

報道機関 御中
令和5年1月6日
(全6頁)



総務企画部総務企画課広報企画室
鳥取市湖山町南4丁目101番地
TEL: 0857-31-5006
FAX: 0857-31-5018
E-mail: ge-kouhou@ml.adm.tottori-u.ac.jp

非接触で素早く意思を伝達！瞳孔インターフェースの新方式を提案 ～左右の瞳に異なる映像を見せることがカギ～

【概要】

鳥取大学工学部制御・ロボティクス研究室の佐藤有理生 大学院生（研究当時）と中谷真太郎 講師らの研究グループは、対光反射現象（注1）を利用した意思伝達システムにおいて、左右の目に投影する刺激を異なるものとする事で一度に提示可能な刺激パターンを増加させる新方式を提案しました。この手法は市販のVRゴーグルに搭載されている瞳孔径計測機能で実現可能であり、対象者が注目している対象を非接触で検出できる簡易なブレインマシンインターフェース（BMI）（注2）としての応用も期待されます。

本研究成果は、JSPS 科研費 基盤(B)「瞳インターフェースによる運動主体感を伴うリハビリテーションシステムの構築」（22H01451）および（公財）マツダ財団研究助成の支援を受けて得られたもので、2022年12月30日に英国物理学会出版局（IOP Publishing）が発行する「Journal of Neural Engineering」誌のオンライン版に掲載されました。



瞳孔インターフェースの課題：刺激可能な周波数が限られる⇒周波数の組み合わせ手法を検討

左右の瞳に異なる映像を見せる脳内混合方式が、雑音（ビート周波数）の発生を抑制する。

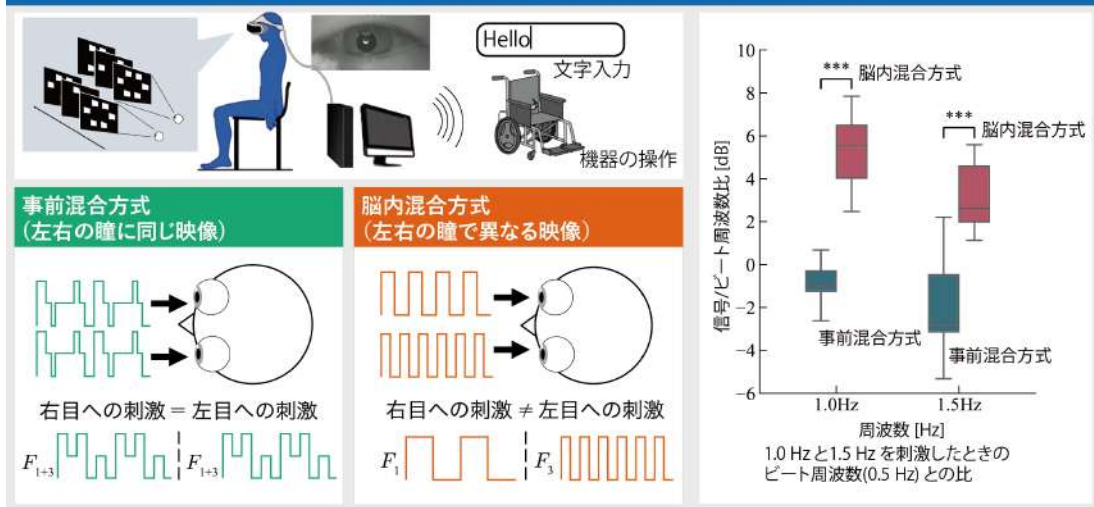


図 1. 本研究の概念図。あらかじめ 2 つの信号を混合しておく事前混合方式に比べて、左右の瞳に異なる映像を見せる脳内混合方式がビート周波数の発生を抑制できることを示した。

【本研究のポイント】

- 点滅する光を見つめた際の対光反射を利用した意思伝達システムにおいて、両眼に独立な刺激を行う手法を提案し、通信チャンネル数の増加に成功しました。
- 市販の VR ゴーグルに搭載された瞳孔径計測機能を用いて、同一視野内に表示した最大 15 種類の光刺激のうち被験者が注視している対象を推定することができました。
- あらかじめ複数の周波数を混合させて両眼に入力する場合（事前混合方式）と比べて、両眼に異なる周波数を入力し後から脳内で混合させる場合（脳内混合方式）では分類において雑音となる信号（ビート周波数）を低減できることを示しました。

本研究成果は、将来的に自らの意思で視線を動かすことができない人のための意思伝達システムの開発につながることを期待されます。

【研究背景】

筋萎縮性側索硬化症（ALS）や筋ジストロフィーなどにより体を動かすことができなくなった患者さんが外部に意思を伝える手段として、脳と機械をつなぐ技術であるブレイン-マシンインターフェース(Brain-machine interface; BMI)の研究が進められています。BMI の実現手法の 1 つとして、一定周期で点滅する物体を見つめた際の視覚野の応答である定常状態視覚誘発電位(Steady-state visual evoked potential; SSVEP) (注 3) を頭皮上に設置した電極から計測し注視物体を識別するものがあります。SSVEP を用いた BMI は眼球を動かすことができない患者さんにも適用できる可能性があり、他の BMI 手法と比較しても情報伝達率(注 4)が高い特徴がありますが、実環境で頭皮上に電極を複数設置し、安定して脳波計測を行うためには多くの課題があります。

周囲の明るさに応じて瞳孔径を変化させることで網膜に入る光の量を調整する働きは対光反射現象として知られており、古典的な生体医工学の研究テーマの 1 つです。近年、ヒトの視覚認知機能の研究において、瞳孔径の変化はヒトの認知的な注意の影響を受けることが明らかになりました(Naber et al., 2011)。この特性をもとに、対光反射を利用した非接触な BMI を実現しようとする提案が行われました(Mathôt et al., 2016)。これは、複数の注視候補の輝度を異なる周波数で変調させ、対象者の瞳孔径がどちらの刺激に同調して拡張しているかを計測するもの（以下、瞳孔インターフェース）です。瞳孔インターフェースは、意思伝達に眼球運動が必要なアイトラッキング技術とは異なり、眼球を動かすことができない人でも対光反射さえ残存していれば利用できる可能性があります。

しかしながら現在の瞳孔インターフェースは一度に提示可能なパターン数が限られるという問題がありました。これは生体の機械特性上には限界があり、対光反射現象が生じる点滅周波数に上限があるためです。また、通常のディスプレイは 1 秒当たりの画面の更新数(リフレッシュレート)が固定されるため、利用可能な刺激周波数は限られます。本研究では、少数の周波数しか利用できない状況でも多数の注視対象を用意することができれば、瞳孔インターフェースの利用可能性が広がると期待しました。

【研究内容】

まず、瞳孔に入力する信号の波形について調査を行い、光刺激の変調パターンを従来の正弦波から矩形波に変更することでより大きな瞳孔径の応答が得られることを確認しました（図2）。これは最大/最小の明るさを固定した条件下で最も多くの光量を瞳孔へ入力できる波形である矩形波の利用が効率的であると考えたためです。この事実は、人間の視覚と脳機能の関連を研究した博士論文の中で既に報告されていたものの（Moro, 2014）、インターフェースとしての利用では重視されていませんでした。今回我々は、瞳孔インターフェースの刺激信号として矩形波の利用が望ましいことを初めて示しました。

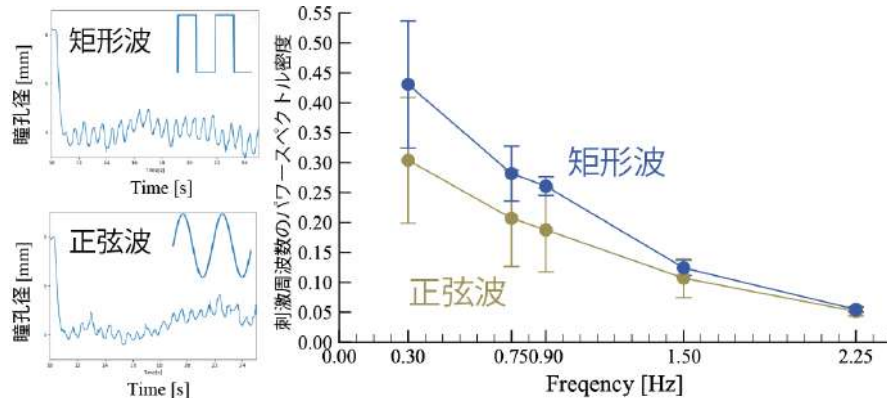


図 2. 振幅が等しい矩形波と正弦波を入力した場合の瞳孔応答の結果。すべての帯域で矩形波の方が強い反応（パワースペクトル密度）を得ている。刺激に必要な時間を短くすることができるため、システムの情報伝達率が向上すると期待できる。

次に、2つの周波数を組み合わせることで提示パターンを増加させる手法について検討を行い、2周波の混合においてはビート周波数に対する考慮が必要となることを初めて報告しました。本研究では、①2つの周波数をあらかじめ混合した信号を提示する手法（事前混合方式）と、②左右の瞳にそれぞれ混合前の信号を提示し、脳内で混合させる手法（脳内混合方式）を比較しました。健常な人では、左右の瞳への入光量が異なっても左右の瞳孔径は等しく変化します。そのため、もしも脳内での混合が単純な加算であれば①と②どちらの手法でも等しい瞳孔径の変化が観測されるはずですが、実際には事前混合方式と脳内混合方式では観測される瞳孔径の変化に違いがあることが報告されており（Howarth et al., 1991）、①の事前混合方式ではビート周波数と呼ばれる2つの周波数の差分成分が強く観測されます。

図3に示すように、刺激周波数とビート周波数の比を評価すると、①事前混合方式では条件によっては元の刺激周波数よりも大きなビート周波数が観測されます。一方②脳内混合方式では比較的ビート周波数の発生が抑えられています。大きなビート周波数が発生すると、そのビート周波数を刺激信号として利用することが難しくなるため、2つの周波数を混合して提示する場合には脳内混合方式が優れていると考えました。一方、VRゴーグルなどで左右に異なる視覚刺激を提示できない場合には脳内混合方式の利用が難しい場合も存在します。そのため、事前混合方式においてビート周波数を避けるように刺激周波数を決定する目安についても提案しています。

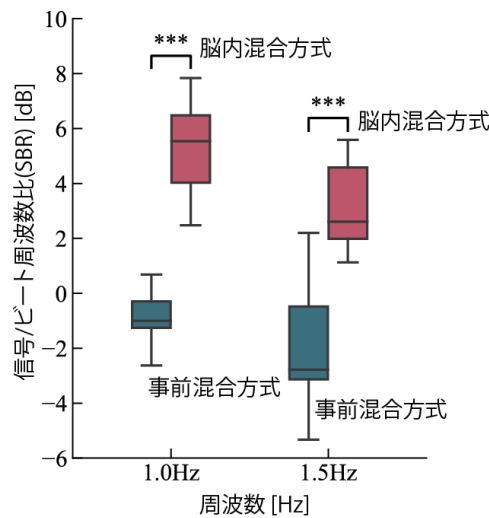


図 3. 1.0 Hz と 1.5 Hz で刺激を行ったときの瞳孔の応答。刺激周波数の強度をビート周波数の強度で割った値を SBR(signal-to-beat ratio) として定義しデシベル表記した。SBR が低いほどインターフェースとしての利用上好ましくない。

次に、脳内混合方式と両眼に単一の周波数刺激を行う条件（単一方式）の比較を行ったところ、単一方式は脳内混合方式よりも有意に大きな瞳孔の反応が得られました。このことから、刺激周波数を自由に設定できる場合には単一方式が有効である一方で、脳内混合方式は少数の周波数しか利用できない状況下で有効な手段となることが示唆されました。

最後に、同一視野内に多数の注視対象がある場合の分類を行いました。図 4 に事前混合方式と脳内混合方式、単一方式により 15 パターンの同時分類を行った結果を示します。ビート周波数を避けた刺激周波数を利用したことで脳内混合方式と事前混合方式の情報伝達率はほぼ同等となり、5 種類の刺激周波数の組み合わせによりそれぞれ 14.4, 14.5 ビット/分（正答率 58.9, 59.6%）を得ました。また事前に想定されたように、15 種類の周波数を利用した単一方式の情報伝達率が最も高く 23.7 ビット/分（正答率 78.5%）でした。

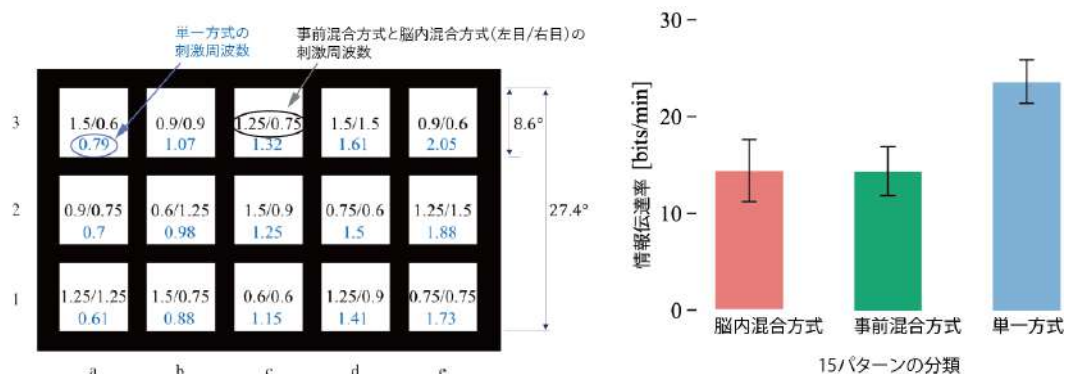


図 4. 15 種類の刺激パターンの分類。左の図は刺激パターンの配置のようす。今回の条件ではビート周波数を避けて決定した 5 種類の周波数から 15 パターンを分類した事前混合方式と脳内混合方式の情報伝達率に違いは見られなかった。また、15 種類の周波数を利用した単一条件の情報伝達率が最も高かった。

本研究の当初の目的とは異なりますが、矩形波の利用により 10 種類の周波数を利用する単一方式での情報伝達率は 25.3 ビット/分となり、我々の知る瞳孔インターフェースの中で最も高い情報伝達率が得られました。

本研究の限界として、今回参加した被験者の多くは実験の際に初めて本システムに触れたため、システムへの慣れや訓練が使用にどのような影響を及ぼすかについては評価できていません。また、弱視をはじめ病気を患っている状況下での使用可能性についても評価できていません。

【研究展望】

重度の運動麻痺状態においては、視線による意思伝達も困難になります。こうした状況下であっても自らの意思を伝える手段として脳活動の計測結果を利用するブレイン-マシンインタフェース (BMI) の研究が試みられてきました。近年、異なる周期で点滅する光を見つめた際の瞳孔収縮をカメラで計測することで一種の BMI と同様の機能を非接触かつキャリブレーション不要で実現できることが示されました。本研究は左右の目に異なる光刺激を加えることで瞳孔インターフェースの刺激パターンを増やすことに成功した初めての例です。また、矩形波の利用により従来法の情報伝達率を向上させることにも成功しました。現在、市販の VR ゴーグルの一部にはアイトラッキング機能とともに瞳孔径計測機能が搭載されています。液晶ディスプレイは刺激に利用できる周波数が限られるため、少ない周波数の組み合わせで多数の注視対象を提示できることには応用上の価値があると考えます。

【雑誌情報】

タイトル : Independent bilateral-eye stimulation for gaze pattern recognition based on steady-state pupil light reflex

著者 : Arika Sato and Shintaro Nakatani*

掲載誌 : Journal of Neural Engineering

DOI: 10.1088/1741-2552/acab31

掲載 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2552/acab31>

【用語解説】

(注 1) 対光反射 : 瞳孔から入った光の強さに応じて瞳孔を広げたり縮めたりする反射反応。明るいとき瞳孔が縮み、暗いと広がる。健康な人の場合、左右の瞳孔に入った光の強さは脳内で統合されるため、左右で異なる光刺激を行ったとしても両眼の瞳孔は左右で等しく縮小 (拡大) する。

(注 2) ブレイン-マシンインタフェース (BMI)

頭で考えるだけで装置を動かすなど、脳と機械を接続するための技術一般を指す。頭皮に電極を設置するだけの簡易的なものから頭蓋骨内に電極を埋め込むような侵襲性が高いものもある。一般に簡易的なものほど安定した脳機能計測が難しくなるため、システムの簡易さと実用レベルの安定性を両立させるための研究が進められている。

(注3) 定常状態視覚誘発電位(Steady-state visual evoked potential; SSVEP)

頭皮上に電極を設置して計測できる脳波の一種。一定周期で点滅を繰り返す光刺激を注視した際に、注視する光刺激に合わせて電位変化が生じる。異なる周波数で点滅する複数の光刺激を同一視野内に設置することで見ている対象を分類できるため、BMIでの利用が積極的に研究されている。

(注4) 情報伝達率：1分間あたりに伝達可能な情報の量。1秒間に一度0か1かを伝えることができ、伝達ミスがない時の情報伝達率は1分あたり60ビットとなる。一度に表現できる選択肢が多く、正答率が高い方が大きな値を取る。

問い合わせ先

【内容に関すること】

鳥取大学 学術研究院工学系部門

(工学部機械物理系学科/先進機械電子システム研究センター)

講師 中谷真太郎

Tel: 0857-31-5835

E-mail: snakatani@tottori-u.ac.jp

【報道に関すること】

鳥取大学 総務企画課 広報企画係

Tel: 0857-31-5006

E-mail: ge-kouhou@ml.adm.tottori-u.ac.jp