

アイウェア型赤外線距離センサアレイを用いた 眼球および瞬目の認識手法

双見 京介^{1,a)} 寺田 努^{2,b)}

概要: 目の活動のセンシングを常時行える技術が今後一般に普及すると、有益な情報やサービスが広範囲に提供されると予測できる。例えば、瞬きや眼球の運動を用いて心身の健康状態の推定やハンズフリー入力が常時行え、また、日常全体の目の活動のデータから多くの有益な情報を得られる。本研究では、赤外線距離センサを用いて目(眼球と瞼)の動きをセンシングするアイウェアを開発し、提案手法が、目の活動のセンシングを常時行えるかを検証する。本手法は、眼球と瞼の活動に伴って起こる目周辺の皮膚の動きをもとに、眼球と瞼の動きを認識する。この皮膚の動きの認識は、目の前方に設置された赤外線距離センサから皮膚までの距離の変化をもとに行う。本稿では、赤外線距離センサをメガネのフレームの内側に12個埋め込んだプロトタイプデバイスを実装した。そして、提案手法が眼球と瞼の動きを認識できるのかを検証するために、眼球の向き(注視方向)、眼球の移動方向、瞬きの回数の3つの認識が行えるかを検証した。評価結果から、瞬きのノイズに関わらず眼球の向きの角度を約 10° 間隔で認識できることや、眼球の向きの異なる瞬きの回数を誤差5%以内で認識できることを確認し、提案手法が眼球と瞼の動きを認識できることを確認した。

1. はじめに

眼球や瞼といった目の活動のセンシングは、人間心身の理解に繋がる有益な情報を様々な分野に提供しており、その対象は工学、認知科学、心理学、医学、スポーツ科学、疫学、精神医学、マーケティング、教育など多岐にわたる。具体的な応用としては、ハンズフリーな入力インターフェース [1]、心身の状態の推定(例: 疲労推定 [2][3][4])、ユーザのデジタル体験や実世界体験の調査への活用、目のヘルスケアや予防医療ルール作りへの活用 [5][6]、熟練者の目の動きの解明 [7]、ADHD や自閉症といった特性の測定 [8]、など多様な目的で利用される。

目の活動のセンシングを常時行える技術が一般に普及すると、広範囲に有益な情報やサービスが提供されると予測できるが、既存手法は目の活動のセンシングを常時行ううえで、課題を残している。例えば、カメラを用いた手法は高精度に目の状態を認識できるが、一方で、環境条件によって大きく精度が落ちたり、必要とされる消費電力やプロセッ

サ性能が高くなるなどの課題がある [9][10][11]。また、鼻橋に置かれた眼電位 (EOG) センサを用いる手法は常時利用できる条件を満たしたデバイスだが、一方で、眼球と瞼の動きの認識精度が高くないという指摘がある [11][12]。

本研究では、赤外線距離センサを用いて目(眼球と瞼)の動きをセンシングするアイウェアを開発し、提案手法が、目の活動のセンシングを常時行えるかを検証する。本手法は、目の活動に伴って起こる目周辺の皮膚の動きをメガネ型デバイスに装着した赤外線距離センサにより測定し、眼球と瞼の動きを認識する。提案手法を実装したプロトタイプデバイスを作成し、注視方向、眼球の移動方向、瞬目回数の3つの要素において評価実験を行った。

以降では、2章で関連研究を紹介し、3章で提案手法を説明する。4章で評価実験について述べ、5章で提案方式に関する議論を行い、最後に6章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

2.1 アイウェアを用いた目の活動のセンシング技術

近年、目の活動のセンシングは、あらゆる場面のユーザを対象にできる装着型のデバイスを用いたものが多く登場している。装着型のデバイスの形態にもアイウェアやイヤホンなどが存在するが、以降では、アイウェアに関する手法について主に述べる。

¹ 立命館大学情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

² 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

a) futami@fc.ritsumeikan.ac.jp

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

アイウェア上のカメラを用いた手法

カメラを用いた手法は、目を撮影できる位置に設置されたカメラから得た映像を処理することで、目の活動を認識する。装着型のデバイスの既製品としては、TobiiのTobii Pro Glasses[13]、Pupil LabsのPupil Core[14]、SMIのSMI Eye Tracking Glasses[15]がある。これらの手法は、高精度な認識を行える一方、眼鏡にカメラデバイスを装着して高頻度でデータ取得を行う都合上、システムが大がかりで消費電力も大きくなるため、常時利用ではなく、研究領域などの調査で利用されている。

この手法の常時利用に関わる課題として、屋内外の照明条件に基づく精度低下 [9][10] や、身体振動条件での精度低下が挙げられる。このような実世界における環境変化への頑健性の検証の必要性は指摘されているが、その検証例はまだ少ない [11]。また、現時点ではハードウェアに関する課題があり、例えばカメラのデータの処理に要するプロセッサ性能や消費電力がウェアラブルでの常時利用を困難にさせると指摘がある。また、データ処理に高いプロセッサの処理能力が必要なことから、データを記録した後にコンピュータでデータ処理をする仕様になり、リアルタイムな認識結果に応じたライブ通知などのアプリケーション実現が難しい。

アイウェア上の EOG を用いた手法

目の活動のセンシングにおける眼電位 (electrooculogram: EOG) 法は、人間の目が電気双極子である特性を利用して目の動きを測定する手法であり、目の近くの皮膚に電極を配置することで、目が動くときの電位の変化を検出する。EOG 手法で瞼や眼球の動きをとらえる手法は、疲労推定などを対象に、多数提案されている [16][17]。近年では、日常での常時利用を想定して電極のサイズや数を小さく少なくするための研究も行われてきた [18]。常時利用可能な装着型のデバイスの EOG を用いた手法としては、鼻橋に置かれた EOG センサを用いる JINS MEME[19] があり、このデバイスを用いた様々な研究やサービス開発が行われている [20][21]。

一方、この手法は次の課題がある。眼球の垂直方向の動きの認識や、眼球と瞼の動きの区別が苦手であり、認識できる眼球と瞼の動きの解像度に制限がある [11][12]。カメラを用いた手法と同様に、実世界における環境変化への頑健性の検証が少ない。

以上はアイウェアに関するものであるが、これらとは別の装着型の手法としては、耳に装着するデバイス上の EOG を用いるものがある。真鍋らは EOG を計測する電極を耳周辺や外耳道に配置することで、眼球の向きを認識できることを明らかにしており、この手法をイヤホンやヘッドフォンに適用した手法を提案している [22][23]。

アイウェア上の赤外線距離センサを用いた手法

赤外線距離センサを用いた手法は、本研究と同様に、目の前方に設置された距離センサをもとに、目の活動を認識する。例えば、アイウェアの内側に赤外線距離センサを設置する Google Glass[24] や Dual Blink[6] がある。Google Glass にはジェスチャー入力としてユーザが誇張して行うウイंक (瞬目) を認識する機能が実装されており、Google Glass を使用した研究では瞬目の認識率が 67% と示されている [25]。また、Dual Blink[6] は瞬目を誘発するために角膜に空気を当てるといった刺激を与えることを主目的とした手法であるが、この研究では瞬目の認識率を 85% 程度に改善すると共に、赤外線距離センサを用いた手法が常時利用に適していることを、消費電力など複数の観点で示した。一方、これらの手法では、眼球の動きを認識できるかが明らかにされておらず、眼球と瞼の動きを独立して認識できるかも明らかにされていない。また、カメラを用いた手法と同様に、実世界における環境変化への頑健性の検証もない。また、眼球運動の認識について、田中らは [36] 反射型光センサを用いて閉眼時における眼球運動の認識ができることを報告しており、Ishiguro ら [37] は光センサで視線方向を認識する手法を提案している。

2.2 目のセンシング技術の活用

目の活動のセンシング技術は多くの目的に活用されてきた。例えば、視線移動や瞬目を用いた入力インターフェースは、コンピュータやディスプレイとのハンズフリーなインタラクションを可能にしており [1]、一般的な入力インターフェースが利用できない場面、例えば身体障害的な課題や状況的な課題 (例: 両手を入力のためだけに使えない) がある場面や人に有益である。目の活動から心身の状態の推定も行われている。例えば、疲労のレベルの推定に重要な要素として、瞬目の持続時間や頻度や閉鎖具合やサッケードが明らかにされている [2][3][4]。また、ユーザ体験の調査として、デジタル世界や実世界におけるユーザの視線や瞬目の解析がある。ヘルスケアや予防医療への活用もあり、目のセンシングに応じたアクチュエーションをする手法 [6] や、VDT (Visual Display Terminal) 作業におけるガイドラインがある。熟練者の目の動きの解明・体系化も行われており、車の運転や速読やスポーツなどの例がある。スポーツの例としては、バスケットボールのシュートを高精度で決める選手の視線移動のパターンの一例 (シュート直前のゴールの注視時間が他選手よりも長い点が特徴的) が報告され、それを他者が真似ることでスキルが向上する例が示されている [7]。また、目の動きから医学的に重要な知見も明らかにされており、例えば、眼球運動に特徴的なパターンが表れる個人特性として、ADHD [8]、自閉症 [26]、ウィリアムズ症候群 [27]、統合失調症、パーキンソン病が挙げられている。本研究の提案手法の実現によっ

て、こういった目のセンシング技術の活用がさらに促進される。

2.3 赤外線距離センサを利用したセンシング手法

赤外線距離センサを用いた手法が皮膚の動きの測定に利用できることは、先行研究で示されてきた。この手法は、皮膚の動きを介して、多様な対象の認識手法に活用されている。EarTouch は [28]、イヤホンに赤外線距離センサを着けることで、耳を引っ張る方向が認識できることを示しており、これによるジェスチャ入力手法が提案されている。また、赤外線距離センサのメガネへの適用は多くある。例えば、笑顔の認識手法 [29] や、日常生活における 8 つの表情の認識手法 [30]、顔を擦るジェスチャ入力手法 (FaceRubbing[31]) がある。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に赤外線距離センサを適用した手法もある。例えば、皮膚の動きをもとにしてタッチジェスチャを認識する手法 (CheekInput[32])、自分の表情をヴァーチャル空間におけるアバターの表情にマッピングする手法 [33]、自分の顔の動きをコンピューターグラフィックスモデルにマッピングしてアニメーション制作に利用する手法 [34] が提案されている。他にも、TongueInput[35] では、マウスピースにセンサを仕込むことで、舌のジェスチャを認識する手法を提案している。

3. 提案手法

本手法は、目の活動に伴って起こる目周辺の皮膚 (上瞼、下瞼、目頭、目尻) の動きをもとに、眼球と瞼の動きを認識する。この皮膚の動きの認識は、目の前方 (眼鏡の外周部) に設置された赤外線距離センサから皮膚までの距離の変化をもとに行う。赤外線距離センサは、赤外光を用いて対象との距離を測定する。このセンサは、安価、軽量、小型、低消費電力、扱うデータ量が小さい、といった点から、常時利用のウェアラブルデバイスに適する例が示されている [6]。また、このセンサで皮膚の動きが認識できることは、多くの先行研究で示されている [28][29][30][31][32][33][34][35]。提案手法が、皮膚の動きから目の動きを認識するまでの流れを図 1 に示す。まず、複数の赤外線距離センサが、目の運動に伴う皮膚の動きをセンサデバイスと皮膚の間の距離の変化から測定する。次に、得たセンサ値から特徴量を抽出する。特徴量は、認識すべき対象 (眼球や瞼) に応じて計算し、眼球の移動方向の場合には一定時間幅におけるセンサ値の変化量を特徴量とし、瞬目の認識の場合にはセンサ値の勾配や分散を特徴量とする。最後に、特徴量をもとに、眼球や瞼といった対象を認識する。

提案手法を実装したプロトタイプデバイスを図 2 に示す。実装には、赤外線距離センサ TRP-105 をスポーツ用のメガネフレーム上に 12 個配置した。Arduino マイコン (Arduino MEGA) でセンサデータはリアルタイムで PC に

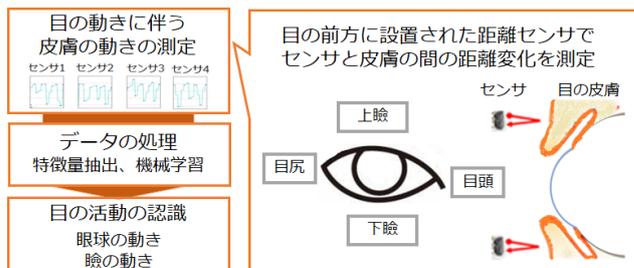


図 1 提案手法の流れ



図 2 プロトタイプシステムのセンサ位置とセンサデバイス

送信され、Processing と python を用いて PC 上でデータ処理するプログラムを作成した。センサ位置は目を四角形に囲んでおり、一般的なメガネフレームに収めるスタイルを想定した。

本プロトタイプデバイスに基づく各動作の認識アルゴリズムを下記に説明する。

眼球の向き (注視方向) の認識アルゴリズム

注視方向は、眼球の絶対的な位置が基準となって認識されると考えられるため、特徴量としては赤外線センサの値の瞬時値をそのまま機械学習に適用して用いる。したがって、特徴量は 12 個の赤外線センサから得られる瞬時値 12 次元となる。

眼球の移動方向の認識アルゴリズム

眼球の移動は、瞬時値の微少時間差分の値として表現されると考えられるため、特徴量としては赤外線センサの瞬時値データの時系列を移動平均で平滑化したのち、0.1 秒の時間幅における最初と最後のセンサ値の差を特徴量として出力する。センサは 12 個であるため、特徴量は 12 次元であり、これを機械学習に適用して用いる。

瞬目の認識アルゴリズム

赤外線センサ値から瞬目を認識するためのアルゴリズムを次のように設計・実装した。図 3 に、瞬目の認識の様子を示す。青色の線が本デバイスを用いたセンサ値の波形であり、その線上の 3 色の×点は、瞬目の開始点が赤の×、開閉動作の折り返し点が黒の×、瞬目の終点が青の×である。縦軸は正規化したセンサ値で、横軸は時間軸である。

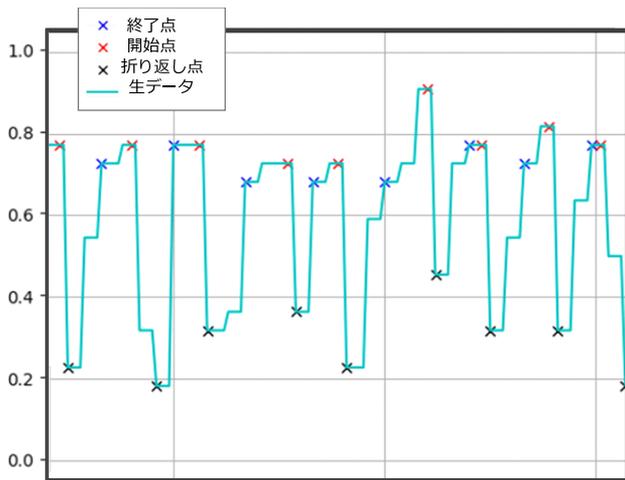


図 3 センサ値の波形において瞬目を認識している様子

瞼の閉じる動作の際に、波形の下り坂が現れ、瞼の開き動作の際に波形の上り坂が現れる。この図は、プロトタイプシステムにおける1つのセンサ値の例であり、軽微な瞼の振動はフィルタリングしてある。センサ値の前処理として、センサ値を移動平均フィルタで平滑化した後にダウンサンプリングし、瞬目の認識のステップを次のようにした。まず、サンプルの勾配を微分によって計算する。この勾配が負であれば瞼が閉じている運動であり、正であれば瞼が開いている運動である。よって、勾配の正負が反転する時点が瞼の開閉運動の折り返し時点である。これをもとに、瞬目の開始点、瞬目の折り返し点、瞬目の終了点、の3点を次のようにしてもとめる。

- (1) 瞬目の開始点の保持: 勾配が負になった時点でのセンサ値を、瞬目の開始点として保持する。
- (2) 瞬目の折り返し点の保持: 前のステップの後に、勾配が負から0になった時点でのセンサ値を、瞬目の折り返し点として保持する。
- (3) 瞬目の終了点の保持: 前のステップの後に、勾配が正から0になった時点でのセンサ値を、瞬目の終了点として保持する。
- (4) 瞬目判定: 保持した瞬目の3点が、瞬目かそれ以外(軽微な瞼の振動)かの判定を、瞬目の折り返し点が閾値を超えているかなどの条件から行う。この条件は事前に個人ごとに設定する。

なお、先行研究 [6] においては、瞬目の折り返し点のみを判定するアルゴリズムが提案されている。

4. 評価

眼球と瞼の活動の認識精度を検証するため、眼球の向き(注視方向)、眼球の移動方向、瞬目の回数の、3つの要素の認識精度を評価した。すべての実験において被験者は3名で、被験者はプロトタイプデバイスを装着したうえで正面配置されたディスプレイに正対し、顔を動かさないように

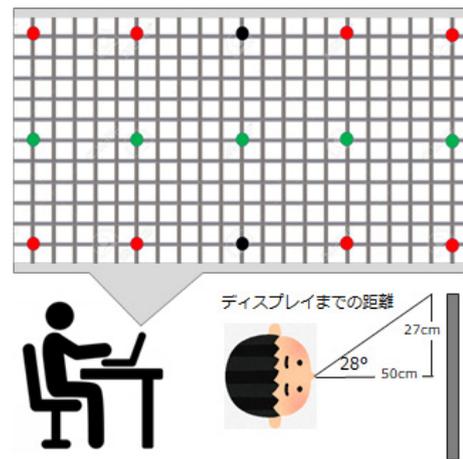


図 4 実験時の状況。ディスプレイ上の注視点や位置関係。

表 1 全データに対する正答率 [%](F 値)

Random Forest	J48	SVM	k-NN
99.9(0.99)	99.9(0.99)	97.7(0.97)	99.9(0.99)

顎を台の上に乗せて固定した状態で計測を行った。また、注視方向と眼球の移動方向の評価に関しては、実験中自由に瞬きをしてよいとした。

4.1 眼球の向き(注視方向)の認識精度

この評価では、正面配置されたディスプレイ上に遍在する点の注視の認識精度を調査した。図4のように、27インチのディスプレイ上において縦方向3列と横方向5列に分けた格子状の結節点にある。眼球の向きの角度の間隔は横方向に約 11° 、縦方向に約 10° である。注視は15点すべてで行われた。ディスプレイ上の点の色は実験者から被験者への指示の際の目印として利用するためのもので、横方向の中央を黒、縦方向の中央の色を緑、それ以外を赤としている。被験者は各赤点の注視を30秒ずつ行った。

データセットは、注視点の数 \times 30秒 \times 被験者の数 \times 12(次元)、である。サンプリングレートは100Hzである。分類器は、Random Forest, J48, SVM, k-NNを用いた場合をそれぞれ評価した。この検証は個人内のデータを用いて個人ごとに行った。

認識結果を表1に示す。表1は全データに対する正答率を分類器ごとに示している。カッコ内はF値を示している。これは、全被験者の平均であり、被験者個人ごとに算出した結果を平均している。結果から、正答率はSVMを用いた場合以外ではほぼ100%であり、顔を動かさない今回のタスクにおいては注視点が識別できたことを示している。

4.2 眼球の移動方向の認識の評価

この評価では、提案手法による眼球の移動方向(視線の移動方向)の認識精度を評価した。

表 2 全データに対する正答率 [%](F 値)

Random Forest	J48	SVM	k-NN
96.3(0.95)	89.9(0.86)	48.8(0.74)	94.5(0.72)

表 3 各移動方向における F 値

移動方向	Random Forest	J48	SVM	k-NN
下	0.97	0.99	0.95	0.98
右	0.91	0.81	0.67	0.80
左	0.94	0.85	0.44	0.11
上	0.97	0.80	0.92	0.97

タスクは、4 方向の視線移動であり、4 方向は、地面から垂直の上方向と下方向、地面に水平の右方向と左方向である。視線移動は、ディスプレイ上に遍在する点から点への視線移動であり、点は正面配置された 27 インチのディスプレイにおいて 4 点あり、図 4 における緑色の点の両端における横方向の移動と黒色の点の両端における縦方向の移動である。1 方向について 20 秒のデータが集まるまで視線移動を繰り返し行わせた。

データセットは、注視点の数 × 20 秒 × 被験者の数 × 12(次元)、である。サンプリングレートは 100Hz である。4 種の移動方向のラベルの付いたサンプルデータを、10 分割交差検証で検証した。分類器は 4 種類で、Random Forest, J48, SVM, k-NN である。この検証は個人内のデータを用いて個人ごとに行った。

認識結果を表 2, 3 に示す。表 2 は全データに対する正答率を分類器ごとに示し、カッコ内は F 値を示している。また、表 3 は移動方向それぞれにおける F 値を示している。これらは、全被験者の平均であり、被験者個人ごとに算出した結果を平均している。表 2 の結果から、全データに対する正答率は最大 96 % であった。また、表 3 の結果は、今回設定したタスクにおけるいずれの眼球移動の方向も提案手法が認識できたことを示している。

4.3 瞼の動き(瞬目)の認識の評価

提案手法による瞼の動きの認識精度の評価として、瞬目の回数の認識精度を評価した。実験では、あらゆる眼球の向きにおける瞬目が認識できるかを検証するために、ディスプレイ上に遍在する点を注視しながらの瞬目とした。点は正面配置された 27 インチのディスプレイにおいて上下左右に等間隔に 15 点あり、前述の図 4 のものである。ひとつの点について瞬目回数が 20 回になった時点で次の点に移るようにし、これを全点について行った。瞬目は BPM60 程度で行わせた。

データセットは、注視点の数 × 瞬目の回数 × 被験者の数 × 12(次元) である。サンプリングレートは 100Hz である。この際に、1 割のデータから瞬目認識に必要な閾値を設定して最も精度の高かったセンサ 1 つのみを選択して、その選択したセンサ 1 つにおいて 9 割のデータで評価した。こ

表 4 注視点ごとの F 値

点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6	点 7	点 8
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95
点 9	点 10	点 11	点 12	点 13	点 14	点 15	
0.97	0.93	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	

の検証は個人内のデータを用いて個人ごとに行った。

評価結果では全瞬目の回数の正答率は 99.8 % であった。注視点 15 点それぞれにおける F 値は表 4 に示す。これらは、全被験者の平均であり、被験者個人ごとに算出した結果を平均している。これらの結果は、提案手法が今回のタスクにおいては、瞬目の回数を認識できたことを示している。

5. 議論

提案手法は、本稿の実験の本稿の実験の想定環境であれば、眼球の向きや移動方向の認識に利用できると考えられる。今回の実験タスクにおいて、眼球の向きの認識を被験者の瞼の動きのノイズに関わらずできたことから、本手法は眼球と瞼の動きの区別ができると考えられ、また、本手法は眼球の移動方向の認識もできると考えられる。一方で、本実験では荒い解像度での評価のみを行ったため、提案システムが実際にどの程度の精度をもつのかを調査することはできていない。例えば、今回の実験で認識した眼球の向きの角度の間隔は横方向に約 11°, 縦方向に約 10° であったが、これよりも細かい角度が認識できるかを検証することが必要である。また、屋内外の照明条件や身体振動条件といった実世界で起こる環境変動に対する頑健性の検証、多様な被験者に対する頑健性をの検証を行う必要がある。さらに、最小限のセンサ数での実装方法が明らかにするために、認識に必要なセンサの箇所や個数も、検証する必要がある。また、その他の提案手法の精度に関わり得る要素として、被験者の身体的特徴(例: 目の大きさ)や年齢や性別などの個人差、眼球付近の皮膚の動きが発生する日常活動(例: 会話, 表情変化)があるので、これらを考慮した検証も必要である。

今回の実験における本手法の瞬目認識率は 90 % 以上であり、これは、赤外線距離センサを用いた先行手法の約 85 % より高かった。この理由としては、個人ごとに適切なセンサ位置や閾値を選択できる機構を提案手法が採用していたことや、意識的な瞬目を対象にしたことなどが挙げられる。今後の詳細な実験において、カメラや EOG における認識精度である約 95 % に近い精度が赤外線距離センサを用いた手法においても得られるかを検証する必要がある。また、前述した眼球の認識に関するものと同様に、複数の観点における頑健性などの検証をする必要がある。詳細な瞼の状態(例: 開眼の程度が何割か)も認識できるかを追求する必要もある。アイウェア型の EOG を用いた手法

と赤外線距離センサを用いた手法は、常時利用性に関わる複数の観点についてはほとんど同じであると想定している。両者の認識精度の差や、認識できる対象の得意不得意を今後明らかにする必要がある。赤外線距離センサを用いた手法が得意な点として、認識できる視野角については他手法と比べて広いと考えられる。例えば、カメラを用いた手法では、ちょっとした上目づかいや下目づかいをする時と眼球の向きを捉えられなくなる場合があるが、赤外線距離センサを用いた手法であれば、眼球を最大限両端へ移動させた場合にも眼球の向きを認識できると予想している。これらの特徴に関しても今後実験を行っていく予定である。

6. おわりに

本研究では、赤外線距離センサを用いて目(眼球と瞼)の動きをセンシングするウェアを開発し、提案手法が目の活動のセンシングを常時行えるかを検証した。本手法は、目の前方に設置された赤外線距離センサから皮膚までの距離の変化をもとに、目(眼球と瞼)の活動に伴って起こる目周辺の皮膚の動きを測定することで、眼球と瞼の動きを認識した。本稿では、赤外線距離センサをメガネの内側に仕込んだプロトタイプデバイスを実装した。そして、眼球の向き(注視方向)、眼球の移動方向、瞬目の回数の3つの認識が行えるかを検証した。評価結果から、瞬きのような瞼の動きがある状況において眼球の向きの角度を約 10° の間隔で認識できることや、眼球の向きの異なる瞬きの回数を認識できることを確認した。今後は、屋内外の照明条件や身体振動条件といった実世界で起こる環境変動に対する頑健性の検証、多様な被験者に対する頑健性の検証、認識に必要なセンサの箇所や個数の検証を行う。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人ヤマハ発動機スポーツ振興財団、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(JST CREST, 課題番号 JPMJCR18A3)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Thomas E Hutchinson, K Preston White, Worthy N Martin, Kelly C Reichert, and Lisa A Frey. Human-computer interaction using eye-gaze input. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 19 (6), pp. 1527–1534 (1989).
- [2] Michael Ingre, Torbjörn Åkerstedt, Björn Peters, Anna Anund, and Göran Kecklund. Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: examining individual differences. *Journal of sleep research* 15(1), pp. 47–53 (2006).
- [3] Robert Schleicher, Niels Galley, Susanne Briest, and Lars Galley. Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? *Ergonomics* 51(7) pp. 982–1010 (2008).
- [4] Stern, John A., Donna Boyer, and David Schroeder. Blink rate: a possible measure of fatigue. *Human factors*, 36(2), pp. 285–297 (1994).

- [5] Yan, Z., Hu, L., Chen, H., and Lu, F. Computer Vision Syndrome. A widely spreading but largely unknown epidemic among computer users. *Computers in Human Behavior*, 24(5), pp. 2026–2042 (2008).
- [6] Artem Dementyev and Christian Holz. Dualblink: A wearable device to continuously detect, track, and actuate blinking for alleviating dry eyes and computer vision syndrome. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 1:2(1), (2017).
- [7] Vine, Samuel J., and Mark R. Wilson. The influence of quiet eye training and pressure on attention and visuomotor control. *Acta psychologica* 136(3) pp. 340–346 (2011).
- [8] Moshe Fried, Eteri Tsitsiashvili, Yoram S Bonne, Anna Sterkin, Tamara Wygnanski-Jaffe, Tamir Epstein, and Uri Polat. ADHD subjects fail to suppress eye blinks and microsaccades while anticipating visual stimuli but recover with medication. *Vision research*, 101, pp. 62–72 (2014).
- [9] Amir-Homayoun Javadi, Zahra Hakimi, Morteza Barati, Vincent Walsh, and Lili Tcheang. SET: a pupil detection method using sinusoidal approximation. *Frontiers in neuroengineering*, 8(4), (2015).
- [10] Marc Tonsen, Xucong Zhang, Yusuke Sugano, and Andreas Bulling. Labelled pupils in the wild: a dataset for studying pupil detection in unconstrained environments. *Proceedings of the Ninth Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. pp. 139–142 (2016).
- [11] Rostamina, S., Mayberry, A., Ganesan, D., Marlin, B., and Gummesson, J. iLid: Low-power Sensing of Fatigue and Drowsiness Measures on a Computational Eyeglass. *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*, 1:2(23) (2017).
- [12] Rizwan Ahmad. Understanding the Language of the Eye: Detecting and Identifying Eye Events in Real Time via Electrooculography. PhD Thesis, UC San Diego, (2016).
- [13] Tobii Glasses: Mobile Eye Tracker for real world research. <http://www.tobii.com>. (accessed 2019).
- [14] Moritz Kassner, William Patera, and Andreas Bulling. Pupil: an open source platform for pervasive eye tracking and mobile gazebased interaction. *Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing: Adjunct publication*. ACM, pp. 1151–1160 (2014).
- [15] SensoMotoric Instruments (SMI) <https://www.smivision.com/> (accessed 2019).
- [16] HSIEH, Chin-Shun; TAI, Cheng-Chi. An improved and portable eye-blink duration detection system to warn of driver fatigue. *Instrumentation Science and Technology*, 41(5), pp. 429–444 (2013).
- [17] BULLING, Andreas; ROGGEN, Daniel; TRÖSTER, Gerhard. Wearable EOG goggles: Seamless sensing and context-awareness in everyday environments. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 1(2), pp. 157–171 (2009).
- [18] Picot, Antoine, Alice Caplier, and Sylvie Charbonnier. Comparison between EOG and high frame rate camera for drowsiness detection. *Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, pp. 1–6 (2009).
- [19] JINS MEME. <https://jins-meme.com/en/>. (accessed 2019).
- [20] Andreas Bulling, Daniel Roggen, and Gerhard Tröster. It’s in your eyes: towards context-awareness and mo-

- bile HCI using wearable EOG goggles. Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing, pp. 84–93 (2008).
- [21] Andreas Bulling, Jamie A Ward, Hans Gellersen, and Gerhard Troster. Eye movement analysis for activity recognition using electrooculography. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 33(4) pp. 741–753 (2010).
- [22] Manabe, Hiroyuki, Masaaki Fukumoto, and Tohru Yagi. Conductive rubber electrodes for earphone-based eye gesture input interface. Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers, pp. 33–40 (2013).
- [23] Manabe, Hiroyuki, and Masaaki Fukumoto. Full-time wearable headphone-type gaze detector. CHI’06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 1073–1078 (2006).
- [24] Jordan Crook. The Google Glass Wink Feature Is Real. *TechCrunch*, 9, (2013).
- [25] Shoya Ishimaru, Kai Kunze, Koichi Kise, Jens Weppner, Andreas Dengel, Paul Lukowicz, and Andreas Bulling. In the blink of an eye: combining head motion and eye blink frequency for activity recognition with Google Glass. Proceedings of the 5th augmented human international conference, p. 15 (2014).
- [26] Lauren M Schmitt, Edwin H Cook, John A Sweeney, and Matthew W Mosconi. Saccadic eye movement abnormalities in autism spectrum disorder indicate dysfunctions in cerebellum and brainstem. *Molecular autism*, 5:1(47) (2014).
- [27] Seiple, William, Richard B. Rosen, and Patricia MT Garcia. Abnormal fixation in individuals with age-related macular degeneration when viewing an image of a face. *Optometry and Vision Science*, 90(1), pp. 45–56 (2013).
- [28] Takashi Kikuchi, Yuta Sugiura, Katsutoshi Masai, Maki Sugimoto, and Bruce H Thomas. EarTouch: turning the ear into an input surface. Proceedings of the 19th International Conference on HumanComputer Interaction with Mobile Devices and Services. p. 27 (2017).
- [29] Fukumoto, K., Terada, T., and Tsukamoto, M., A Smilie/Laughter Recognition Mechanism for Smile-based Life Logging, Proc. of Augmented Human Conference 2013 (AH 2013), pp. 213–220 (2013).
- [30] Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, Masa Ogata, Kai Kunze, Masahiko Inami, and Maki Sugimoto. Facial expression recognition in daily life by embedded photo reflective sensors on smart eyewear. Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces, pp. 317–326 (2016).
- [31] Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, and Maki Sugimoto. Facerubbing: Input technique by rubbing face using optical sensors on smart eyewear for facial expression recognition. Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference. p. 23 (2018).
- [32] Koki Yamashita, Takashi Kikuchi, Katsutoshi Masai, Maki Sugimoto, Bruce H Thomas, and Yuta Sugiura. CheekInput: turning your cheek into an input surface by embedded optical sensors on a headmounted display. Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. p. 19 (2017).
- [33] Katsuhiko Suzuki, Fumihiko Nakamura, Jiu Otsuka, Katsutoshi Masai, Yuta Itoh, Yuta Sugiura, and Maki Sugimoto. Recognition and mapping of facial expressions to avatar by embedded photo reflective sensors in head mounted display. In 2017 IEEE Virtual Reality (VR). pp. 177–1855 (2017).
- [34] Nao Asano, Katsutoshi Masai, Yuta Sugiura, and Maki Sugimoto. Facial performance capture by embedded photo reflective sensors on a smart eyewear. Proceedings of the 27th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 22nd Eurographics Symposium on Virtual Environments. Eurographics Association, pp. 21–28.
- [35] Takuma Hashimoto, Suzanne Low, Koji Fujita, Risa Usumi, Hiroshi Yanagihara, Chihiro Takahashi, Maki Sugimoto, and Yuta Sugiura. TongueInput: Input Method by Tongue Gestures Using Optical Sensors Embedded in Mouthpiece. In 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). pp. 1219–1224 (2018).
- [36] 田中 雄也, 牧野 泰才, 篠田 裕之, 近接距離センサを用いた閉眼時の視線推定, 計測自動制御学会計測部門センシングフォーラム資料 34, pp. 326–330 (2017).
- [37] Ishiguro, Y., Mujibiyah, A., Miyaki, T., and Rekimoto, J. Aided eyes: eye activity sensing for daily life. In Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference, pp. 25–31 (2010).