

# PupilShutter : 瞳孔収縮を入力とする注釈提示システム

加藤 拓実<sup>\*1</sup> 黒田 嘉宏<sup>\*1</sup> 吉元 俊輔<sup>\*1</sup> 大城 理<sup>\*1</sup>

PupilShutter: an anotation system triggered by voluntary pupil constriction

Takumi Kato<sup>\*1</sup>, Yoshihiro Kuroda<sup>\*1</sup>, Shunsuke Yoshimoto<sup>\*1</sup> and Osamu Oshiro<sup>\*1</sup>

**Abstract** – Various wearable user interfaces detecting voluntary input are proposed in recent years. In contrast to the previous research in which divergence eye movement is proposed as a voluntary input, we focused on a pupil constriction along with convergence. *PupilShutter* tells what you are gazing by detecting voluntary convergence eye movement. When the pupil constriction is detected, the proposed system trims visual field image based on the gazing points and displays an annotation sound generated by analysing the trimmed image.

**Keywords** : User interface, Pupil, Near reflex, Monocular eye tracking, Annotation

## 1. はじめに

眼球運動は、ヒトの注意や心理状態を反映していると共に、意図的に行える運動のため、生理的な関心と工学的な利用の両面から、眼球運動計測技術の開発が進んでいる。例えば、習熟した操作である場合を除き、ヒトは操作前にまず操作対象へ視線を向けるため、眼球運動は高速なポインティングデバイスとしての利用可能性があると言われる [1]。一方で、コンピュータへの入力には、ポインティングに加えて選択を行う必要があるが、視線の情報だけでは見た対象全てを選択してしまう Midas touch problem と呼ばれる問題がある [2]。この問題の解決策には、視線の位置情報はポインティングのみに利用し、注視時間や瞬目 [3]、視線パターン [4]、輻輳開散運動 [5] などによる入力提案されている。

眼球運動計測において得られるその他の情報源の一つに、瞳孔径がある。瞳孔径変動の主な要因には、眼球に入射する光量や焦点を合わせる距離などが挙げられており、随意に変動させる方法も提案されていながら [6]、ユーザインタフェースにおける入力として利用する例は少ない。

本研究では、単眼計測における Midas touch problem の解決策として瞳孔近見反射に着目し、片目で対象を注視しながらユーザに近い側に焦点を合わせる動作を入力とし、注視物体の注釈情報を音声によって提示するシステムを提案する。

## 2. 瞳孔の計測法と径変動のインタフェース応用

本節では、瞳孔の構造と眼球の運動を利用したインタフェース、そして瞳孔径変動を利用した事例について述べる。

### 2.1 瞳孔の構造と瞳孔径変動

瞳孔 (Pupil) は眼球に開いた孔である。図 1 に示すように、瞳孔は虹彩 (Iris) によって形成されている。瞳孔の直径に当たる瞳孔径は、虹彩の変形によって定まる。虹彩には、瞳孔を中心として放射状で長さ  $50\ \mu\text{m}$ 、幅  $5 - 7\ \mu\text{m}$  の瞳孔散大筋 (Dilator pupillae) と、同心円状で厚さ  $100 - 170\ \mu\text{m}$ 、幅  $0.7 - 1.0\ \text{mm}$  の瞳孔括約筋 (Sphincter pupillae) の二つの平滑筋がある [7]。つまり瞳孔径変動は、瞳孔散大筋と瞳孔収縮筋によって定まる。平滑筋は自律神経系の支配下にある不随意筋であり、随意に制御できない。図 1 に眼球の断面図および眼球画像と、断面図の破線で囲んだ範囲を拡大して瞳孔の筋の位置を記した図を示す。

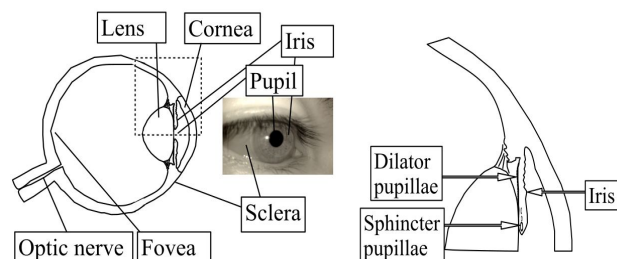


図 1 眼球の構造および虹彩の断面図  
Fig.1 Eye structure and cross section of iris.

内眼筋により網膜上に結像する像を明瞭にするため

<sup>\*1</sup>: 大阪大学 大学院基礎工学研究科

<sup>\*1</sup>: Graduate School of Engineering Science, Osaka University

の水晶体 (Lens) の変形と、瞳孔の散大収縮による運動を調節 (Accommodation) と呼ぶ。以下では、瞳孔径変動の主な要因と言われる、眼球への入射光量、固視距離について記す。瞳孔筋の主要な機能は、明瞭な像を得るために眼球内に入射する光量を調節することである。急激な入射光の増加に対する瞳孔の収縮は対光反射と呼ばれる。Fan らは、瞳孔径の変動を瞳孔収縮筋と瞳孔散大筋の二つの筋活動による現象と捉えて瞳孔径の光フラッシュ応答をモデル化している [8]。

固視距離は、網膜に明瞭な像が形成される距離にある物体から瞳孔中心までの距離である。Lee らは、注視点位置に基づく瞳孔径変動の要因を調査する実験を行っている [9]。瞳孔径と固視距離は正の相関があることが分かっている。この関係には、近い距離に焦点を合わせた際に狭くなる焦点深度を、瞳孔径を小さくすることによって補償する働きがあると考えられる。

本論文では、片目で対象を注視しながら、ユーザ側に焦点を合わせる動作を近見動作と定義する。近見動作は、瞳孔を随意に収縮させるための方法である。図2に右目による近見動作 (Nearlook operation) の様子を表す。

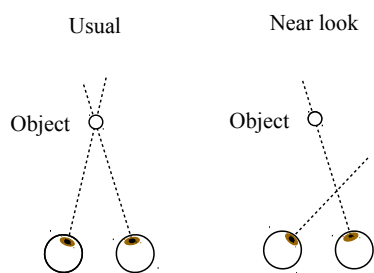


図2 近見動作  
Fig. 2 Nearlook operation.

## 2.2 アイトラッキングインタフェース

眼球の運動は、身体に麻痺症状を抱えた会話が不可能な患者にとっての有力な意思疎通手段となる。堀らは、眼電位法によって計測される視線変動パターンと瞬目を組み合わせて、入力として利用する方法を提案している [4]。眼電位法とは、角膜と網膜がそれぞれ正負に帯電していることを利用し、眼周辺皮膚の電位変化を計測して眼球運動を推定する方法である。本手法では4方向の視線パターンと瞬目による選択を可能にしている。視線のなす角が減少する眼球運動を開散性眼球運動と呼ぶ。工藤らは、眼球に対して赤外線を照射する赤外線法によって計測される開散性眼球運動を選択動作として検出する手法を提案している [5]。本手法における正答率は、従来の瞬目入力と同等程度となっている。

一方、瞳孔径を利用した事例に関しては、柏原らが、複素 Morlet ウェーブレットを用いて、瞳孔の反応を利用して不快な画像を自動分類を試みている [10]。波形の識別率は最高で 87.5 %となっている。Ekman らは視線や瞬目に加えて瞳孔径変動を用いて操作するゲーム、Invisible Eni を提案している [11]。Inisble Eni は、幽霊に追われるキャラクターを注視によって移動させ、瞬目で回避し、散大した瞳孔で花を注視することで特殊効果が得られるといった設計になっている。

Ekman らはユーザが瞳孔の径変動を制御できるようになる上で最も影響を及ぼすのが、フィードバックと学習であると述べている。また、Ekman らは、表1に示す瞳孔の径変動を随意に制御するとされる方法についても調査しており、統計的に有意な方法は、身体活動、自己誘発痛、肯定的感情、焦点距離の変化であると結論づけている [6]。

表1 瞳孔径を変動させる方法  
Table 1 Methods of pupil control.

Category	Instructed methods of pupil control
Physical activity	Muscular effort and physical activities such as holding one's breath.
Self-induced pain	Various (mild) forms of self-induced pain, pain-related thoughts.
Positive emotions	Positive thoughts and emotion-related behavior (smiling, laughing).
Negative emotions	Negative thoughts and emotion-related behavior (frowning, clenching teeth).
Cognitive tasks	Performing calculations and reversing words in their mind.
Point of focus	Focusing the gaze on a point near or in the distance.
Concentration	Concentrating on making the feedback circle grow or shrink.

## 2.3 本研究の位置づけ

瞳孔径は、変動させる方法が示唆されているにもかかわらず、これまでの事例では随意的な入力として利用されていない。本研究では、近見動作による瞳孔収縮を検出し、単眼計測における新たなモダリティとしての瞳孔径の利用を目指す。提案手法は、単眼計測により、計測していない方の眼球のみが輻輳する特殊な輻輳性眼球運動を検出する試みと捉えることができる。本研究では、適切な操作の過程で効果音を出力し、注釈情報も音声で提示することで、注視と瞳孔径変動による選択に基づく音声注釈提示手法を提案する。

## 3. 瞳孔近見反射検出に基づく注釈提示

本節では、眼球運動計測による注釈システムの構成を説明する。

### 3.1 システム概要

図 3 に提案システムの概要を示す。

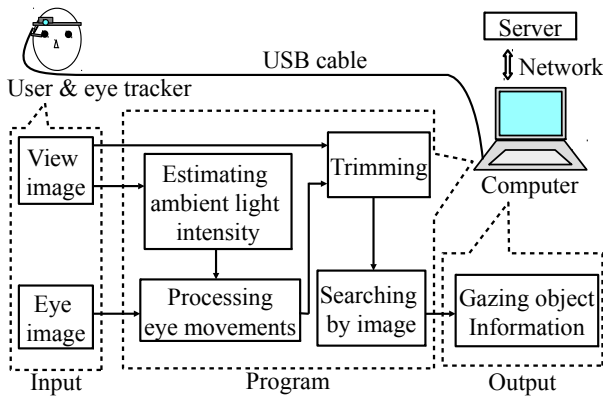


図 3 システムの概要  
Fig. 3 System overview.

システムに対する入力、ユーザの眼球を映す眼球画像と、ユーザの視野を映す視野画像である。ユーザは、注視を必要とする対象に対して近見動作を行う。提案システムは、眼球画像から瞳孔の中心位置と随意収縮を推定する。瞳孔の収縮が起きた時に、視野画像上に対応付けられた視点座標を中心とする注視範囲を、画像から切り出して画像認識を行うことによって得られた注視物体の情報を、ユーザに音声で提示する。

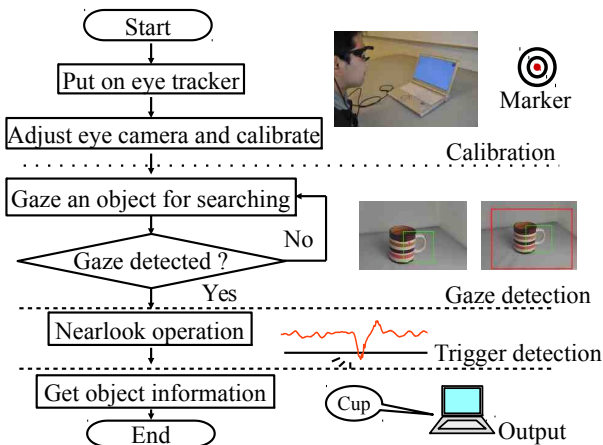


図 4 操作手順  
Fig. 4 Operating procedure.

図 4 に本システムが対象とするユーザの操作手順を示す。まず、アイトラッカを装着したユーザは、視野画像上での注視位置を眼球画像から推定するための校正を行う。そして、注視情報を必要とする対象に対して近見動作を行うことで生じる瞳孔の収縮が検出され、注視点に基づいた情報が提示される。

### 3.2 注視判定と可変トリミング

図 5 に、注視枠とトリミング枠を示す。緑色の注視枠は常に表示されており、注視点が枠外に出た際には再描画される。注視点が注視枠内に一定時間留まっていると、注視判定され、赤いトリミング枠がディスプレイを視認しなくとも操作できるように効果音と共に表示される。

視野画像上からトリミングする範囲 (図 5 に示すトリミング枠) を設定する際に固視微動を利用する。固視時の視野画像上での直交座標系における注視座標  $s$  の確率的に生じている微小変位が、平均  $\mu$ 、分散  $\sigma^2$  の正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  に従うと仮定し、一定時間内に観測された注視座標  $s$  の分散を利用して算出される  $\sigma^2$  を利用して、トリミング枠の大きさに反映させる。

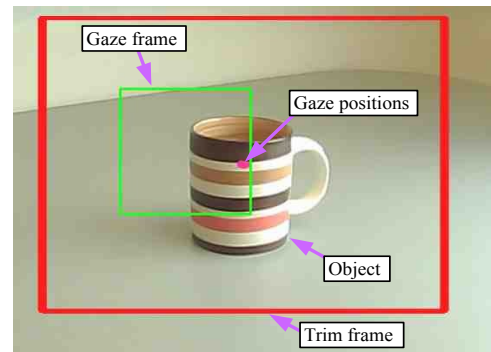


図 5 注視枠とトリミング枠  
Fig. 5 Gaze frame and Trim frame.

### 3.3 瞳孔収縮の検出

注視が判定された状態で瞳孔が収縮すると入力として検出される。近見動作に伴う瞳孔収縮 (以下、トリガ波形と呼ぶ) を検出するための処理を以下に記す。

- 瞳孔収縮の加速度を利用した方法  
瞳孔径の急激な減少を特徴と捉え、瞳孔径信号に平滑化と二階微分を施したトリガ信号に閾値を設定してトリガ検出を行う。
- ウェーブレット変換による方法  
トリガ波形のような時間的に局在した波形を実時間で検出するために、時間周波数解析で用いられるウェーブレット変換を用いる。一定区間の周波数帯に対して、閾値を設定してトリガ波形を検出する。

## 4. システムの実装と評価

本節では、実装したシステムの詳細と、構築したシステムを評価するために行った実験について述べる。

### 4.1 実装

提案システムのハードウェアには、UG 製のアイトラッカ (Pupil-Labs) とノート PC (CF-SX1, Ubuntu 16.04 LTS, Intel Core i5-2540M 2.60 GHz quad core,



4.0 GB) を用いた。瞳孔検出および視線推定には pupil-labs のソースコードを利用し、画像検索用途の API として Google Cloud Platform の visionAPI を用いた。音声出力用途として、テキスト読み上げソフトには、多言語対応の eSpeak と日本語音声対応の Open Jtalk を利用し、効果音の再生にはコマンドライン音声再生ソフトの mpg321 を用いた。

試作システムを用いて注釈提示を行った際に、検索に用いられた画像と出力結果の例を図 6 に示す。およそ妥当な出力結果が得られた。屋外における注釈提示の様子を図 7 に示す。提案システムは、ネットワーク環境の整備によって屋外でも使用が可能であることを確認した。



図 6 検索画像と出力結果の例  
Fig. 6 Trimmed images and Output examples.

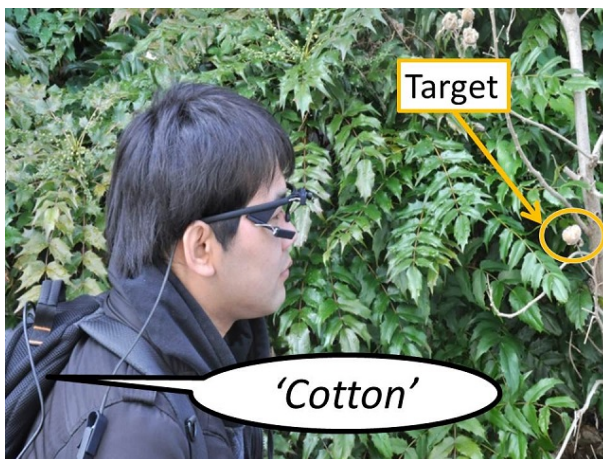


図 7 屋外での使用の様子  
Fig. 7 Outside usage.

## 5. おわりに

本研究では、随意に変動させる方法が提案されているながらも、随意入力としてこれまで用いられなかった瞳孔の近見動作に伴う径変動の利用を試みた。従来のアイトラッキングインタフェースにおける問題点として挙げられていた Midas touch problem に対する単眼計測による解決策の一つとして、瞳孔近見反射に基づき随意に注釈を提示するシステムを開発した。提案システムの入力操作検出精度を評価するための被験者実

験の結果、ユーザの近見動作によって、屋内に限らず屋外でも注釈を提示できるシステムであることが確認された。今後の課題として、瞳孔変動からの固視距離推定や、頭部を注視対象に接近させて瞳孔を収縮させる入力動作の評価などが挙げられる。

## 参考文献

- [1] Sharma, A.,: Eye Gaze Techniques for Human Computer Interaction : A Research Survey; International Journal of Computer Applications, Vol.71, No.9, pp.18-29 (2013)
- [2] Boris, V., Mikhail, R., Mikhail, M.: New Solution to the Midas Touch Problem - Identification of Visual Commands Via Extraction of Focal Fixations; Procedia Computer Science, Vol.39, pp.75-82 (2014)
- [3] Królak, A., Strumillo, P.: Eye-blink Detection System for Human-computer Interaction; Universal Access in the Information Society, Vol.11, No.4, pp.409-419 (2012)
- [4] Hori, J., Sakano, K., Saitoh, Y.: Development of a Communication Support Device Controlled by Eye Movements and Voluntary Eye Blink; Proceeding of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp.4302-4305 (2004).
- [5] Kudo, S., Okabe, H., Hachisu, T., Sato, M., Fukushima, S., Kajimoto, H.: Input Method using Divergence Eye Movement; CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems on - CHI EA '13, pp.1335 (2013).
- [6] Ekman, I., Poikola, A., Mäkräinen, M., Takala, T., Härmäläinen, P.: Voluntary Pupil Size Change as Control in Eyes only Interaction; Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications - ETRA '08, pp.185 (2008).
- [7] McDougal, D., Gamlin, P.: Autonomic Control of the Eye; Comprehensive Physiology, Vol.5, No.1, pp.439-473 (2015).
- [8] Fan, X., Yao, G.: Modeling Transient Pupillary Light Reflex Induced by a Short Light Flash; IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.58, No.1, pp.36-42 (2011).
- [9] Lee, E., Lee, J., Park, K.: Experimental Investigations of Pupil Accommodation Factors; Investigative Ophthalmology and Visual Science, Vol.52, No.9, pp.6478-6485 (2011).
- [10] Kashiwara, K., Ito, M., Fukumi, M.: Automatic System to Remove Unpleasant Images Detected by Pupil-Size Changes; International Journal of Computer Science Issues, Vol.9, No.1, pp.68-73 (2012).
- [11] Ekman, I., Poikola, A., Mäkräinen, M., Invisible Eni - Using Gaze and Pupil Size to Control a Game; Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '08, pp.3135-3140 (2008).
- [12] Jacob, R.: Eye Movement-Based Human-Computer Interaction Techniques : Toward Non-Command Interfaces; Advances in human-computer interaction, Vol.4, pp.151-190 (1993)