

認知能力を向上させるシステム構築のための 視界遮蔽による瞳孔散大と流動性知能の関係調査

京極太一^{1,a)} 土田修平^{2,b)} 寺田 努^{1,c)} 塚本昌彦^{1,d)}

概要: 近年、情報技術を用いて人間の身体能力の補完や新しい身体感覚の付与、知覚や認知能力の向上を目的とする人間拡張研究が盛んである。人間拡張技術を活用した認知能力の向上により、個人の作業効率の向上が期待できる。本研究では、認知能力の一つである流動性知能について着目した。既存の研究では、瞳孔径が大きい人ほど認知能力が高い傾向にあることや、流動性知能が高い人ほど推論課題に取り組む際の瞳孔散大が大きいといった、認知能力と瞳孔径の間に関係性があると示唆された。しかし、瞳孔径と認知能力の比較は被験者間で行われており、個人内での瞳孔径が変化したときに認知能力が変動するのかがどうかについては調査されてこなかった。そこで本研究では、「瞳孔を散大させることで認知能力は向上する」という仮説を立て、個人内での瞳孔径と認知能力の変動を評価することで仮説を検証した。この仮説を検証できれば、外部刺激により瞳孔径を制御し、瞳孔散大を誘発することで認知能力を向上させる人間拡張システムの開発につながる可能性がある。実験では、片目を覆うことで左右の瞳孔が散大するかの検証を行い、その状態で流動性知能を測定するタスクを行って評価し、仮説の検証を行った。実験結果より、片目を黒色の紙で覆い、瞳孔が散大した場合に流動性知能は向上したと考えられる。

1. はじめに

人間拡張研究では、情報技術を用いて身体能力や認知能力の拡張を試みている。身体能力の補完や拡張、新しい感覚獲得の試みとして、モータ搭載型のロボット義足 [1] や無人航空機を身体動作で制御することで新たな視覚体験を提供する Flying Head [2]、そして仮想現実空間での触覚体験を拡張する方法 [3] などの研究が行われている。また、認知能力の向上を目指した研究も進められており、脳にチップを埋め込んで神経細胞を刺激し脳に入る情報を長期記憶させるデバイス [4] の開発や、脳と AI を接続する埋め込み型チップ Link [5] の開発が行われている。このように、人間拡張技術を活用した認知能力の向上により、個人の作業効率の向上が期待できる。

しかし、認知能力の向上を目指した研究の多くが脳の分析や制御に重きを置いており、Vlek ら [6] が述べたように倫理的な課題やシステム規模の大きさなど、実装にはさま

ざまな問題が存在している。脳と比べて刺激を付与しやすい感覚器官を介して認知能力を向上させる手法は、これら問題を一部解決する可能性があるが、まだ十分に調査されていない。感覚器官の一つである瞳に着目した研究も行われており、Tsukahara ら [7] の研究では、瞳孔径と認知能力の比較は被験者間では行われているが、個人内での瞳孔径が変化したときに認知能力が変動するのかがどうかについてはこれまで調査されてこなかった。また、Suzuki ら [8] の研究によると、瞳孔径は人間の精神状態に左右され、ひらめきを生じる際に瞳孔散大が起きるだけでなく、ひらめきに先立って瞳孔散大が起こると明らかにした。ここで筆者らは、ひらめきが認知能力の一部に関連していることから、瞳孔を散大させることは認知能力に影響を与える可能性があると思われ、瞳孔散大の誘発により認知能力を向上させられる技術を創出できるのではないかと考えた。

そこで本研究では、個人内での瞳孔径と認知能力の変動を評価することで、「瞳孔を散大させることで認知能力は向上する」という仮説を提案し、検証する。認知能力は「流動性知能」、「作業記憶能力」、「注意制御能力」の三つに大別される [9]。本研究は中でも、未体験の状況下で、後天的に蓄えられる知識では解決できない新しい問題を推論する能力である流動性知能に着目する。実験では、片方の視界を覆うことで左右の瞳孔が散大するかの検証を行い、

¹ 神戸大学大学院工学研究科

Grad. School of Engineering, Kobe University

² お茶の水女子大学 文理融合 AI・データサイエンスセンター

Ochanomizu University, Center for Interdisciplinary AI and Data Science

a) taich-kyogoku@stu.kobe-u.ac.jp

b) tsuchida.shuhei@ocha.ac.jp

c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

d) tuka@kobe-u.ac.jp

その状態での流動性知能を測定するタスクを行う。実験結果をもとに、片方の視界を覆う手法による瞳孔散大への有効性および瞳孔散大時の流動性知能の変動を調査する。提案した仮説を検証できれば、外部刺激により瞳孔径を制御し、瞳孔散大の誘発により認知能力を向上させる人間拡張システムを実現できると考える。

2. 関連研究

人間の能力を向上させる研究については、いくつかの研究がある。まず、認知能力を向上させる手法に関する研究について議論を行い、筆者らの提唱する手法の前提を述べる。次に、瞳孔径と関係のある事象の先行研究を参照することで、本研究で提唱する仮説について説明し、研究目的を定める。

2.1 認知能力の向上に関する研究

人間の認知能力を向上させる目的で、テクノロジーに頼らない手法を用いた研究も数多くある。特に多く見られる手法が急性的な運動や一過性運動である。Labbanら [10] は、記憶課題に対する運動のタイミングを検証した。この研究では、記憶課題の前に運動するグループ、記憶課題の後に運動するグループ、運動しないグループに被験者を割り当て、記憶力を評価した。その結果、記憶課題の前に運動するグループは他のグループと比較して記憶のパフォーマンスが有意に高く、記憶課題に対する運動のタイミングがこの効果に影響を与える可能性が示された。また、Masleyら [11] は、身体活動による認知能力の低下防止を明らかにした。10週間の実験期間中に有酸素運動を行った被験者の流動性知能は有意な改善を示し、期間を設けた継続的な運動と認知能力向上の関連性が示された。しかし、これらの手法は実際の運動が必要であり、認知能力を向上させるために、逐一運動を行うのは現実的ではないと考える。そこで本研究は、システム側からの働きかけのみで認知能力の向上を試みる。

2.2 瞳孔径と認知の関連性に関する研究

瞳孔の大きさである瞳孔径を心理状態や認知能力の評価の指標とした研究は数多くある。例えば、Suzukiら [12] は、脳内の神経回路が状態変化を起こすことで音声の聞こえ方が変化する頻度と、瞳孔径には関係があると明らかにした。この研究では、瞳孔径が大きいときに音の聞こえ方が変化した回数が多かったことや、瞳孔径と知覚交替の相関は数十秒持続することから、脳内の神経回路の変化を瞳孔径から読み取れる可能性を示した。さらに、瞳孔径から脳神経回路の情報が得られるならば、本人すら自覚していない精神状態の読み取りが可能だと提案している。また、Naberら [13] は、輝度の異なる縞模様による視覚的な認知や注意の変化が瞳孔径に影響すると明らかにした。この

特性から Satoら [14] は、点滅する光を見つめた際に瞳孔径が変動する対光反射を利用した意思伝達システムを提案した。Tsukaharaら [7] は、瞳孔径と認知能力には密接な関係があると示唆した。この研究では、流動性知能、作業記憶能力、注意制御能力の三つの認知能力と瞳孔径には相関関係がみられ、瞳孔径が大きい人ほど認知能力が全体的に高い傾向があると述べている。また、個人間の瞳孔径の違いと認知能力の違いについて議論した研究も存在する。Meerら [15] は、流動性知能と瞳孔径の関係について、流動性知能が高い人は高レベルの幾何学的推論課題を速く正確に処理し、その際に瞳孔散大が見られたと明らかにした。

このように、瞳孔径を脳や感情、認知能力の指標とした研究は数多く行われており、瞳孔径と認知能力の比較は個々の被験者間で行われてきた。しかし、個人内での瞳孔径と認知能力の変動について調査されておらず、個人内での瞳孔径の変動が脳や感情、認知能力へ作用する影響を考慮していない。そこで、本研究では瞳孔径に着目し、「瞳孔を散大させることで認知能力は向上する」という仮説を立て、認知能力の向上を図る。

3. 提案手法

片方の視界を黒色や白色で覆うことで、瞳孔径の変動が起きるのか確かめるための予備調査を行った。被験者は20代の男性11名、女性1名であり、黒色または白色の紙で片目や両目を覆った場合、および何も覆わない場合での瞳孔径を計測した。

3.1 瞳孔径の制御

筆者らはこれまで、暗所環境、通常の照明環境、強い照明環境からなる三つの照明環境によって瞳孔を変動させた際の、認知能力について調査した [16]。その結果、暗所環境で瞳孔が散大したとき、認知能力の中でも流動性知能が向上したため、本研究では流動性知能のみに着目する。しかし、この研究では瞳孔径を変動させる要因として照明環境を用いたが、瞳孔径変動の影響ではなく照明環境の変動自体が流動性知能の向上の要因となった可能性を否定できない。そのため、流動性知能の向上が瞳孔径の変動によるものだと判断できる瞳孔径制御手法を提案する必要がある。

手法の決定にあたり、以下の先行研究を参考にした。Meissnerら [17] の研究では、瞳孔径の自己制御により脳の覚醒度を自発的に調整できると明らかにした。この研究では、瞳孔径を制御することで自身の状態を変動させるという点で、個人内での瞳孔径の変動による影響について考慮できている。しかし、瞳孔径を制御する手法にはバイオフィードバックを採用しており、実現可能性がトレーニングに依存しているため、数日間の練習期間が必要であり、不便であると考えた。そのため、システム側からの働きかけのみで認知能力の向上を試みる本研究ではこの手法は採



図 1 ウェアラブルアイトラッカ (Tobii Pro Glasses 2)

用しない。Liao ら [18] の研究では、左右が白と黒で分かれた画面を提示し、黒い画面が提示されている側の耳に音源を流して注意を向かせた場合、瞳孔が散大するという結果が得られた。また、Spring ら [19] は、左右どちらかの瞳孔に対する光刺激が両方の瞳孔径に等しく作用することを明らかにした。そこで、本研究では片方の視界を黒色や白色で覆うことで、覆った側の瞳孔径だけでなくもう片方の瞳孔径も変動させる手法を用いる。この手法では、他の阻害要因なく瞳孔を散大させられると考えた。この手法は将来ウェアラブルデバイス化も可能である。

3.2 予備実験

3.2.1 測定機器

被験者の瞳孔径を測定するために図 1 に示すウェアラブルアイトラッカ (Tobii Pro Glasses 2) を用いた。近赤外線カメラによって瞳孔と周囲の虹彩を識別でき、グラスの蔓から被験者の背後を通して記録部に接続して、約 0.02 秒に 1 回の時間分解能でデータを記録した。レンズ部は度数調節が可能であり、被験者が眼鏡を着用していた場合は適した度数のレンズを、コンタクトレンズによる視力矯正を行っている被験者もしくは裸眼でも十分な視力である被験者には度が入っていないレンズを装着した。デバイスの制御には、同社のコントロールソフト (Tobii Pro Glasses Controller) を用いて、実験中の瞳孔径を計測した。

3.2.2 実験内容

瞳孔径を制御する手法として、片方の視界を覆うことで、覆った側の瞳だけでなくもう片方の瞳も変動させるという手法を用いる。そのために、一方のレンズに黒色もしくは白色の紙を貼り付け、瞳孔を散大もしくは収縮させる。この手法を取り入れたデバイスの様子を図 2 に示す。予備実験では、瞳孔径制御手法の効果検証として、黒色の紙で右目のみ、左目のみ、両目を覆う場合、Liao ら [18] の研究での対比から同様に白色の紙で右目のみ、左目のみ、両目を覆う場合、何も覆わない場合の計 7 通りの瞳孔径を右目と左目それぞれで同時に計測した。これらのパターンを図 3 に示す。この効果検証で、視界の遮蔽および遮蔽の明暗が瞳孔を散大させるか調査した。その際、一つ前の試行の影響が現れないように試行と試行には間隔を空け、かつ順序効果を考慮して試行順は被験者ごとに変更した。以



図 2 実験において瞳孔径を制御する手法



図 3 瞳を覆うパターン

降、図表中で左目のみを覆う場合を Left、両目を覆う場合を Both、右目を覆う場合を Right とする。また、視界を黒色の紙で覆う場合を Black、白色の紙で覆う場合を White、何も覆わない場合を None とする。

3.2.3 結果と考察

まず、遮蔽の左右差と明暗の効果について明らかにするために、視界を遮蔽した場合の左右瞳孔径の平均値を図 4 に示す。左右瞳孔径の平均値に対して、Left, Both, Right からなる 3 通りの左右遮蔽条件と、Black, White からなる 2 通りの明暗遮蔽条件の 2 要因で参加者内分散分析を行った結果、左右遮蔽条件の主効果に有意差があり ($F(2,11)=65.54, p<.01$), 明暗遮蔽条件の主効果にも有意差があった ($F(1,11)=79.96, p<.01$)。また、2 要因の交互作用は有意であった ($F(2,11)=36.20, p<.01$)。単純主効果の検定を行ったところ、視界を黒色の紙で覆った場合における左右遮蔽条件 ($F(2,22)=83.50, p<.01$) および左目を遮蔽した場合における明暗遮蔽条件 ($F(1,11)=14.70, p<.01$)、両目を遮蔽した場合における明暗遮蔽条件 ($F(1,11)=71.17, p<.01$)、右目を遮蔽した場合における明暗遮蔽条件 ($F(1,11)=34.02, p<.01$) の単純主効果が有意であった。そこで、Bonferroni 法を用いた多重比較を行った結果、視界を黒色の紙で覆った場合において両目を覆った場合は片目を覆った場合よりも有意に瞳孔が散大した ($MSe=0.0469, p<.05$)。しかし、両目を遮蔽した場合に瞳孔は有意に散大するが、十分な視界を確保できないといえる。また、グラフから片目を黒色の紙で覆った場合において右目を覆った場合の方が瞳孔散大していることが読み取れる。そのため、以降では瞳孔径制御手法には右目のみの明暗遮蔽条件 (Right) に限定する。

続いて、視界の遮蔽によって瞳孔径が平常時よりも散大

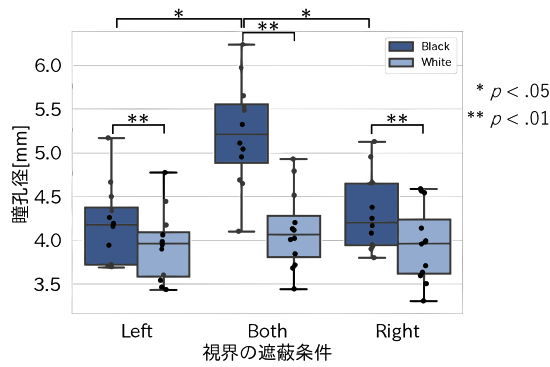


図 4 視界を遮蔽した場合の瞳孔径

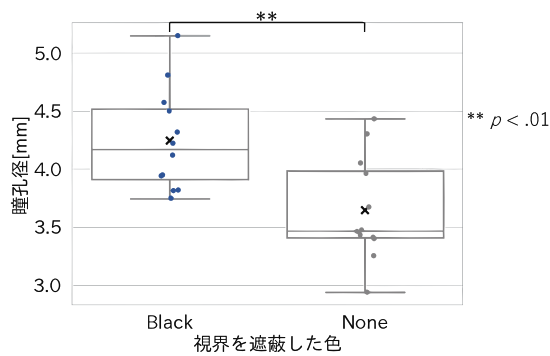


図 5 遮蔽の有無で比較した瞳孔径

することを明らかにするために、右目を黒色の紙で覆った場合と何も覆わない場合の左右瞳孔径の平均値を図5に示す。左右瞳孔径の平均値に対して、Black, None からなる2通りの遮蔽条件を要因とするt検定を行った結果、右目を黒色の紙で覆った場合と何も覆わなかった場合よりも有意に瞳孔が散大した ($t(11)=8.6521, p<.01$)。よって、視界の遮蔽によって瞳孔は散大し、遮蔽する色が黒色である場合に瞳孔はより散大することがわかった。

4. 実験

同一の人物に対して「瞳孔を散大させることで認知能力が向上する」という仮説を検証するために、実験を行った。3章の予備調査で得られた結果をもとに、右目を黒色もしくは白色の紙で覆った場合および何も覆わない状態で認知能力を測定するタスクを行い、認知能力が変動するか調査する。実験は予備調査と同一の20代の男性11名、女性1名で行った。なお、本実験は、神戸大学大学院工学研究科における人を直接の対象とする研究倫理審査委員会の承認(承認番号05-25)を得て行ったものである。

4.1 実験タスク

認知能力の一つである流動性知能を測定するためのタスクについて示す。流動性知能は演繹的推論や帰納的推論課題によって測定され、本研究ではレーヴン漸進的マトリックス課題を用いて測定した。レーヴン漸進的マトリックス

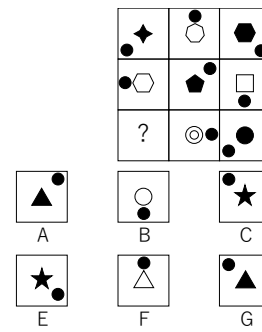


図 6 自作したレーヴン漸進的マトリックス課題の問題例

課題とは、流動性知能を非言語評価する非言語テストである。課題にはHampton[20]のIQ Testを用いた。この課題における例題を図6に示す。この例題は筆者らがHamptonのIQ Testを参考に作成しており、実際のタスクには使われていない。問題は9マスに描かれた図形の集合に含まれる2個から4個の複数の規則を読み取り、空欄に当てはまる図形を8つの選択肢の中から一つ選ぶというタスクである。図6の例では、列ごとに左から右に移動するにつれて各図形の中心のオブジェクトの線の数が減少しているため、空欄の図形の中心のオブジェクトは三角形が推論できる。中心のオブジェクトの色は白と黒が交互に配置されているため、空欄の図形の中心のオブジェクトは黒色と推論できる。さらに、各図形の周囲の小さな黒い丸のオブジェクトは行ごとに上から下に移動するにつれて配置箇所が時計回りに移動しているため、空欄の図形の周囲の小さな黒い丸のオブジェクトは左上に配置されると推論できる。よって、例題では三つの規則からGが正解となる。被験者にはこの問題を1回の試行あたり5問解答してもらった。問題は試行ごとに異なっており、5問の難易度は可能な限り均一になるように調整した。被験者には5問1セットの問題を冊子にして渡し、順番に解答してもらった。問題は紙に印刷しており、被験者には問題や選択肢に対しての書き込みによる推論を許可した。スコアとして、問題ごとのラップタイムと問題の正答率を記録した。

4.2 実験方法

実験の進行手順の概要を図7に示す。初めに、タスクの試行順による慣れを軽減するためにタスクの例を交えた十分な説明と練習を行った。認知能力の測定では、右目を黒色で覆う、白色で覆う、何も覆わない場合の計3通りの瞳孔径制御状態で、順序効果を考慮してカウンタバランスがとれるよう順番を組み合わせて、認知能力が変動するか調査した。流動性知能を測定するレーヴン漸進的マトリックス課題は、3セットの問題の試行順と対応する瞳の覆い方がランダムとなるようにした。このタスクを行う際には、瞳孔径を測定するためにアイトラッカを着用した状態で行った。

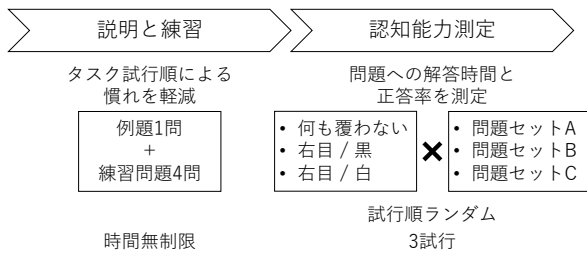


図 7 実験の進行手順の例

表 1 遮蔽条件ごとの流動性知能タスク正答率

Black	White	None
90.0 %	83.3 %	88.3 %

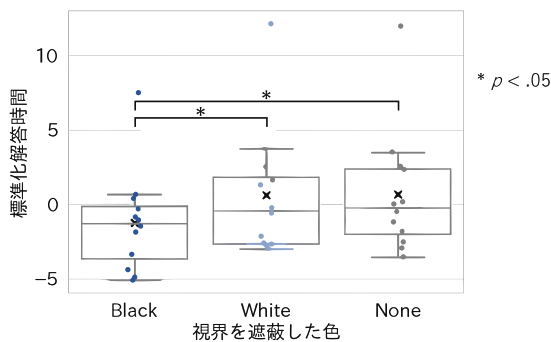


図 8 遮蔽条件ごとの流動性知能タスク標準化解答時間

4.3 実験結果

流動性知能の変動について調査した。レーヴン漸進的マトリックス課題における問題ごとの難易度の差を考慮し、解答にかかった時間を問題ごとに Z 標準化した値を標準化解答時間と定義し、評価指標とした。標準化を行う数式を以下に示す。

$$(\text{標準化解答時間}) = \frac{(\text{解答時間}) - (\text{解答時間平均})}{(\text{解答時間標準偏差})} \quad (1)$$

その際、表 1 に示した各遮蔽条件ごとの被験者の平均正答率を見ると、黒色の紙で片目を覆った場合が最も十分に正答しているため、問題の正答率は標準化に考慮しなかった。

この標準化解答時間について、遮蔽条件ごとに和を求め、比較した結果を図 8 に示す。グラフから、黒色の紙で片目を覆った場合に標準化解答時間が短くなることがわかった。また、標準化解答時間について、遮蔽条件を要因とする 1 要因参加者内分散分析を行った結果、有意差があった ($F(2,22)=9.89, p<.01$)。そこで、Bonferroni 法を用いた多重比較を行った結果、片目を黒色の紙で覆った場合に流動性知能タスクにかかる解答時間は他の遮蔽条件よりも有意に短かった ($MSe=1.42, p<.05$)。

4.4 考察

評価基準である課題の解答にかかった時間が短いほど、流動性知能は優れているといえる。そこで、前節までの結

果から、黒色の紙で片目を覆った場合、瞳孔は十分散大し、レーヴン漸進的マトリックス課題の解答にかかった時間は短くなったため、その際に流動性知能は向上したと考えられる。つまり、「瞳孔を散大させることで認知能力は向上する」という仮説が流動性知能に関して立証されたといえる。また、流動性知能タスクについて、片目を黒色の紙で覆った場合と白色の紙で覆った場合の間に有意差があったことから、片目を覆う行為そのものではなく、視界に黒色の紙が映り込み、瞳孔が散大したことが流動性知能向上の要因であると考えられる。そして、片目を黒色の紙で覆った場合と何も覆わなかった場合の間に有意差があったことから、視界を遮蔽するという制限を受けるにも関わらず、平常時よりも流動性知能が向上しており、この瞳孔散大手法が認知能力の向上に有用であると考えられる。

5. 今後の展望と議論

今後、瞳孔散大の誘発により認知能力を向上させる人間拡張システムの構築と評価を行う。使用時の空間的制約に囚われないために、眼鏡型ウェアラブルデバイスを想定する。システムを構築するにあたって、瞳孔散大手法には本研究と同様の片目を覆う手法を用いる。その上で、黒色の遮蔽物が認知タスクや瞳孔径の様子に応じて開閉するインタラクティブな機能の追加が考えられる。また、黒色の遮蔽物の開閉に関して、瞳孔が収縮する前に視界の確保を目的とした瞬間的な開閉を行う機能を実装し、ユーザにとって外界の視認性がある上で瞳孔の散大を維持し、認知能力を向上させられるか確かめる実験が必要である。

6. まとめ

本研究では、瞳孔径を外部からの刺激によって制御し、瞳孔散大を誘発することで、認知能力を向上させるシステムの構築を目指し、「瞳孔を散大させることで認知能力は向上する」という仮説を検証した。瞳孔を散大させる手法には、片方の視界を覆うことで、覆った側の瞳孔だけでなくもう片方の瞳孔も変動させるという手法を用いた。実験結果から、黒色の紙で片目を覆った場合に瞳孔は十分散大したといえる。さらに、黒色の紙で片目を覆った場合に白色の紙で覆った場合や何も覆わなかった場合よりも流動性知能測定タスクの解答にかかった時間は短くなったといえる。よって、片目を黒色の紙で覆い、瞳孔が散大した場合に流動性知能は向上したと考えられ、流動性知能に関して仮説が立証されたといえる。そして、この瞳孔散大手法が認知能力の向上に有用であると考えられる。今後は瞳孔散大を誘発することで認知能力を向上させるウェアラブル人間拡張システムの開発を目指し、システムの構築と評価を行う。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST(JPMJCR18A3) および科学研究費補助金基盤研究 (A)(22H00550) の支援によ

るものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Sony CSL: Robotic Limb (ロボット義足), <https://www.sonycs1.co.jp/tokyo/1438/> (Accessed 2023-11-12).
- [2] K. Higuchi and J. Rekimoto: Flying Head: A Head Motion Synchronization Mechanism for Unmanned Aerial Vehicle Control, *Proc. of CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13)*, pp. 2029–2038 (Apr. 2013).
- [3] H. Khosravi, K. Etemad, and F. F. Samavati: Mass Simulation in VR Using Vibrotactile Feedback and a Co-located Physically-based Virtual Hand, *Journal of Computers & Graphics*, Vol. 102, pp. 120–132 (Feb. 2022).
- [4] R. E. Hampson, D. Song, B. S. Robinson, D. Fetterhoff, A. S. Dakos, B. M. Roeder, X. She, R. T. Wicks, M. R. Witcher, D. E. Couture, A. W. Laxton, H. M. Clary, G. Popli, M. J. Sollman, C. T. Whitlow, V. Z. Marmarelis, T. W. Berger, and S. A. Deadwyler: Developing a Hippocampal Neural Prosthetic to Facilitate Human Memory Encoding and Recall, *Journal of Neural Engineering*, Vol. 15, No. 036014, pp. 1–15 (Mar. 2018).
- [5] Neuralink: APPLICATIONS, <https://neuralink.com/> (Accessed 2023-11-12).
- [6] R. J. Vlek, D. Steines, D. Szibbo, A. Kübler, M. J. Schneider, P. Haselager, and F. Nijboer: Ethical Issues in Brain-computer Interface Research, Development, and Dissemination, *Journal of Neurologic Physical Therapy*, Vol. 36, No. 2, pp. 94–99 (June 2012).
- [7] J. S. Tsukahara and R. W. Engle: Is Baseline Pupil Size Related to Cognitive Ability? Yes (under Proper Lighting Conditions), *Journal of Cognition*, Vol. 211, No. 104643, pp. 1–19 (June 2021).
- [8] Y. Suzuki, T. Minami, and S. Nakauchi: Association between Pupil Dilation and Implicit Processing Prior to Object Recognition via Insight, *Journal of Scientific Reports*, Vol. 8, No. 6874, pp. 1–10 (May 2018).
- [9] J. S. Tsukahara, T. L. Harrison, and R. W. Engle: The Relationship between Baseline Pupil Size and Intelligence, *Journal of Cognitive Psychology*, Vol. 91, pp. 109–123 (Dec. 2016).
- [10] J. D. Labban and J. L. Etnier: Effects of Acute Exercise on Long-Term Memory, *Journal of Research Quarterly for Exercise and Sport*, Vol. 82, No. 4, pp. 712–721 (Dec. 2011).
- [11] S. Masley, R. Roetzheim, and T. Gualtieri: Aerobic Exercise Enhances Cognitive Flexibility, *Journal of Clinical Psychology in Medical Settings*, Vol. 16, No. 1, pp. 183–193 (Mar. 2009).
- [12] Y. Suzuki, H. Liao, and S. Furukawa: Temporal Dynamics of Auditory Bistable Perception Correlated with Fluctuation of Baseline Pupil Size, *Journal of Psychophysiology*, Vol. 59, No. 8: e14028, pp. 1–12 (Aug. 2022).
- [13] M. Naber, S. Frässle, and W. Einhäuser: Perceptual Rivalry: Reflexes Reveal the Gradual Nature of Visual Awareness, *Journal of PLoS ONE*, Vol. 6, No. 6: e20910, pp. 1–12 (June 2011).
- [14] A. Sato and S. Nakatani: Independent Bilateral-eye Stimulation for Gaze Pattern Recognition Based on Steady-state Pupil Light Reflex, *Journal of Neural Engineering*, Vol. 19, No. 6: 066046, pp. 1–15 (Dec. 2022).
- [15] E. V. D. Meer, R. Beyer, J. Horn, M. Foth, B. Bornemann, J. Ries, J. Kramer, E. Warmuth, H. R. Heekeren, and I. Wartenburger: Resource Allocation and Fluid Intelligence: Insights from Pupillometry, *Journal of Psychophysiology*, Vol. 47, No. 1, pp. 158–169 (Jan. 2010).
- [16] 京極太一, 土田修平, 寺田 努, 塚本昌彦: 瞳孔径の変動が認知能力に与える影響の評価, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2023) 論文集, Vol. 2023, pp. 1319–1327 (July 2023).
- [17] S. N. Meissner, M. Bächinger, S. Kikkert, J. Imhof, S. Missura, M. C. Dominguez, and N. Wenderoth: Self-Regulating Arousal via Pupil-Based Biofeedback, *Journal of Nature Human Behavior* (Oct. 2023).
- [18] H. I. Liao, H. Fujihira, S. Yamagishi, Y. H. Yang, and S. Furukawa: Seeing an Auditory Object: Pupillary Light Response Reflects Covert Attention to Auditory Space and Object, *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 35, No. 2, pp. 276–290 (Feb. 2023).
- [19] K. H. Spring and W. S. Stiles: Variation of Pupil Size with Change in the Angle at Which the Light Stimulus Strikes the Retina, *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 32, pp. 340–346 (Jan. 2010).
- [20] Z. Hampton: Raven’s Advanced Progressive Matrices™ Practice Book, Independently published (Apr. 2022).