing area, the edges of each pattern produce a positive or negative current depending on the light's speed and direction. These direction sensors also respond strongly to rapidly moving objects, though not at all to slow ones. Eventually we replaced ITO/glass with conductive polymer/plastic based on PEDOT:PSS. The flexible sensor showed almost the same response as ITO/glass sensor, but couldn't sufficiently respond. The hybrid sensor with protein and conductive polymer will lead to large sensing area system and could be utilized for robot vision applications.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：bacteriorhodopsin photosensor robot vision conducting polymer

1. 研究開始当初の背景

バクテリオロドプシン(bR)は、バクテリアの細胞膜に二次元結晶として存在するロドプシン類似のタンパク質である。その光応答は視覚特有の、光強度の変化量に応答する時間微分応答型波形を示す。この視覚の特徴的性質を活かし、ITO(インジウムスズ酸化物)や金蒸着ガラス基板に bR をはさんだ固定化電極セルを用いた二次元エリアセンサー、人口網膜のような応用研究が盛んに進められてきた。一方、液晶ディスプレイやタッチパネルに使われている透明電極の素材は ITO が主であるが、インジウムは希少金属でありその枯渇が危惧されている。その代替材料として注目されているのが有機導電性薄膜である。無害かつ安価で、導電率も近年 1000S/cm を超えるものが登場してきた。そこでプラスチック基板と有機導電性薄膜、そして光受容タンパク質を組み合わせることができれば、「柔らかい微分応答光センサーの実現」が可能となる。「柔らかい有機光センサー」は複合領域、特に知能機械情報分野の MEMS デバイス研究者によって研究開発が継続されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、安価で無害な有機材料を用いて「柔らかい視覚センサー」、「動画センサー」を開発することである。さらにこの動画センサーをマシン操作やロボットビジョンに適用し、軽量かつ低コストで、視覚情報処理機能を実現することを最終的な目標とした。まず受光部の形状や成膜配置に異方性をもつ 1 画素光センサーを提案し、照射光の空間変位と速度を検出した。さらに ITO ガラス基板を ITO プラスチック基板、最後に綜研化学製導電性ポリマー(WED-SM, IW-103, IW-108, AN-SO3-T)で成膜した電極へと順次変更して空間変位検出を試みた。

3. 研究の方法

(1) ITO ガラスセンサーによる空間変位検出

センサーの構造は、片方に bR 薄膜をディップコート成膜した 2 枚の ITO ガラスで電解質溶液 KCl を封入した電気化学セルに、電流電圧変換増幅器を接続したものであり、1 画素に対応する。受光部への照射光 ON あるいは OFF 時に電極間に生じる光電流は、網膜の神経節細胞と同様な微分応答波形を示す。これを利用して動画抽出や空間変位検出が行われている。ここでは受光部の形状、bR 成膜配置に異方性をもつ 1 画素センサーを提案し、照射光の空間変位(走査方向と速度)を検出した bR の最大吸収波長 568 nm に近い 532 nm の半導体励起固体レーザービームを、ビームエキスパンダー、焦点距離 100 mm と 200 mm のシリンドリカルレンズ 2 枚で縦長楕円形状の平行光にし、スリットを通して長方形にした。ステッピングモーター上に取り付けたミラーを用いてセンサー受光部上を走査し、

その応答波形から動作方向と速度を同時検出した。

(2) ITO プラスチック光センサー

まず ITO ガラス基板を ITO/PET 基板に置き換えた。電解質溶液条件(KCL + Tris/HCl), pH:7.3 は ITO ガラスと同条件とした。ITO ガラスの表面抵抗は 5 /sq で、ここで採用した ITO/PET の表面抵抗:13 /sq であることから、3分の1程度の出力が得られると予想した。

(3) 有機ガラス/プラスチック光センサー

一方、有機導電体ポリマー-PEDOT:PSS をガラス基板、および PET 基板の上に塗布し、有機ガラスセンサーおよび柔らかい有機プラスチック光センサーを作製した。綜研化学(株)から提供された 4 種類のサンプル(WED-SM, IW-103, IW-108, AN-SO3-T)を、スピコート法およびキャスト法で基板の上に成膜し、表面抵抗と透過率を測定した。さらに導電体ポリマー上にディップコート法で bR を成膜し、ITO ガラスと同じ電解質溶液条件下で、それぞれの光応答を評価した。

4. 研究成果

(1) ITO ガラスセンサーによる空間変位検出

(i) 光電流出力の走査速度依存性

受光部に縦幅 2, 4, 6, 8 mm のマスクをかぶせ、縦 11 mm 横 2 mm の長方形入射光を速度 10~200 mm/s で走査した。図 1 にその結果を示す。走査速度を速くすると、単位時間あたりの光が照射される受光部面積が増えることになるので、bR 薄膜から発生する光電流出力の総加算値も増え、走査速度が速くなるにつれて光電流出力が増加する。言い換えると通常の光センサーと異なり、移動速度の速い物体に強く応答し、速度の遅い物体には反応しない。この結果は、作製したセンサーがリスク回避に有用であることを示している。

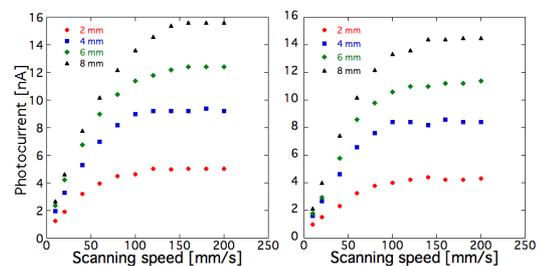


図 1 出力の光走査速度依存性

(ii) 走査光の動作検出

a. 直角三角形パターンセンサー

図 2(a)に各頂点の角度が 30°, 60°, 90° の直角三角形受光部形状を示す。最短辺の長さは 5 mm とした。このパターンに上下左右 4 方向からそれぞれ光走査し、応答波形を比較したところ、光電流出力および応答時間の差

異によって4方向の判別ができた。走査速度40 mm/sにおけるプロファイルを図2(b)に示す。走査速度は、照射時間と辺の長さから求められ、ほぼ設定速度と一致した。

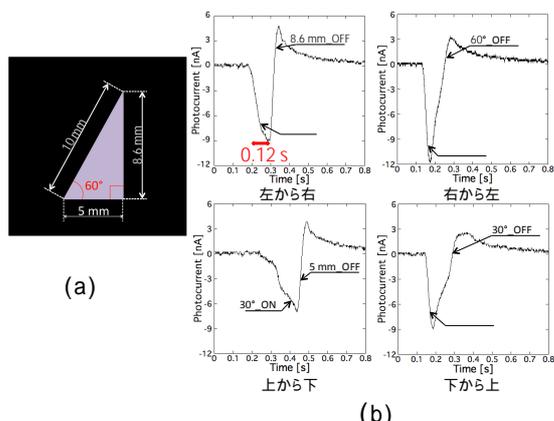


図2 直角三角形受光パターンによる4方向動作検出。(a)パターン形状と(b)応答プロファイル

b. L字型受光パターン

bR 薄膜を対電極側ITOガラスに成膜(反転配置とよぶ)すると光照射時に逆極性を示す。この特性を活かし、光入射側と出射側ITO面に異なる長方形をずらして成膜したL字型受光パターンセルを作製した。受光部形状を図3(a)に示す。速度40 mm/secで上下左右に走査した時の応答波形を図3(b)に示す。4パターンプロファイルの相違から、走査方向と速度が同時検出できた。

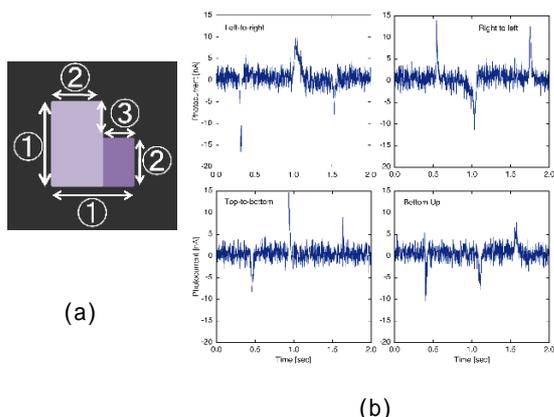


図3 L字型受光パターンによる4方向動作検出。(a)パターン形状と(b)応答プロファイル

(2) ITOプラスチック光センサー

市販のITO/PET基板を用いて同型のセンサーを作製した。bR膜厚はディップコート法で100nm、電解質溶液をITOガラスと合わせた。出力はITOガラスとITO/PETの表面抵抗差から予想した3分の1とほぼ一致した。

(3) 有機導電性プラスチック光センサー

綜研化学製有機導電体ポリマーを、スピコート法およびキャスト法でPET基板上に成膜し、表面抵抗と透過率を測定した。最も表面抵抗が小さかったのは、IW-103であった(10 /sq)。しかし透過率は1.77%と非常に低

かった。IW-108は透過率で他の2種類よりも高いが、表面抵抗が最も高く(10 /sq)導電性が悪い。また導電性を上げるために膜厚を厚くすると透過率が極端に低下し、曲げに対する耐性も下がってクラックが入ってしまった。実験室で塗布した導電性ポリマーPETセンサーを図4に示す。これらの有機導電体ポリマーPETセンサーでは光出力が得られなかった。

そこで綜研化学からPETフィルム塗工品(WED-SM/PVA,表面抵抗がITOの100倍)入手し、ITOガラスと同型の柔らかい光センサーを作製した。ITOセルのほぼ100分の1の光電流応答が得られた。

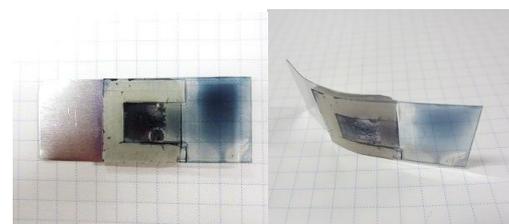


図4 導電性ポリマーPET基板センサー

(4) まとめ

1 画素で光の走査方向と速さを同時検出できるパターンドセンサーを作製し、オプティカルフローセンシングへの適用可能性を確認した。ITOガラス基板を有機導電性プラスチック基板に変更して同型の光センサーを作製し、空間変位検出を行ったが、光出力が十分でなく、期間内に動画検出には至らなかった。しかし大面積や曲率をもつ受光部が簡単に作製でき、レアメタルを必要としない環境に優しい材料のみで作製できるフレキシブルなデバイスは大変魅力的で、ロボットビジョンへ適用に向けて、可能性を見出した。添加剤を用いた導電性ポリマーの導電率向上や金属電極の選択による出力向上が今後の課題である。

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2件)

1. Y. Okada-Shudo, D. Kawamoto, K. Kasai, Y. Zhang, M. Watanabe, and K. Tanaka : "Robot vision using biological pigments," SPIE Newsroom online doi: 10.1117/2.1201212.004599 <http://spie.org/x91408.xml> (2012) 査読有
2. K. Kasai, Y. Haruyama, T. Yamada, M. Akiba, Y. Tominari, T. Kaji, T. Terui, F. Peper, S. Tanaka, Y. Katagiri, H. Kikuchi, Y. Okada-Shudo, A. Otomo, "Bacteriorhodopsin-based bipolar photosensor for biomimetic sensing," SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, USA, 88170N-1-8

(2013).査読有

[学会発表](計 20 件)

1. Y. Okada-Shudo; "Bioelectronic photo-sensor for speed and direction sensing," Proc. of 12th International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials (12th ICFPAM), Auckland, New Zealand (2013. 12) [Invited]
2. Y. Okada-Shudo; "Speed and Direction Sensing with Patterned Bio-Electronic Photosensors," Proc. of International Workshop on Nano and Bio-Photonics (IWNBP), Organized jointly with French-Korean Meeting on Functional Material for Organic Optics, Electronics, and Devices (FUNMOOD), Biarritz, France (2013. 11) [Invited]
3. K. Miyashita, T. Mukai, and Y. Okada-Shudo; "Protein-Based Photosensor for Biomimetic Sensing," Proc. of International Workshop on Nano and Bio-Photonics (IWNBP), Organized jointly with French-Korean Meeting on Functional Material for Organic Optics, Electronics, and Devices (FUNMOOD), Biarritz, France (2013. 11)
4. Y. Okada-Shudo; "Speed and direction sensing with a patterned bacteriorhodopsin film," Proc. of SPIE Security + Defence, Optical Materials in Defence Systems Technology, Dresden, Germany (2013. 9) [Invited]
5. K. Kasai, Y. Haruyama, T. Yamada, M. Akiba, Y. Tominari, T. Kaji, T. Terui, F. Peper, S. Tanaka, Y. Katagiri, H. Kikuchi, Y. Okada-Shudo, A. Otomo, "Bacteriorhodopsin-based bipolar photosensor for biomimetic sensing," SPIE Optics + Photonics 2013, San Diego, USA, (2013.8). [Invited]
6. Y. Okada-Shudo, K. Kasai, Y. Zhang, and M. Watanabe; "Protein-Based Photosensor for Robot Vision", 8th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis (NMS-VIII), Xi'An, China, (2012.10) [Invited]
7. Y. Okada-Shudo; "Direction sensing with a patterned bacteriorhodopsin film", SPIE Security + Defence, Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology, Edinburgh, UK (2012.9) [Invited]
8. Y. Okada-Shudo; "Nonlinear spectroscopic study of single cell of Halobacterium salinarum", The third Workshop on Advanced Nano and Biomaterials and their applications, Timisoara, Romania (2012.9) [Invited]
9. Y. Okada-Shudo; "Multilayered photo-sensor with bacteriorhodopsin film", SPIE Optics + Photonics, Nanobiosystems: Processing, Characterization, and Applications V, San Diego, USA (2012.8) [Invited]
10. K. Kasai, Y. Haruyama, T. Yamada, M. Akiba, Y. Tominari, T. Kaji, T. Terui, F. Peper, S. Tanaka, Y. Katagiri, A. Otomo, H. Kikuchi, Y. Okada-Shudo, "Biomimetic Optical Sensing Using Bacteriorhodopsin Thin Films -From Insect Mimetics towards Robot Vision-", "10th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME), Awaji, Japan, IW03 (2012). [Invited]
11. Y. Okada-Shudo and S. Kawata: "Nonlinear optical imaging of single cells of a pigmented bacterium", Proc. of International Workshop on Nano and Bio-Photonics (IWNBP), St Germain au Mont d'Or, France (2011.10) [Invited]
12. Y. Okada-Shudo, K. Kasai, K. Tanaka, Y. Zhang, and M. Watanabe; "Bioelectronic photosensor for robot vision", 11th International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Pretoria, South Africa, (2011.5) [Invited]
13. 川本大樹, 塩谷秋人, 春山喜洋, 笠井克幸, 張贛, 渡辺昌良, 岡田佳子: "バクテリオロドプシン光センサーによる動作検出", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 29p-A1-9 (2013.3) 東京
14. 浅野元博, 春山喜洋, 田中秀吉, 笠井克幸, 張贛, 渡辺昌良, 岡田佳子: "バクテリオロドプシン薄膜を用いた光検出器の積層化", 日本光学会年次学術講演会 OPJ2011, 24pD2 (2012.11) 千葉
15. 川本大樹, 春山喜洋, 田中秀吉, 笠井克幸, 張贛, 渡辺昌良, 岡田佳子: "バクテリオロドプシンを用いた光センサーによる空間変位検出", 日本光学会年次学術講演会 OPJ2011, 24pD3 (2012.11) 千葉
16. 春山喜洋, 笠井克幸, 山田俊樹, 菊池宏, 照井通文, 梶貴博, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明: "UV 光による機能不活化を用いたバクテリオロドプシン薄膜のパターニング", 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 12p-H4-3 (2012.9) 愛媛
17. 浅野元博, 笠井克幸, 春山喜洋, 田中秀吉, 張贛, 渡辺昌良, 岡田佳子: "バクテリオロドプシン薄膜を用いた光センサーの積層化", 春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16a-F1-5 (2012.3) 東京
18. 笠井克幸, 春山喜洋, 菊池宏, 梶貴博, 照井通文, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明: "バクテリオロドプシン薄膜を用いた双極型光検出器の光電流応答特性", 春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-GP15-3 (2012.3) 東京

19. 浅野元博, 笠井克幸, 春山喜洋, 田中秀吉, 張贇, 渡辺昌良, 岡田佳子: "積層型バイオ光センサーの開発", 日本光学会年次学術講演会 OPJ2011, 29aE8 (2011.11)大阪
20. 笠井克幸, 春山喜洋, 菊池宏, 照井通文, 山田俊樹, 田中秀吉, 岡田佳子, 大友明: "ディップコート法によるバクテリオロドプシン薄膜の作製と光電流応答特性(2)", 秋季第72回応用物理学会学術講演会 2p-V-3, (2011.9)山形

〔その他〕

<http://www.es.uec.ac.jp/okada-lab>

6. 研究組織

(1)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科・
准教授
研究者番号：5 0 2 3 1 2 1 2

(2)連携研究者

渡辺 昌良 (WATANABE, Masayoshi)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
教授
研究者番号：0 0 1 7 5 6 9 7

張 贇 (ZHANG, Yun)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授
研究者番号：0 0 5 0 8 8 3 0

田中 一男 (TANAKA, Kazuo)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
教授
研究者番号：0 0 2 2 7 1 2 5