

瞳孔反応の周波数分析に基づく YES/NO 意思伝達手法の提案

武藤 ゆみ子^{*1} 金子 寛彦^{*2}

Proposal of “YES/NO” communication method based on frequency analysis of pupil response

Yumiko Muto^{*1} and Hirohiko Kaneko^{*2}

Abstract - Pupil diameter changes in response to the luminance of object to adapt various levels of lighting condition. In this study, focusing on the synchronization of pupil response to modulation of visual stimuli, we developed a system that a participant could communicate his/her intention, such as “YES” or “NO” by looking and paying attention to the target. In our experiment, we presented two circles with changing luminance sinusoidally at different frequencies and measured pupil response when observing one of the circles. In order to investigate the temporal characteristic of pupil changes, we analyzed the pupil data by using discrete Fourier transform (DFT) and calculated power spectral density methods (PSD). The result showed that the stimulus looked at by the participant was identified based on the correspondence between the luminance frequency of the stimulus and the response frequency of pupil, indicating that this method can be used as a new human machine interface for information input.

Keywords: pupil size, pupil light reflex, overt attention and frequency analysis

1. はじめに

瞳孔は、対象の輝度に応じて径が変化し、眼に入る光の量を調節する。本研究では、その瞳孔径の視覚刺激の周期的輝度変化に対する同調特性に着目し、利用者が視線と注意を向けることによる、新たな情報入力装置の開発を目指している。従来からの文字や数字などの情報入力手法として、たとえば、視線入力装置や脳波の P300 を利用した BCI などが挙げられる。しかし、脳波を用いる手法の場合、一般的に接触型センサーが必要であり、また、視線入力装置は、眼球位置計測のためにキャリブレーションが必要である。さらに、事前に十分調整をした状態であっても、眼の状態が変化してうまく計測ができなくなる場合も多く、再度のキャリブレーションが必要である。一方で、瞳孔計測は、非接触で計測が可能であり、瞳孔の光に対する応答^[1]は非常に安定しているため、運動機能が非常に限定され、四肢のみならず眼球を動かすことが不可能な患者に対する福祉技術としても期待される。

これまで、瞳孔反応を意思伝達や情報入力インタフェースに応用する研究としては、脳卒中などで運動障害を有する患者に対し、2 桁の算術演算で認知負荷を与えた時の散瞳のしくみを応用した研究が挙げられる^[2]。その研究では、健常な参加者は約 3.6 選択/分で 90%の精度、患者では 2.7 選択/分で約 70%の精度で、YES/NO の意思表示が可能であることが示された。しかし、すでに疾患を持つ患者に認知負荷を与える点、1 分間当たりの選択数の少なさから、実用性の観点からは十分であるとは言えない。これはまた、瞳孔の散瞳と縮瞳の基本特性から、

縮瞳に比べ、認知負荷を要因とする散瞳には時間を要することが大きな原因の一つであると考えられる。

以上の背景に基づき、我々の研究グループでは、少ない負担で、同時により多くの文字や数字を早く判別することを可能にするため、輝度が徐々にサイン変調する視覚刺激に対する瞳孔の応答に対して周波数解析による指標を用いて視対象を同定する手法を検討してきた。その結果、視覚刺激が 1 つの場合は、輝度変動周波数 0.75-2.5Hz の間において、得られた瞳孔径データに基づき、安定して輝度変動周波数の推定が可能であることが示された^{[3][4]}。さらに、0.58-1.9Hz の 12 個の視覚刺激を 0.12Hz 刻みでテンキー配列と同様に同時に呈示した場合、平均 76%の精度で判別が可能であることを明らかにした。しかしながら、複数の視覚刺激を呈示した場合の隣接する刺激から受ける影響、及び、判別可能な周波数の差の限界値などの特性に関する調査は十分に行われていない。特に、異なる周波数で輝度変調する 2 つの視覚刺激を用いて、どちらに視線と注意が向いていたか推定した場合の精度については明らかではない。

そこで本研究では、瞳孔反応の周波数解析に基づく YES/NO 意思伝達手法の提案を目的とし、2 つの視覚刺激を用い、得られた瞳孔径の時間変化から、視線と注意を向けていた方の円を推定する場合の刺激特性に関する検討を行う。また、二つの刺激の輝度変動周波数差 ΔF が異なる条件($\Delta F=0.6, 1.12, 2.5\text{Hz}$)について調べることににより、隣接円との輝度変動周波数の差 ΔF に従い違いがあるか否かを明らかにする。さらに、本研究で得られた知見に従い、安価な市販の眼球運動計測システム (The Eye Tribe) を用い、Yes/No の意思伝達装置の試作例を紹介し、その可能性と有効性について述べる。

*1: 東京工業大学工学院情報通信系

*2: Dept. of Information and Communications Engineering, Tokyo Institute of Technology

2. 実験方法

2.1 参加者

参加者は、健康な 22-29 歳までの男子学生 10 名であった。東京工業大学の倫理規定に基づき、全員、実験内容に関する説明を受け、同意のうえ実験に参加した。

2.1 実験装置

参加者は、暗室で椅子に座り、視距離 50cm の位置に CRT モニタ(Sony 社製, GDM-F400)が設置されていた。参加者の頭部を固定するため、顎台が用いられた。瞳孔径は、赤外線搭載 CCD カメラを用いた眼球運動計測システム iRecHS2^[5]を用いて 333Hz で記録された。刺激は、灰色背景(16.4cd/m²)の画面中心位置に左右対称に 1cm の間隔をあけて呈示された、直径 5cm の 2 つの円であった(図 1)。円の輝度の RGB 値 y_{sti} は、グレースケールで正弦波関数に従い変化した(式 1)。最高輝度 (RGB=255) は、99.4cd/m² であった。これらの刺激は、Matlab および視覚実験用ライブラリ (Psychtoolbox-3) を用いて作成、制御された。

$$y_{sti} = (255 - 128) \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

2.2 手順

2 円の輝度変動周波数 f の組み合わせを表 1 に示す。左円は $f=0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5$ Hz の 8 種類、右円は、左円に対し 3 種類の異なる周波数 ($\Delta f = 0.06, 0.12, 0.25$ Hz) のを持っていた。さらに、左または右の円に視線と注意を向けるため (L/R 条件)、合計 48 トライアルで構成された。全ての刺激はランダムな順序で呈示された。1 セッションは 12 トライアルからなっていたので、各被験者に対して合計 4 セッションが行われた。

各トライアルは、灰色背景の中心に固視点が表示された画面で参加者がボタンを押すことによって開始された後、「R」または「L」の文字が表示され、左と右の円のどちらに視線と注意を向けるのか教示された。視覚刺激は、8 秒間呈示され、参加者は、指示された方の円に視線と注意を向けた。各トライアルの間には、必ず一度目を閉じて十分休んでから次の開始ボタンを押すように指示された。なお、事前の練習は、行われなかった。

2.3 解析手法

視覚刺激呈示の影響を考慮し、最初の 1s のデータは、解析から除外し、7s 間分のデータが解析対象とされた。また、前処理として、40 フレーム毎に移動平均フィルターを用いてスムージング処理をしてから瞳孔径データの解析を行った。また、本研究では、瞳孔径変動の時間特性を調べることを目的とし、DFT(離散フーリエ変換)を用いて、ノンパラメトリックのピリオドグラムパワースペクトル密度(PSD)を推定した(式 2)。 F_s はサンプリング周波数、 $P_{xx}(f)$ は、長さ L の信号 $x_L(n)$ の PSD を示している。本手法は、過程のサンプルの離散フーリエ変換を求め、振幅の 2 乗をスケールリングしており、単純なスペクトル

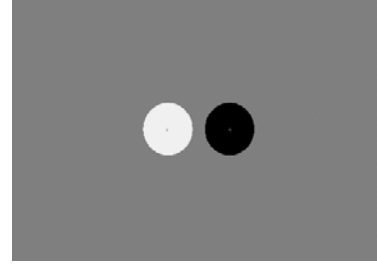


図 1 視覚刺激

表 1 視覚刺激の輝度変動周波数 f

Left [Hz]	Right [Hz]		
	$\Delta f=0.06$	$\Delta f=0.12$	$\Delta f=0.25$
0.75	0.81	0.87	1
1	1.06	1.12	1.25
1.25	1.31	1.37	1.5
1.5	1.56	1.62	1.75
1.75	1.81	1.87	2
2	2.06	2.12	2.25
2.25	2.31	2.37	2.5
2.5	2.56	2.62	2.75

を算出した場合に比べ、比較的ノイズ成分が低減する利点がある。

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{LF_s} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x_L(n) e^{-j2\pi f n / F_s} \right|^2 \quad (2)$$

3. 結果と考察

3.1 PSD 推定結果

図 2 に、7s 間の瞳孔径の時系列データに対し 0.01Hz 刻みでパワースペクトル密度(PSD)を推定した結果の例を示す。これらの結果は、全て右円に対し視線と注意を向けるように教示された場合の例である。図 2(a)は、2 円の視覚刺激変動周波数の差がない ($\Delta f = 0$ Hz)、すなわち、左右の円が等しい周波数で輝度変化していたときの結果であり、図 2(b)は周波数の差 ($\Delta f = 0.06, 0.12, 0.25$ Hz) を与えた場合の結果である。青線は左円、赤線は右円の輝度変動周波数のパワー値を示している。この結果から、左円 (青線) のピーク値に比べ、視線と注意を向けるように教示された右円の周波数におけるパワー (赤線) の方が、大きい値を示していることがわかる。

また、視覚刺激の周期的輝度変化に対する瞳孔径の同調特性の 1 つとして、PSD の分布の形状が、左右対称の釣り鐘型をしていることがわかる(図 2)。そして、そのパワーの分布の形状は、輝度変動周波数が異なる隣接円を、距離 1cm の位置に配置した場合においても、変化が見られなかった(図 2)。

3.2 判別精度

図 3 に、左右の周波数の差 Δf に対する平均判別精度を求めた結果を表す。各トライアルにおける判別の可否は、2 円の輝度変動周波数におけるパワー値を比較することにより行われた。すなわち、パワー値が大きい方の円に視線と注意が向いていたと推定し、それが実際に教示さ

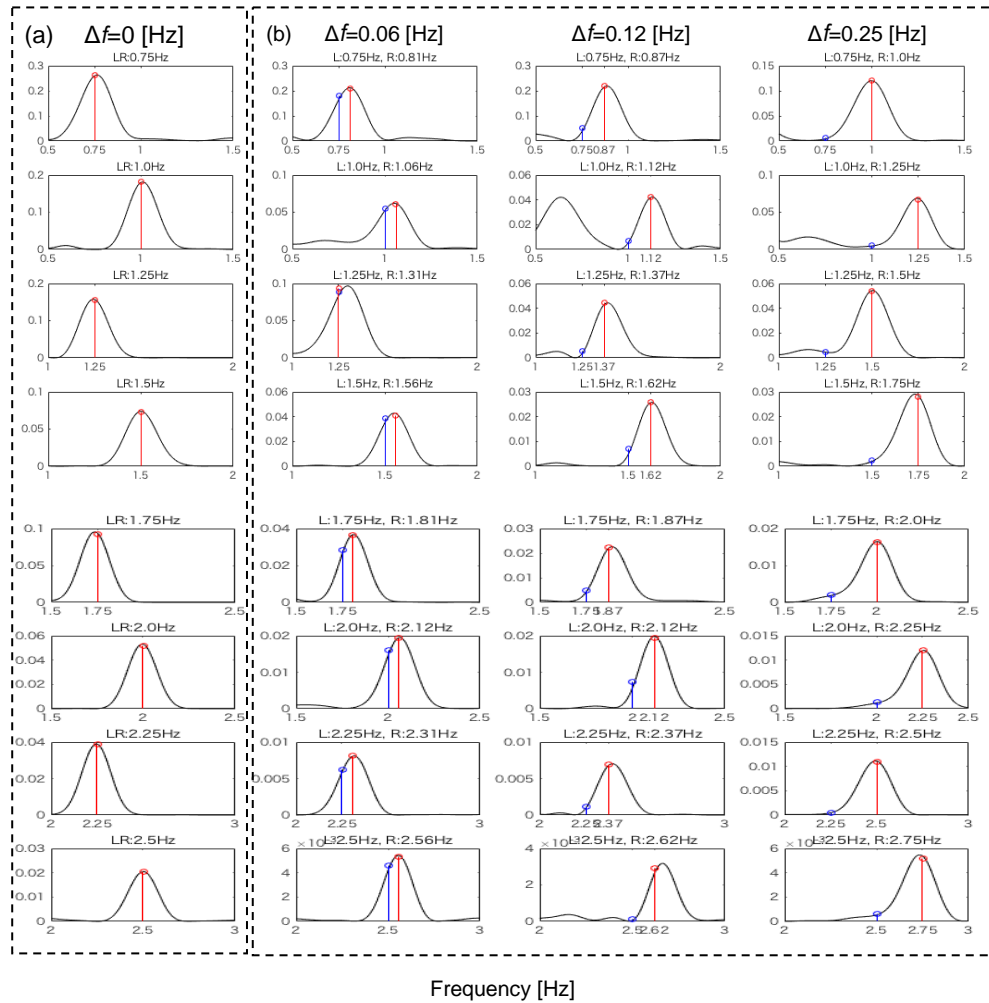


図 2. 右円に視線と注意を向けた際の各条件におけるパワースペクトル密度 (1 例)

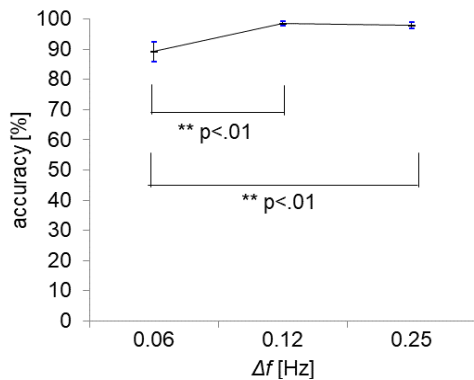


図 3. 左右の周波数の差 Δf における平均判別精度
 れた円と一致した場合に、判別成功とした。被験者間の平均判別精度は、 $\Delta f = 0.06\text{Hz}$ で 89.4%、 $\Delta f = 0.12\text{Hz}$ で 98.8%、 $\Delta f = 0.25\text{Hz}$ で 98.1%であった。さらに、分散分析後($F(2,47)=9.28, p<0.01$)、Fisher PLSD 法を用いた多重比較検定の結果、 $\Delta f = 0.06\text{Hz}$ と $\Delta f = 0.12\text{Hz}$ 、の条件、及び、 $\Delta f = 0.06\text{Hz}$ の条件と $\Delta f = 0.25\text{Hz}$ の条件において、有意水準 1%以下の差が見得られた。従って、2 円の輝度変動周波数の差が最も小さい $\Delta f = 0.06\text{Hz}$ の条件と、 $\Delta f = 0.12, 0.25\text{Hz}$ の条件では、判別精度に差があることが明らかになった。

4. 瞳孔計測に基づく YES/NO 意思伝達装置の開発

本研究で得られた知見に基づき、実際に、安価な市販のアイトラッカーを用い、瞳孔計測を試みる。その結果に基づき、瞳孔反応の周波数分析に基づく YES/NO 意思伝達装置を提案し、予備的な結果について以下に述べる。

4.1 システム構成

瞳孔径データの取得には、アイトラッカーである The Eye Tribe を用いた(図 4)。アイカメラを用いて取得され瞳孔径データは、The Eye Tribe の SDK を介し、EyeTribe サーバーと TCP 通信を用いて 60/30Hz で取得された。サーバーからの瞳孔径データを取得、視覚刺激の制作、及び、データ出力等は、本研究では、Processing 3, python 3, C++ の 3 通りの開発環境を用いて行ったが、いずれも問題なく動作可能であった。(Processing/C++の開発環境では、13 型液晶ノート PC (Sony 社製, Windows 10)と 12.3 型 Surface Pro (Microsoft 社製, Windows 10), python 3 では、11 型 Macbook air (Apple 社製, OS X Yosemite)を用いた)。

さらに、計測は実験室のような暗室ではなく、家庭の一般的な照明下で、照明条件の制限なく行われた。アイ

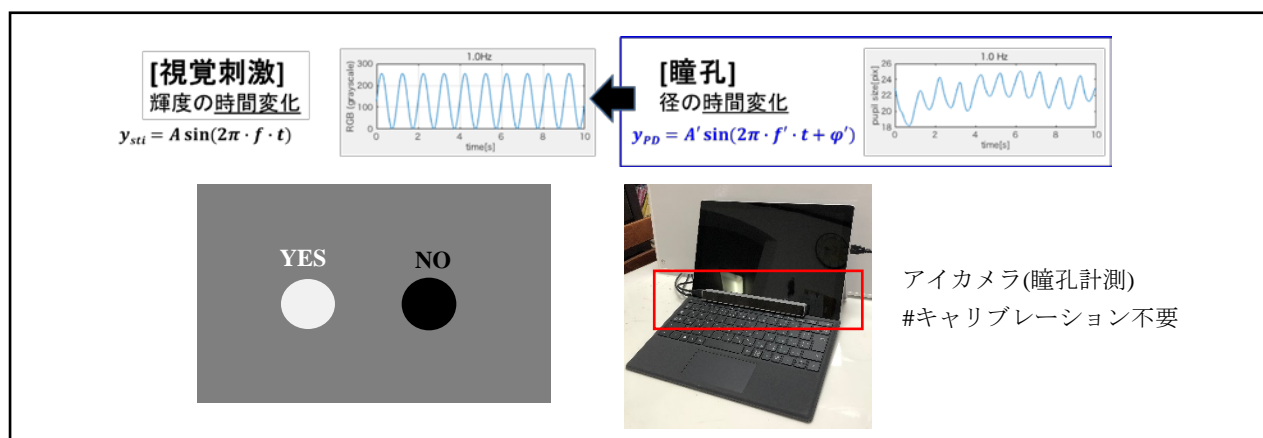


図4. YES/NO 意思伝達装置のシステム概要

5. おわりに

本研究では、瞳孔径の視覚刺激の周期的輝度変化に対する同調特性に着目し、利用者が視線と注意を向けることによる、YES/NO の意思伝達手法を提案した。2,3 章では、2 つの視覚刺激を用い、得られた瞳孔径の時間変化から、視線と注意を向けていた方の円を推定した結果、1cm 離れた隣接円の輝度変動周波数の影響を受けずに、安定して高精度で判別が可能であることが明らかになった。さらに、市販の安価なアイトラッカーを用いて、60Hz で 3.3 秒分の瞳孔径データを用いて YES/NO 判別を実施した結果、その有効性が示唆された。

瞳孔計測は、従来の BCI などと比べ患者に負担が少なく、利便性が高い、訓練負担が少ないなどの利点がある。また、視線計測のように事前のキャリブレーションが不要である。以上から、本提案手法は、運動機能が非常に限定された患者の意思伝達のための新たなヒューマンインタフェース技術として期待される。

参考文献

- [1] Loewenfeld I.E., "The Pupil: Anatomy, Physiology, and Clinical Applications", Iowa State Press (1993)
- [2] Stoll J., Chatelle C., Carter O., Koch C., Laureys S., Einhäuser W., "Pupil responses allow communication in locked-in syndrome patients", Curr Biol., 23, R647-R648 (2013)
- [3] 武藤, 三好, 金子, "視覚刺激の輝度変化と瞳孔変動の対応に基づいた視線による情報入力手法", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.117(259), pp. 101-104 (2017)
- [4] 武藤, 金子, "輝度変動刺激に対する瞳孔径変動特性とそれに基づく視線入手方法の提案", 視覚学会冬季大会, VISION 30(1) (2018)
- [5] 松田圭司, 河野憲二, 三浦健一郎: 高速撮影カメラを用いた汎用リアルタイム眼球運動計測システム, 信学技報, vol.113, no.216, pp.11-16 (2013)

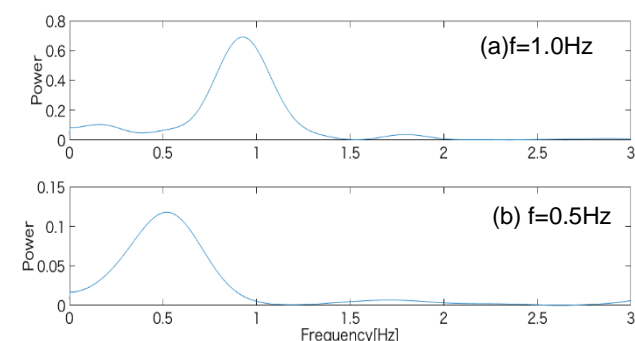


図5. サンプリング周期 60Hz の安価な市販アイトラッカーを用いて取得された瞳孔径データを用いて PSD を推定した結果例

カメラと眼の距離は、約 15-30cm 程度、顎台などの固定用具は使用されなかった。さらに、視線位置のキャリブレーションも行わなかった。

4.2 YES/NO 判別の有効性

瞳孔反応の周波数解析に基づく YES/NO 意思伝達装置開発の第 1 歩として、YES 側の視覚刺激の輝度変動周波数を 1.0Hz、NO 側を 0.5Hz で矩形波状に変化させ、そのいずれかに視線と注意を向けた場合の YES/NO 判別精度を調査した。アイカメラから 60Hz で取得された瞳孔径データのうち、最初の 1s 間のデータをカットした 200 データ (約 3.3 秒間分) から、2.3 節と同様の周波数解析手法を用いて PSD を推定した結果の 1 例を図 5 に示す。YES の意思表示をした場合 (輝度変動周波数 $f = 1.0\text{Hz}$)、瞳孔径データから推定された輝度変動周波数 (瞳孔系変動パワーが最大となる f は、 $f = 0.93\text{Hz}$ となり、暗室の実験室で 333Hz の精度の眼球運動計測装置を用いて 8s 間計測した結果より大きな推定誤差が (0.07Hz) 生じていることがわかる (図 5a)。しかし、YES の周波数 1.0Hz における PSD 値と NO の周波数 0.5Hz における PSD 値の比較を用いて、YES/NO 判別は問題なく可能であった。従って、最終的に 3 名の参加者に、YES の意思表示の場合と NO の意思表示の場合の 2 トライアルを練習なしに行ってもらった結果、その判別精度は 100% であり、本判別手法の有効性が示された。