

ヒトの目の様に錯覚する人工視覚素子を開発

～ソフトウェアを用いない画像処理を可能に～

配布日時：令和3年10月11日14時

国立研究開発法人物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）は、固体中のイオンの移動とイオン間の相互作用を利用して動作する人工視覚イオニクス素子を開発しました。この素子は、明暗の境界付近が強調される人間の目の錯視を模倣することを世界で初めて実証しました。この成果は、従来のソフトウェアを用いるデジタル情報処理システムとは異なり、ハードウェアを用いたアナログ信号処理による小型・低消費電力の視覚センシングシステムや画像処理システムなどの開発にも繋がると期待されます。
2. 近年、人工知能（AI）システムの開発において、人間の知覚原理に基づく各種センサーやアナログ情報処理システムの研究が注目を集めています。従来の AI 研究では、ソフトウェアを用いた高度なプログラミング処理や、演算回路やメモリを備えた専用の処理モジュールなどの複雑な回路構成が必要とされ、システムのサイズも消費電力も大きくなるという課題がありました。
3. 今回、研究チームは、固体電解質上に混合伝導体のチャンネルを配列した人工視覚イオニクス素子を開発しました（図）。この素子は人間の網膜の神経細胞を模したものであり、光受容体からの電気信号に相当する入力のパルス電圧によって、水平細胞に相当する固体電解質中のイオンがチャンネル間を移動し、双極細胞の応答に相当する出力のチャンネル電流が変化します。この特性を利用して画像信号を入力すると、明暗の度合いが異なる境界（エッジ）部分が強調された出力画像が得られ、人間の視覚が色や形の境界線を強調して感じ取る機能（側抑制）を素子の特性だけで再現できました。

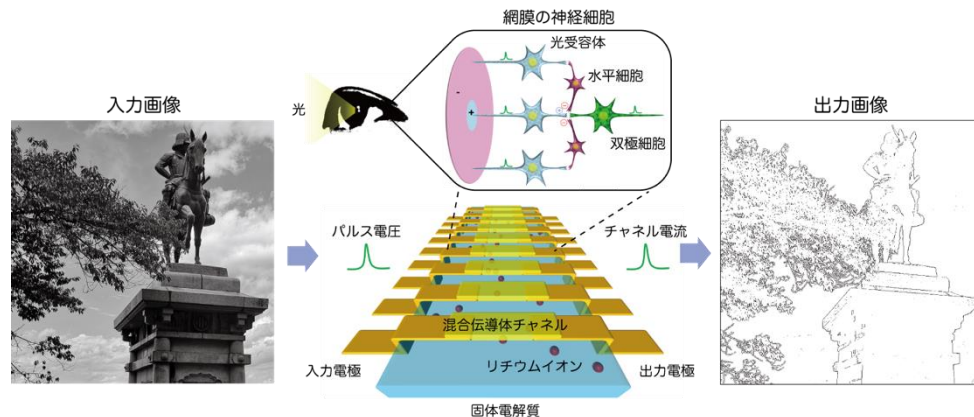


図:リチウムイオンの移動と相互作用を利用して網膜の神経細胞を模倣する人工視覚イオニクス素子(中央)。入力した画像(左)と素子の特性を利用してエッジ強調された出力画像(右)。

4. 人間の目には、明暗以外にも傾き、大きさ、色、動きなど様々な錯視があり、物体の識別において非常に重要な役割を果たしていると考えられています。開発した人工視覚イオニクス素子はこれらの錯視も模倣できる可能性があります。今後、素子の集積化や受光回路等との統合を進め、より人間の網膜に近い機能を持った視覚センシングシステムの開発を目指します。
5. 本研究は、NIMS 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点ナノイオニクスデバイスグループの鶴岡徹主席研究員、万相ポスドク研究員（2021年6月まで）、寺部一弥グループリーダーの研究チームによって行われました。本研究成果は、米国化学会が発行する Nano Letters 誌にて日本時間 2021年9月14日にオンライン掲載されました。

研究の背景

社会活動や産業活動の様々な場面でソフトウェア重視の人工知能（AI）システムの重要性が高まっていますが、ハードウェアだけで人間の五感機能を再現するセンシングシステムの開発と AI との融合にも注目が集まっています。人間の視覚は外界からの光の信号が眼球に入り、網膜で捉えられ、それが脳内に伝送され様々な処理が行われることにより起こります。網膜では、神経細胞間の高度な相互作用により入射する視覚情報に存在する光のコントラスト、色、動きなどを認識・識別する細胞が埋め込まれています。この相互作用をハードウェアだけで再現できれば、大規模なプログラミングや複雑な回路を必要としない小型で低消費電力の人工視覚システムの実現が可能になると期待されます。

人工の視覚システムの研究は、古くから半導体集積回路を用いたシリコン網膜が数多く報告されていますが、複雑な回路が必要で消費電力も大きくなってしまいう課題がありました。近年では、縦方向に並列した信号線と横方向に並列した信号線の交点にアナログ抵抗変化素子を組み込んだクロスバースイッチ回路を用いて AI システムに応用しようという試みが世界的に進められています。この方法では、独立した各交点の素子間の関連付けをソフトウェアで行い、プログラミングで試行錯誤を繰り返しながらパターン認識や画像認識を行うため、素子固有の特性を利用するというよりも依然として周辺システムによって視覚機能を実現していると言えます。

研究内容と成果

本研究グループは、固体中のイオンの移動とイオン間の相互作用を利用して人間の目の錯視⁽¹⁾を模倣する人工視覚イオニクス⁽²⁾素子を開発しました。この素子は、人間の網膜の神経細胞を模した構造をしています（図 1a）。網膜では、第 1 層に目に入ってきた光を電気信号に変換する光受容体があります。次の層では双極細胞が光受容体からの信号を直接的または水平細胞を介して間接的に受け取ります。このとき、双極細胞の受容野⁽³⁾は、その神経細胞に接続しているすべての光受容体で構成されます。双極細胞は水平細胞を介した横方向の接続により、光が受容野の中心にある直接接続された光受容体に当たると興奮し（オン中心応答）、光が周辺にある間接接続された受容野に当たると抑制されます（オフ周辺応答）。周辺の受容野に当たった光が抑制されることを側抑制⁽⁴⁾と言います。明暗の錯視は、この側抑制によると考えられています。

人工視覚イオニクス素子は、リチウムイオンを輸送することが可能なリチウム酸窒化物⁽⁵⁾と呼ばれる固体電解質膜上に電子とリチウムイオンを輸送することが可能なコバルト酸リチウムと呼ばれる混合伝導体のチャンネル⁽⁶⁾を並列させた構造をしています（図 1b）。チャンネルの両側は白金電極に接続されており、一方の電極に電圧パルスを印加し、反対側の電極で電流を測定します。このとき、入力電圧は光受容からの電気信号に相当し、出力電流は双極細胞の応答に相当します。各チャンネルにパルス電圧を印加すると、正の電荷をもつリチウムイオンは電場の方向に応じてリチウム酸窒化物を介してコバルト酸リチウムチャンネルの間を移動し、各チャンネル内のリチウム濃度が変化します。その結果、パルス電圧の条件に応じてチャンネルの出力電流は増加または減少します。このリチウム酸窒化物を介したリチウムイオンの移動が水平細胞の働きに対応しています。

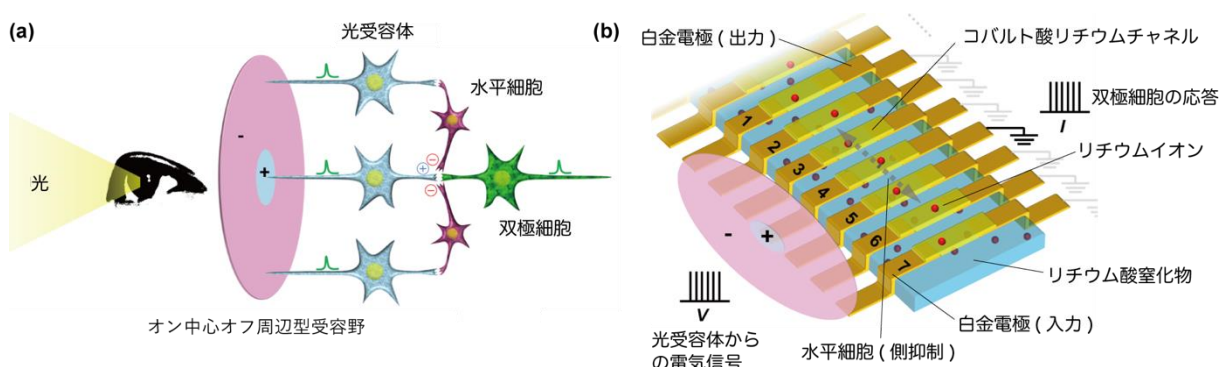


図1. (a)網膜の光受容体、水平細胞、双極細胞と光が中央に入ってきたときに形成されるオン中心オフ周辺型の受容野。(b)リチウムイオンの移動とイオン間の相互作用を利用して動作する人工視覚イオニクス素子の概略図。電圧パルスを印加する入力側の白金電極が光受容体からの電気信号に、出力側の白金電極のチャンネル電流が双極細胞の応答に相当する。リチウム酸窒化物を介

したチャンネル間のリチウムイオンの移動が水平細胞の働きに対応する。

図2aのような8個のチャンネルが並列したイオニクス素子のチャンネル1から4に0.5 V、チャンネル5から8に1 Vの50個のパルス電圧を印加したときの結果を図2bに示しました。パルス電圧の印加後、パターンのエッジ部分（チャンネル4と5の間）でチャンネル電流対比が増大することが分かります。これは、低い電圧を印加されたチャンネルではリチウム酸窒化物からリチウムイオンが入ってリチウム濃度が上がり抵抗値が上がる一方、高い電圧を印加されたチャンネルではリチウム酸窒化物にリチウムイオンが抜けてリチウム濃度が下がり抵抗値が下がることに起因します。各チャンネルに電圧が印加されたときの空間応答は、図2aに示したように双極細胞のオン中心オフ周辺型受容野の重ね合わせになるため、入力電圧のエッジ部分でチャンネル電流の差が大きく現れます。パルス電圧印加後のチャンネル電流の対比増大は、図2cに示しました明度の差によって境界付近が強調されて見えるマッシュバンド効果をよく再現しており、開発したイオニクス素子がチャンネル間の側抑制により人間の目と同様に錯視することが分かります。

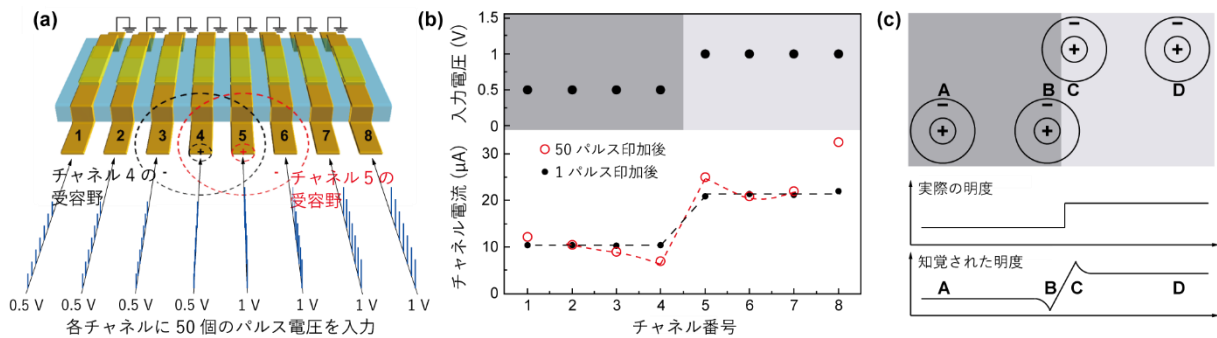


図2. (a)8チャンネルを並列させた人工視覚イオニクス素子の概略図。(b)チャンネル1から4に0.5 V、チャンネル5から8に1 Vのパルス電圧を印加したときのチャンネル電流の変化。50パルス印加後は入力パターンのエッジ部分（チャンネル4と5の間）でチャンネル電流対比が大きくなる。この対比増大は、(c)の明度の境界付近が強調されて見える錯視のマッシュバンド効果をよく再現する。

人工視覚イオニクス素子の画像処理能力を検証するために、画像のエッジ検出シミュレーションを行いました。図3中央に示したように、リチウム酸窒化物膜に垂直に埋め込まれたコバルト酸リチウムチャンネルの2次元アレイを仮定し、入力画像を $N \times N$ の画素に分割して各画素の明暗の度合いに応じたパルス電圧を印加したときのチャンネル電流を計算しました。その際、図2の横方向に並列させたイオニクス素子で得られたチャンネル間の側抑制特性を計算に組み入れました。シミュレーションの一般性を示すために、概要の図とは別の入力画像（図3左）を入力して、得られた各チャンネルの電流強度を元に出力画像を再構成し、エッジ強調を確認するために2値化処理した画像が図3右になります。松本城の輪郭がはっきりと抽出されており、さらに入力画像では判別しにくい石垣の模様も明瞭に強調されていることが分かります。概要の図と図3で見られるように、人間の目の明暗の境界線を強調して感じ取る機能を、ソフトウェアや複雑な回路を使わずにイオニクス素子の特性だけで再現することに世界で初めて成功しました。

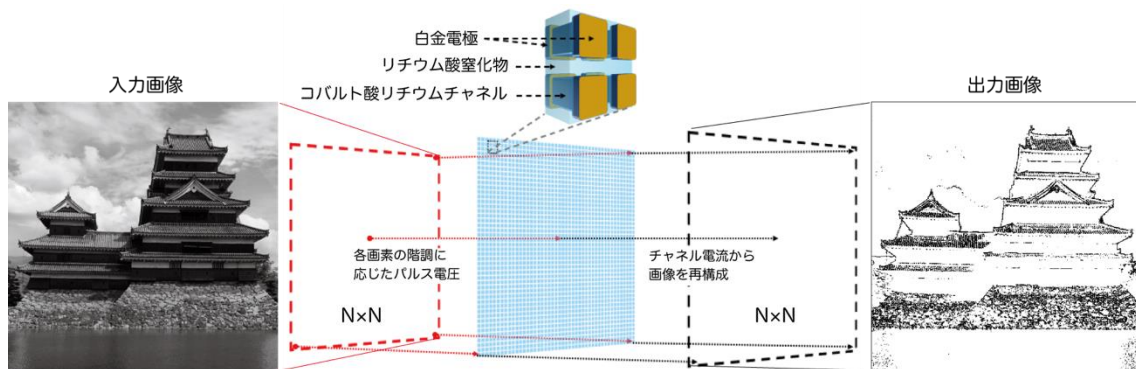


図3. 2次元アレイの人工視覚イオニクス素子の計算モデル図(中央)。入力画像(左)の階調に応じたパルス電圧を2次元アレイに

入力し、チャネル電流から出力画像を再構成し、エッジ強調を確認するために2値化処理した(右)。画素数は840×840。

今後の展開

本研究では、人工視覚イオニクス素子が明暗の錯視を模倣できることを実証しました。しかし、人間の目には、明暗の他にも傾き、大きさ、色、動きなど様々な錯視があり、開発したイオニクス素子はこれらの錯視も模倣できる可能性を持っています。今後、本成果をもとに素子の集積化や受光回路等との統合を進め、より人間の網膜に近い機能をもった視覚センシングシステムの開発を目指します。側抑制はすべての感覚系神経細胞で起こる現象であり、人間がもつ感覚や知覚を鋭くすることが知られています。したがって、開発したイオニクス素子は視覚だけでなく聴覚、触覚、嗅覚などの様々なセンシングシステムへの応用が可能であると考えられます。これらのシステムを組み合わせ、より人間の脳に近い情報処理を可能にするハードウェア型AIシステムの開発へと進展させることを目指して研究を進める予定です。

本研究は、科研費基盤研究(B)「固体イオニクスを基盤とする人工ニューロン回路網の創製」(21H03412)の一環として行われました。

掲載論文

題目：Neuromorphic system for edge information encoding: Emulating retinal center-surround antagonism by Li-ion-mediated highly interactive devices

著者：Xiang Wan, Tohru Tsuruoka, and Kazuya Terabe

雑誌：Nano Letters

掲載日時：令和3年9月14日

用語解説

(1) 錯視

視覚における錯覚のこと。明るさ、大きさ、色、形、方向、動きなどが、ある条件や要因のために実際とは違ったものとして知覚されることを言います。

(2) イオニクス

イオンの輸送現象を解明して、それを応用する分野。電子の輸送現象を解明して、それを応用する分野であるエレクトロニクスと対置されます。

(3) 受容野

身体の各部から情報を脳や脊髄に伝達する感覚系の神経細胞が、外界あるいは体内に生じた刺激に対し、反応できる空間範囲あるいはそれに対応する外界空間での範囲を言います。

(4) 側抑制

刺激された神経細胞が近くの神経細胞の活動を阻害する横方向の抑制プロセス。視覚や聴覚など感覚神経系でよくみられる現象で、一部の感覚入力的作用を弱め、他の感覚入力的作用を強化することにより、様々な感覚や知覚を鋭くすることが知られています。側方抑制とも言います。

(5) 酸窒化物

リン酸リチウム (Li_3PO_4) の酸素の一部を窒素に置き換えると、イオン伝導度が2~3桁上がることが知られています。このような材料を酸窒化物と呼び、薄膜リチウムイオン電池の電解質として用いられています。

(6) チャネル

2つの電極間に電圧を印加して電流を測定する場合、その電流経路をチャネルと言います。

(7) マッハバンド効果

微妙に濃淡の異なるグレーの領域が接触している場合に、暗い領域の境界付近はより暗く、明るい領域の境界付近はより明るく強調されて見える、錯視の一種のこと。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点

ナノシステム分野 ナノイオニクスデバイスグループ

主席研究員 鶴岡 徹 (つるおか とおる)

E-mail: TSURUOKA.Tohru@nims.go.jp

TEL: 029-860-4117

URL: <https://www.nims.go.jp/ndg/>

国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点

ナノシステム分野 ナノイオニクスデバイスグループ

グループリーダー 寺部 一弥 (てらべ かずや)

E-mail: TERABE.Kazuya@nims.go.jp

TEL: 029-860-4383

URL: <https://www.nims.go.jp/ndg/>

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp