

知っておきたいキーワード

瞳 孔

金 成 慧†

† 宇都宮大学 工学部

"Pupil" by Kei Kanari (Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Tochigi)

キーワード：対光反射，メンタルエフォート，覚醒度，瞳孔模倣，視覚的注意，ヒューマンマシンインタフェース

光学的機能

眼の虹彩に囲まれた孔の部分を瞳孔といいます。ここから外界の光が入り、それが網膜・脳などで処理されることで、いま皆さんが見ている視覚世界が生じます。網膜からの反射光は光源の位置にしか戻らないため、瞳孔は私たちには黒く見えます。虹彩にはメラニン色素があり、その重なり具合が虹彩の模様（虹彩紋理）となります。また、メラニン色素は太陽からの紫外線を吸収することで細胞を守る役割があり、色素の量によって虹彩の色が変わりま

す。そのため、日本など太陽光の強い地域の人の色素量は多く、虹彩は黒や茶色に見え、北ヨーロッパなど太陽光の弱い地域の人の色素量は少なく、虹彩は青や灰色に見えます。

瞳孔のよく知られた機能は、明るいところで収縮し網膜に到達する光の量を調整する対光反射だと思います。瞳孔の大きさは虹彩にある2つの平滑筋（瞳孔括約筋、瞳孔散大筋）によって調整されます。瞳孔の反応には個人差がありますが、直径は1.5～9 mmの範囲で変化し、約200 msで刺激に反応します。標準的な照明環境下におけ

る瞳孔の大きさは約3 mmです。

瞳孔には光量の調整以外にも、網膜に映る像のボケを減少させる機能もあります。例えば、近い対象を見るときに瞳孔が収縮することで被写界深度を深め、ボケを減少させます（近見反応）。また、錐体が機能するのに充分明るいレベル（明所視）において、瞳孔が収縮することで、色収差（光の波長ごとに屈折率が異なるため、焦点位置が変化する現象収差）や球面収差（光が光軸に平行に入射したとき、光軸から離れるほど焦点からずれる現象）によるボケを減少させます。

認知プロセスとの関連

瞳孔 (pupil) という言葉は、相手の眼に映る“little doll (小さな人形)”を意味するラテン語の“pupilla”に由来します。古代から、「眼は魂の鏡（ローマ帝国政治家キケロ）」、「眼に心は宿る（ローマ帝国博物学者プリニウス）」という言葉があるように、眼はヒトの内部状態を反映すると考えられてきました。実際に、瞳孔はさまざまな認知プロセス（知覚、認知負荷、覚

醒度）の影響を受けることが多くの研究で示されています。

例えば、瞳孔は物理的な光の量だけではなく、知覚的な明るさに対応して変化することが示されています¹⁾。図1下に構成要素はまったく同じで、要素の配置が異なる4種類の画像を示します。B、C、Dの画像と比べて、Aの画像は中心が明るく輝いて見えると思います。これらの画像を見たときの瞳孔の大きさを図1上に示します。図1から、4種類の画像は物理的には

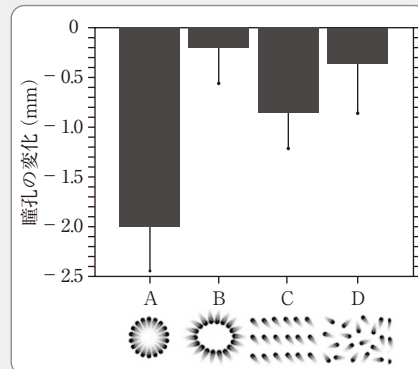


図1 知覚的明るさと瞳孔の関係
(文献¹⁾を改変)

🔍 同じ輝度（眼に入射する光の量は同じ）であるにもかかわらず、明るい知覚される画像Aを見たときに最も瞳孔が収縮していることがわかります。眼球運動の解析から、視線位置の輝度と瞳孔反応に関連がないことも示されています。さらに驚くべきことに、視覚刺激がない場合でも、明るい刺激を想像しただけで瞳孔が収縮することも報告されています²⁾。

認知負荷に関して、タスク難易度が上がると瞳孔が散大します³⁾。例えば、被験者は1秒おきに呈示される1桁の数字を覚えて報告します。覚える数が3個から7個に増えるにしたがって瞳孔はより散大し、その散大は報告前にピークに達し、報告が終わると縮瞳し始めました。このことから、瞳孔は認知制御におけるエフォートの間接的な指標として利用できることが示されます。覚

醒度に関しては、観察者が興味のある対象に対して瞳孔は散大します⁴⁾。例えば、風景画像よりも異性の画像に対して散大し、空腹な人は食べ物の画像に対して満腹な人よりも散大します。したがって、瞳孔を測定することで、人の興味対象を推定できる可能性があります。

瞳孔模倣

瞳孔は人の内部状態を反映するため、それをコミュニケーションのツールとして用いることで、社会集団の繁栄に貢献してきた可能性が示唆されています。そのエビデンスとして、瞳孔模倣という現象があります。Simmsは、同一男性・同一女性の瞳孔の大きさがそれぞれ異なる写真4枚に対する瞳孔反応を測定しました⁵⁾。その結果、男性被験者は瞳孔の大きい女性の写真に、女性被験者は瞳孔の大きい男性の

写真に対して、より大きい散瞳が生じました。瞳孔散大は、その人と対面している人に対する好意（興味）を示していると解釈され、自身の瞳孔を散大させることで、好意を抱いてくれる人に対して好意を返している（好意の返報性）のではないかと考えられます。

瞳孔模倣は他者に対する信頼の指標としても用いられます⁶⁾。Kretらは、パートナーの瞳孔が散大・静止・縮小する動画を観察した後、その相手に対して投資するかどうか決定する実験をしました（図2左）。その結果、瞳孔が

散大する人を観察すると、相手に対する投資額が増加し（図2右グラフの青バー）、被験者の瞳孔も散大しました（図2中央グラフの青バー）。また、この瞳孔散大の模倣度合いと投資額は内集団（同じ人種）においてのみ正の相関が見られました。さらに、人とチンパンジーにおいて、同種の瞳孔散大に対してのみ模倣が生じた⁷⁾ことから、瞳孔模倣のメカニズムは系統発生的に古く、種間で共有されている可能性があります。

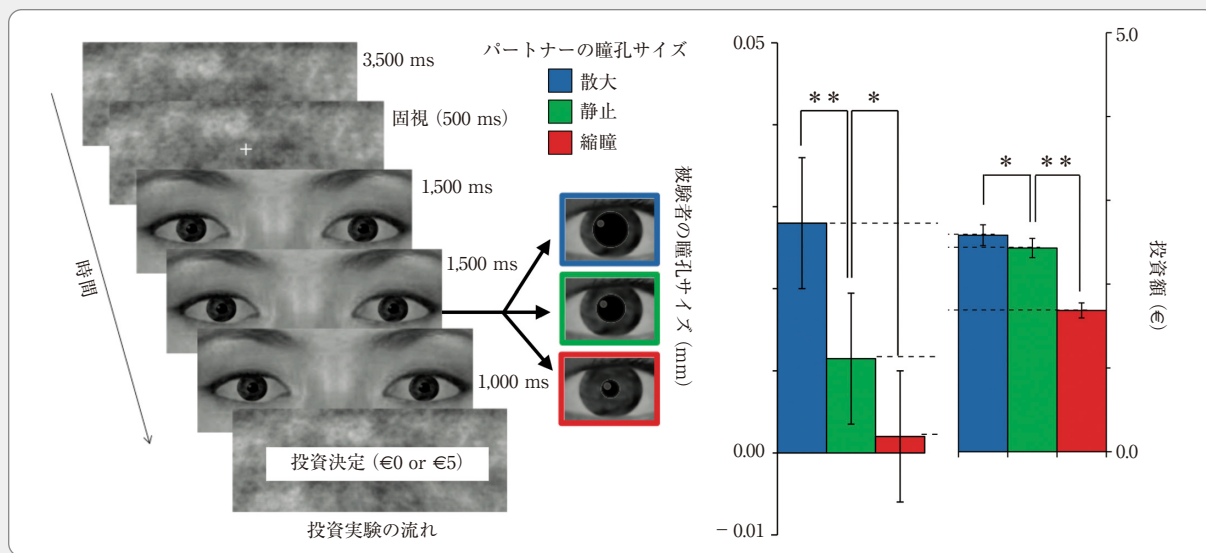


図2 瞳孔模倣と信頼性の関係（文献⁶⁾を改変）

視覚的注意に基づいたヒューマンマシンインタフェースへの応用

瞳孔は視線位置の明るさだけでなく、視覚的に注意を向けた位置の明る

さに対応して変化することが明らかになっています⁸⁾。図3(a)のように、画面中央に固視点と注意を向ける方向を示す手がかりが始めに呈示され、その後、その左右に白と黒の円が呈示されます。被験者は固視点を見たまま、

教示された方向の円に注意を向けます。その結果、白い円に注意を向けたときの瞳孔は黒い円よりも収縮しました（図3(b)、黒線が黒い円、白線が白い円に対する瞳孔反応）。🔍

近年、この注意と瞳孔の関係に基づいた非接触文字入力装置の開発が検討され始めています。これまでの非接触型文字入力装置は、視線を入力したい文字の上に持ってくることで入力を決定していました。そのため、大きな入力画面が必要であり、視線を常に動かし、入力決定の際に凝視する必要

があるため、ユーザの目に大きな負担をかけるという問題点がありました。Mathôtらは、視線を動かさずに注意だけで文字入力可能な手法を提案しました⁹⁾。その原理は、同心円上に文字を配置し、文字の背景輝度を周期的に変化させ、瞳孔反応から注意を向けた文字を推定するというものです。た

だし、キーボードなどによる文字入力と比べると、やはり入力時間が遅いため、身体が不自由な高齢者や閉じ込め症候群などの障害者のためのコミュニケーションツールや、昨今の新型コロナウイルスなどへの感染症予防の非接触入力ツールとしての活用が期待されます。

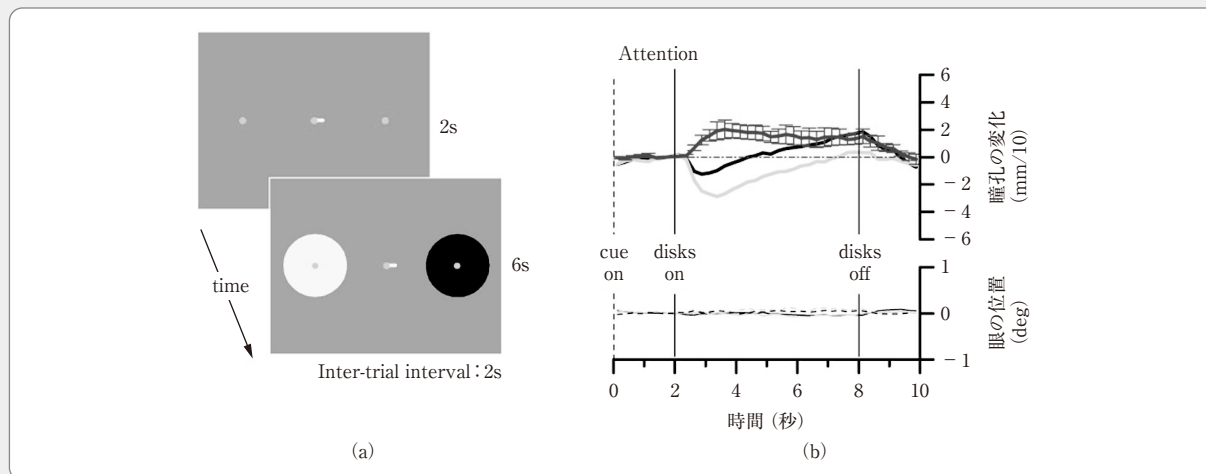


図3 注意と瞳孔の関係

むすび

瞳孔は人の意識では制御できない無意識的な反応であることから、注意状態や内部状態を推定するのに信頼性が高い指標の一つであると考えられます。また、生理学的手法 (EEG, fMRI, MEG) と比べて、トレーニングがいない、非侵襲性である、安価・容易に測定できるなど、さまざまな利点があります。そのため、これからの新たな障害診断やヒューマンマシンインタフェースのツールとして大いに期待されます。

(2021年3月17日受付)

参考文献

- 1) B. Laeng and T. Endestad: "Bright illusions reduce the eye's pupil", Proceedings of the National Academy of Sciences, 109, 6, pp.2162-2167 (2012)
- 2) B. Laeng and U. Sulutvedt: "The eye pupil adjusts to imaginary light", Psychological science, 25, 1, pp.188-197 (2014)
- 3) D. Kahneman and J. Beatty: "Pupil diameter and load on memory", Science, 154, 3756, pp.1583-1585 (1966)
- 4) E.H. Hess and J.M. Polt: "Pupil size as related to interest value of visual stimuli", Science, 132, 3423, pp.349-350 (1960)
- 5) T.M. Simms: "Pupillary response of male and female subjects to pupillary difference in male and female picture stimuli", Perception & Psychophysics, 2, 11, pp.553-555 (1967)
- 6) M.E. Kret, A.H. Fischer and C.K. De Dreu: "Pupil mimicry correlates with trust in in-group partners with dilating pupils", Psychological science, 26, 9, pp.1401-1410 (2015)
- 7) M.E. Kret, M. Tomonaga and T. Matsuzawa: "Chimpanzees and humans mimic pupil-size of conspecifics", PLoS One, 9, 8, e104886 (2014)
- 8) P. Binda, M. Pereverzeva and S.O. Murray: "Attention to bright surfaces enhances the pupillary light reflex", Journal of Neuroscience, 33, 5, pp.2199-2204 (2013)
- 9) S. Mathôt, J.B. Melmi, L. Van Der Linden and S. Van der Stigchel: "The mind-writing pupil: A human-computer interface based on decoding of covert attention through pupillometry", PLoS one, 11, 2, e0148805 (2016)



金成 健 2014年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。2015年、東京工業大学研究員。2017年、玉川大学脳科学研究所嘱託研究員。2020年、宇都宮大学工学部助教となり、現在に至る。専門は視覚心理物理学。主に眼球運動、瞳孔反応に関する研究に従事。博士(工学)。