

人の内部状態と瞳孔径の定量的関係

丹下 雄太[†]中澤 篤志[‡]西田 豊明^{‡‡}[†] 京都大学大学院 情報学研究科[‡] 京都大学大学院 情報学研究科^{‡‡} 京都大学大学院 情報学研究科

1. はじめに

ヒトの瞳孔(図1)はカメラの絞りのように入射光量の調節を行っており, 明るい環境下では縮小し暗い環境下では拡大する. 環境の平均輝度に起因する瞳孔径の変化については多くの研究が為されており, Watson によりモデルが提唱されている [1].

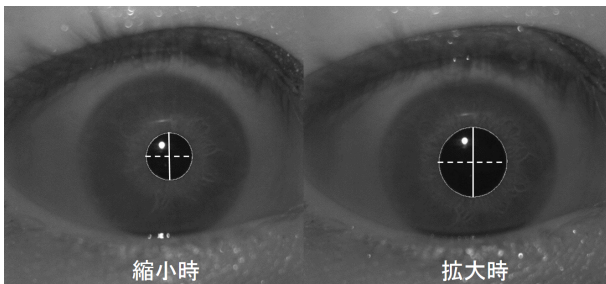


図1: 瞳孔の拡張, 及び楕円マッチングによる瞳孔径の計測

一方, 瞳孔径変化は外界の明るさだけでなく認知的負荷 [4][5], 記憶想起 [2], ストレス [7] や興味 [3] 等の人間の内部状態にも起因することが知られている. この性質を用い, 瞳孔径変化から生理指標を抽出することができれば, 従来の電極取り付けによる皮膚電位計測や心拍計測に代わり, 人の情動の非接触な計測が可能になり, 日常的な計測が期待できる.

しかしながら, 瞳孔計測を日常環境で実用的に使用するにはいくつかの課題がある. 特に, 瞳孔径変化に情動が与える変化は微小であると考えられ, 従来研究においても多数の試行から統計的な変化を検出しようとした研究が多く, 実応用するには信頼性および簡易性が不十分であると考えられる.

これらを踏まえ我々は, 内部状態と瞳孔径の定量的関係を明らかにすることで瞳孔径変化の実用性を高める試みを行っている. 本研究では内部状態と瞳孔径の関係の内の一つとして, 操作タスクの難易度と瞳孔径変化との関係に焦点を絞り, 調査を行った.

2. 操作タスクの難易度と瞳孔径変化

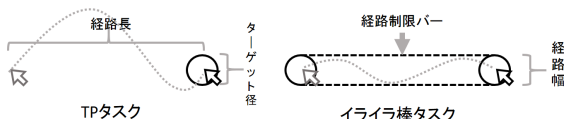


図2: TP タスクとイライラ棒タスク

被験者に課されているタスクの難易度を定量的に測定できれば, ゲームの評価やドライバーの事故防止等に

pupil dilation is related to the difficulty of the irritating maze game: Yuta Tange (Kyoto Univ.), Atsushi Nakazawa (Kyoto Univ.), Toyooki Nishida (Kyoto Univ.)

用が期待できる. 先行研究により, タスクを行わせ, 認知的な負荷を与えるとヒトの瞳孔は拡張することが示されている [4][5]. Jiang ら [4] は Tartet Pointing(TP) タスクを被験者に行わせ, 瞳孔計測を行っている.TP タスクは図2左のように, ターゲット間でカーソルを移動させるタスクである. Jiang らの実験結果では,TP タスク遂行中の瞳孔径のピーク値はフィッツの法則で計算した難易度と正の相関を示すとされている. しかし, 我々が同様の検証実験を行った結果では再現性が悪く, 単一被験者, 単一試行では難易度と瞳孔径ピーク値の関係は確認できなかった. TP タスクを用いた実験モデルでは難易度の差が小さく, 難易度と瞳孔径の関係調査に不適切であると考え, 我々は新たに提案する「イライラ棒タスク」を用いた瞳孔計測実験を行うことにした. イライラ棒タスクは図2右に示すように TP タスクに経路幅制限を加えたタスクである. タスクを行う被験者は, 経路幅制限バーに触れないよう, ターゲットまでカーソルを移動させる必要がある.

3. 実験概要

実験では 10 人の被験者それぞれに対し, 15 段階 (4~18 ピクセル, 1 ピクセルあたり 0.5mm) の経路幅をランダムに選択し, ディスプレイとの距離及び輝度は一定の環境下で約 30 回ゲームを行わせた (図3). 瞳孔の計測

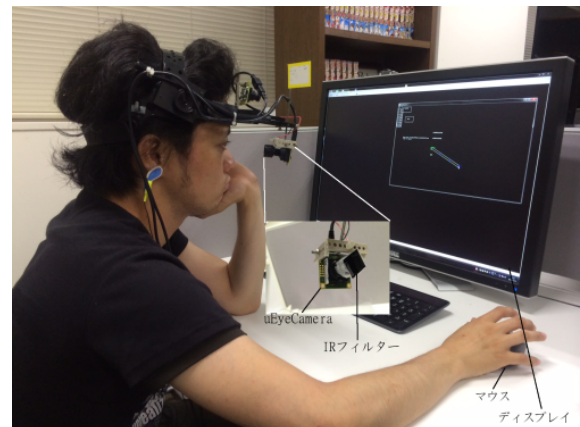


図3: 眼球画像の取得と実験環境

にはヘッドマウントアイカメラ(図3)を用い, 赤外線光下の眼球画像から楕円マッチング(図1)により軸を計測し, 横運動に不変な長軸(図1実線)を用いた. 加えて, 瞬きフレームの除去, 及びローパスフィルタ(カットオフ周波数 1Hz)によるノイズ除去を行った. 図4は上記の処理を行って得られた, イライラ棒タスク遂行中の被験者の瞳孔径時系列グラフの1例である.

タスク中の瞳孔はタスク開始直後に収縮を起こし, 約 1s 程度で最小値に達する(図4(a)). その後, 徐々に拡大し最大値に達する(図4(b)). 今回, この最小値を基準値とし, タスク中の最大値との差を変化量として取得した(図4). これにより, 前後の状態に依存せず, 現在のタスクの

影響のみを観察することができると考える。得られた瞳孔径変化量に対し、被験者毎に不変である角膜径との比率を求めることでキャリブレーションを行った。

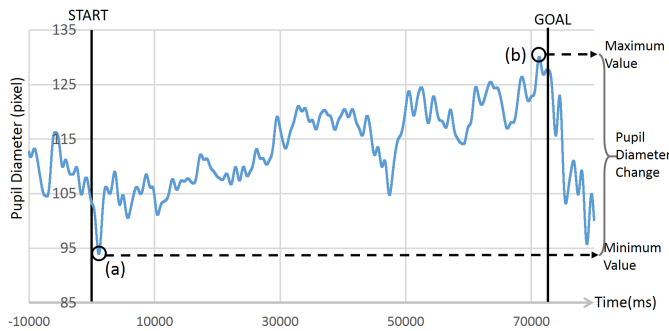


図 4: イライラ棒タスク遂行中の被験者の瞳孔径変化

4. 実験結果と考察

表 1 は 10 人の被験者それぞれに対し、瞳孔径変化、経路幅、遂行時間（表中 p,w,t）それぞれ 2 変数間のピアソンの積率相関係数と p 値を求めた結果である。

subject	Cor(p,w)	p-value	Cor(p,t)	p-value	Cor(t,w)	p-value
z1	-0.52	3.2e-03	0.63	1.9e-04	-0.81	6.6e-08
2	-0.57	4.7e-03	0.47	2.4e-02	-0.81	3.5e-06
3	-0.51	4.3e-03	0.40	3.0e-02	-0.88	1.1e-10
4	-0.75	8.0e-08	0.77	3.9e-08	-0.85	1.9e-11
5	-0.63	1.1e-04	0.54	1.4e-03	-0.86	5.4e-10
6	-0.48	3.4e-03	0.59	1.7e-04	-0.80	5.7e-09
7	-0.63	1.1e-04	0.75	8.8e-07	-0.75	9.8e-07
8	-0.21	2.0e-01	0.37	2.3e-02	-0.73	3.3e-07
9	-0.52	2.2e-03	0.31	7.7e-02	-0.77	1.9e-07
10	-0.46	1.2e-02	0.77	1.5e-06	-0.56	1.8e-03

表 1: イライラ棒タスクにおけるそれぞれの被験者の瞳孔径変化と経路幅、遂行時間の相関係数及び p 値

実験結果から、遂行時間と経路幅の間に強い負の相関が確認できた。イライラ棒タスクでは、経路幅が小さくなるにしたがい、難易度が上昇することが確認できる。また、瞳孔径変化と経路幅に中程度の負の相関が、瞳孔径変化と遂行時間には中程度の正の相関が確認でき、どちらも 10 人中 9 人で有意であった。加えて、我々は過去に時間制限によりイライラ棒タスクの遂行時間を均一化した検証も行っており [6]、経路幅が狭くなるほど瞳孔径が拡大する傾向が確認されている。

以上より、イライラ棒タスクの難易度の上昇に従い瞳孔径変化量が拡大することが確認できた。

次に、経路幅と瞳孔径間の関係を明確化するため、線形混合モデルを仮定し、最尤推定を行った。AIC が最小であったのは以下のモデルとなった。 β は固定効果、 r_i は被験者ごとに異なる変量効果である。Satterthwaite 近似に基づく自由度から β_0, β_1 の p 値を算出した結果、それぞれ $< 2e^{-16}$, $3.183e^{-08}$ であった。

$$Pupil_i = \beta_0 w + \beta_1 + r_i \quad i \in Subjects$$

$$\beta = (-3.437e^{-3}, 1.025e^{-1}) \quad r_i \sim \mathcal{N}(0, 0.02498^2) \quad (1)$$

図 5 はタスクの経路幅と瞳孔径変化量との関係を示したグラフであり、切片成分のそれぞれの被験者の変量効果を減算している。破線は固定効果による直線である。こ

のモデルにより、瞳孔径からある程度定量的に難易度を計測することができると考えられる。

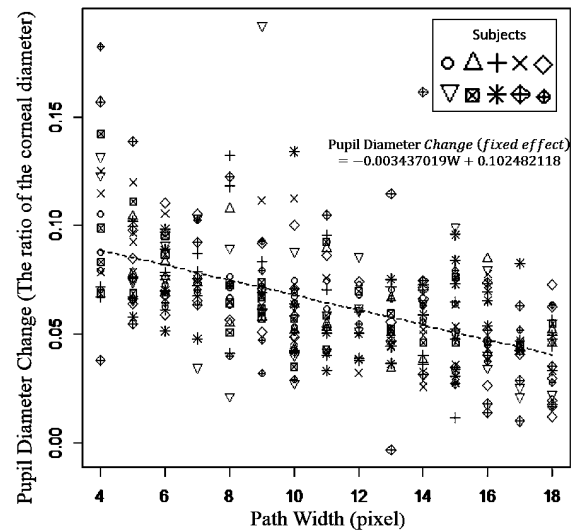


図 5: 各被験者のイライラ棒タスクの経路幅と瞳孔径変化量及び固定効果（変量効果の切片を減算）

5. まとめ

本研究では、操作タスクの難易度と瞳孔径変化の定量的関係を明らかにするため、イライラ棒タスクの経路幅及び遂行時間と瞳孔径変化との関係を調査した。実験結果から、それぞれに有意な相関が確認でき、イライラ棒タスクにおいて難易度が上昇するにつれて瞳孔径変化量が大きくなる傾向が見て取れた。

また、式 1 に記したように、切片成分に被験者の変量効果を加えた混合線形モデルを推定した。これにより、瞳孔径変化から操作タスクの難易度をある程度定量的に計測できる可能性が示された。

しかしながら、現状の我々のモデルでは誤差の分散が大きく、難易度の測定手法としては未だ実用性が不十分である。今後は時間微分による勾配分析や周波数分析を行い、より安定した瞳孔径パラメータを探索する必要がある。

参考文献

- [1] I.Yellott J. C. Watson, A. A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of Vision*, 12(10), 2012.
- [2] H.Papesh M. D.Goldinger, S. Pupil dilation reflects the creation and retrieval of memories. *Psychological Science*, 21:90-95, 2012.
- [3] Eckhard H. Hess. Attitude and pupil size. *Scientific American*, 212:46-54, 1965.
- [4] M.Stella A. Tien G. Zheng Bin. Bednarik R. Jiang, X. Pupil dilations during target-pointing respect fitts' law. *ETRA2014*, 2014.
- [5] 水科 宮内, 金子. 輝度変化と心理状態が瞳孔径変動に与える影響. *信学技報 WIT*, 福祉情報工学, 109:19-21, 2009.
- [6] 西田 丹下, 中澤. 認知的負荷と瞳孔径変化、及び心拍の関係. *HI シンポジウム 2014 論文集*, 2014.
- [7] 木竜 松木 飯島, 小杉. ストレス状態の推定に有効な瞳孔反応パラメータの探索. *生体医工学*, 49:946-951, 2011.