

アイケア用ウェアラブルシステムの開発

研究代表者：双見京介・立命館大学情報理工学部情報理工学科・助教

共同研究者：塚本昌彦・神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻・教授

1 はじめに

近年、コンピュータ技術のあらゆる場面への普及と共に、ディスプレイやキーボードを用いた VDT (Visual Display Terminal) 作業が増加し、人々の目の健康面での疲労や疾患は増加している。この種の健康被害はコンピュータビジョン症候群と呼ばれる。コンピュータビジョン症候群は、目の疲れ、頭痛、ドライアイ、かすみ眼、首の痛み、全身の疲労感など、さまざまな症状が発生し[1]、これらの症状は、日常的な作業の実行に問題を引き起こすため、人の生活の質を低下させる[2]。この症状の推定患者数は多く、全コンピュータユーザの最大 70% が疾患者とされている[1]が、自覚や診断が困難なことから見過ごされがちである[2]。代表的な疾患であるドライアイの患者数は日本眼科学会によると日本国内において 2200 万人、世界に 10 億人とされている。目の疲労による心身への被害は、健康面だけではなく顔全体の老化などの美容面にも及ぶ。

こういった目の健康被害の防止に向けて、目の健康状態(以降ではアイヘルスと呼ぶ)に関わる要因が明らかにされてきた。例えば、目周辺の筋肉運動に関するパラメータとしては、瞬目運動(例: 瞬きの回数や持続時間)と眼球運動(例: 眼球の向きや移動)があり、目の周辺環境に関わるパラメータとしては、温度や湿度、埃や照度などがある。そして、これらを適切に保つための一般的なルールなどが公開されている[1, 4, 5]。ルールの例としては、20 分間のスクリーン使用ごとに 20 秒間の休憩を取ること、一連続作業時間が 1 時間を超えないようにして次の連続作業までの間に 10 分～15 分の作業休止時間を設けて一連続作業時間内において 1 回～2 回程度の小休止を設けること、また、注視距離は 40 cm 以上であることや、眼球姿勢は見上げるのではなく見下ろすべきであること、ディスプレイを用いる場合のディスプレイ画面上における照度は 500 ルクス以下にして書類上及びキーボード上における照度は 300 ルクス以上とすることなどがある。

しかしながら、アイヘルス支援の施策のほとんどは、目の健康状態に関わる要因の調査と、自己管理の推奨にとどまっており、アイヘルスの個人ごとの自己管理を支援する技術はほとんどない。アイヘルス要因のセンシングに資する手法は存在するが、既存手法は常時あらゆる場面でのセンシングを実現する上で潜在的な課題を残している。アイヘルスの自覚が困難なことを踏まえると、自己管理を支援するためには、まずは、アイヘルスに関する要因を常時あらゆる場面でセンシングする技術が必要である。この技術の実現によって、その次のステップである個人ごとのアイヘルス状況の把握・分析や、アイヘルス向上のための行動変容を促す情報フィードバック、眼科医療へのアイヘルスに関わるログの活用などが行える。

本研究では、アイヘルス向上を支援するウェアラブルシステムのプラットフォームの開発を目指し、まずはアイヘルスに関わる要因を常時センシングするセンサデバイスとソフトウェアの開発を行った。提案手法では、従来手法とは異なるアプローチとして筋肉運動に伴う皮膚の隆起変動に着目したセンシング技術を採用した。そして、プロトタイプシステムを実装し、提案手法の有効性や実現可能性を検証した。

2 手法

本技術は、アイヘルスに関わる要因の常時センシングを、筋肉運動に伴う皮膚の隆起変動に着目して行うものである。

2.1 既存手法とその課題

アイヘルスに関わる要因のうち、瞬目運動や眼球運動を認識するための先行手法は存在する。これらの課題は次のようになる。いずれも、常時あらゆる場面でのセンシングを実現するには課題があり、異なる仕組みが必要である。

1. 固定設置のリモートカメラを用いた方法

ユーザの前方に固定設置されたカメラを用いる手法がある。これは、ユーザが長期間カメラの前に座っている場合、例えば机上で作業しているときや車両を操作しているときなど、に利用することを想定したものである。センサとしてはカメラと画像処理が使用される[6, 7]。

この手法は、常時利用できない点に課題がある。目は日常全体で使用されており、VDT 作業は卓上のコンピュータの前だけではなく、スマートフォンなどを用いてあらゆる場面で行われる。そのため、アイヘルス要因をセンシングするためには常時あらゆる場面で利用できるセンシング手法が必要となる。また、カメラのセンシング範囲から顔の向きが外れるとセンシングできなくなる点も課題である。

2. ウェアラブルカメラを用いた方法

メガネに取り付けたカメラを用いる手法がある。例えば、Tobii [8] や Pupil Labs は、眼鏡フレームに組み込まれた赤外線アイトラッカーを開発している[9]。これらは、研究者が実験や調査などで利用することを想定して提供されている。

この種の手法の課題は複数ある。例えば、これらの手法はカメラの特性上、さまざまな照明条件のもとで効果的な動作をするわけではなく、特に屋外で失敗することが文献でよく知られている[10, 11]。また、装置が大きくて不快になりがちで、この点は生活全体でセンサデバイスを使うことにあたって障害となる。また、カメラを用いることによる消費電力の大きさも課題であり、電池寿命が2時間を超えることは難しい[12]。カメラで瞬目などをとらえるためには、1秒間のデータ取得フレームレートや画像解像度を上げる必要があり、目の認識アルゴリズムも煩雑になるため、これらにはかなりの消費電力を有する。

3. 電極を介して眼球の動きを測定する眼球運動を利用する方法

眼電図法 (EOG: Electro-oculogram) を用いる方法がある。眼電図法は人間の目が磁気双極子であるという事実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。この既製品としては JINS MEME がある[13]。

こういった EOG 信号を用いる手法の課題も複数ある。例えば、眼球の垂直方向の動きを追跡することが困難であり、また、EOG 信号では目の動きとまぶたの動きを明確に区別できないため、瞬目運動や眼球運動の区別・認識が困難であると明らかにされている[3, 14]。

4. 顔の皮膚の隆起変動を利用する方法

本手法と同様に顔の皮膚の隆起変動を利用した手法がある。例えば、google Glass や Dual Blink[24] ではメガネ型デバイスの内側につけた赤外距離センサから顔の動きが認識できることが示されている。

これらの既存研究は十分に行われていない。例えば、眼球運動を認識するためのセンサデバイスやアルゴリズム設計が行われていないため、この手法で眼球運動に関するパラメータを認識できるかが明らかにされていない。また、瞬目についても回数を簡易に判定するアルゴリズムしか存在せず、その精度も80%程度で高くはない。一連の瞬目(始点から終点まで)を認識するアルゴリズムも存在していないため、例えば1回の瞬目が完了するまでの時間(瞬目持続時間)といった、重要なパラメータの認識ができない。

5. 共通の課題

これらの手法の課題に加えて次の観点を満たすことも必須の課題である。

低価格：技術の一般普及のための障壁のひとつは価格である。誰もが利用できるものになるためには、安価であることが必要である。これを満たさない例としては、ウェアラブルのカメラや眼電位などのメガネ型デバイスの既製品が挙げられ、これらは例えば3万円や20万円やそれ以上といった価格帯である。このような価格のものが一般普及することは考え難い。

利用容易性：ユーザの生活環境への手法適用が容易なことも満たす必要がある。例えば、従来手法は、手法とメガネが統合された独自のメガネを提供しているが、このスタイルの提供では、開発されたデバイスの見た目が気に入らない場合や、自分が普段利用しているメガネを替えたくない場合には、手法の利用は困難になる。

2.2 設計・実装

アイヘルスに関わる要因を認識する既存手法には、常時あらゆる場面でアイヘルスを認識する上で、デバイスの観点や認識精度的な観点において潜在的な課題がある。既存手法の課題を解決したうえで、アイヘルスに関わる要因につながる目の筋肉運動をセンシングするためには、既存手法と異なるアプローチを考

案・採用する必要がある。

これに対して本技術では、目周辺の筋肉運動に伴う皮膚の隆起変動に着目し、この隆起変動を赤外距離センサから認識するアプローチを採用する。赤外距離センサは安価、軽量、小型、低消費電力であり、既存手法のデバイスの課題は排除できる可能性が高い。そのため、このアプローチによって、アイヘルスに関わる目の筋肉運動が高精度で認識できれば、本研究の目的実現につながる。

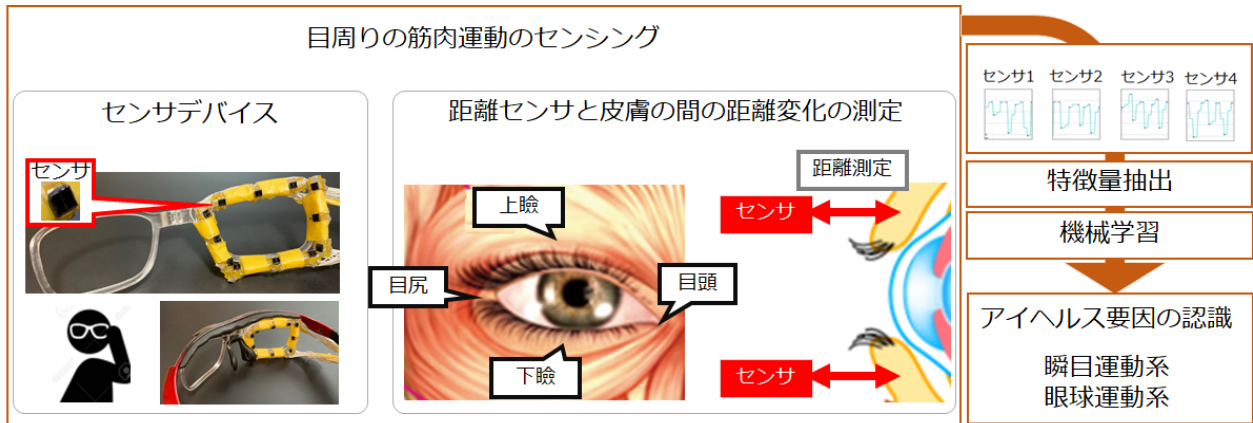


図1 提案手法の流れとプロトタイプシステム

提案手法の流れを図1に示す。手法はセンシングモジュール、特徴量抽出モジュール、アイヘルス要因の認識モジュールからなる。

まず、センシングモジュールについては次のようになる。センサデバイスは赤外線を利用した距離センサを搭載し、目周りの筋肉運動に伴う皮膚の隆起変動のセンシングを、センサデバイスと皮膚の間の距離変化をもとに行う。赤外線の距離センサを複数利用することで、上瞼や下瞼、目の左右(目頭や目じり)など複数の箇所の皮膚の動きをセンシングする。このセンサデバイスは、既存のメガネの内側に脱着できる形態を採用する。これによって、普段使っているメガネに提案手法を適用でき、また、メガネ非装着者であれば自分の好きな似合うメガネを利用できる。次に、特徴量抽出モジュールは次のようになる。ここではセンサデータからアイヘルスに関わる要因を認識するために必要な特徴量を抽出する。瞬目運動や眼球運動など、認識すべき要因に応じて、データの分割や必要な計算などの処理を行う。最後に、アイヘルス要因の認識モジュールでは、機械学習などを用いて、抽出した特徴量をもとにアイヘルスに関わる要因を認識する。

センサデバイスのプロトタイプを図1に示す。デバイスは赤外線距離センサ(TRP-105)、ESP32などから成り、Bluetooth通信でセンサデータを出力する。ソフトウェアの実装にはPythonを用いた。

3 実験

提案デバイスを用いて、アイヘルスに関わる要因の認識精度を評価した。各要因について認識アルゴリズムを設計して検証した。それぞれについては以下ようになる。

3.1 実験1 眼球運動に関するパラメータの認識精度の評価

提案手法によって眼球運動に関するパラメータが認識できるかを検証した。本実験の検証仮説は、目周りの皮膚の隆起変動に表れる眼球運動を、提案手法を用いて認識できるかである。ここでは眼球姿勢と視線移動に分けて検証した。

3.1.1 眼球姿勢の認識の評価

本実験では、提案手法による眼球姿勢認識の実現可能性を評価した。見上げる、見下げる、右横方向を見る、左横方向を見る、といった眼球姿勢はアイヘルスに関わる要因である。例えば、VDT 作業においては見上げるのではなくて見下げる眼球姿勢が適切とされており、また、対象を見る際は正面から見る方がよく、横方向に見続けることは両目の間に視差を生むため控える方がよい。

アルゴリズムについては、次のように、一般的な機械学習を用いた認識手法の流れである。

特徴量抽出：センサデータを一定の時間幅で分割し、その時間幅ごとに特徴量を算出する。ここでは時間幅を 0.1 秒間隔とした。また、特徴量は時間幅でのセンサ値の平均値とした。

認識：眼球姿勢の認識を、機械学習と正解データをもとに行う。ここでの認識は、特徴量の時間幅である 0.1 秒ごとに行われる。正解データは、データベースに事前記録しているものである。

実験のデータセットは次のように収集した。実験では、3 名の被験者が本デバイスを装着して特定のタスクを行った。タスクは、ディスプレイ上に遍在する赤点を注視するものである。赤点は上下左右に等間隔に 15 点あり、具体的には図 2 のように、正面配置された 27 インチのディスプレイ上で縦方向 3 段と横方向 5 列に分けた格子状の結節点に赤点がある。これらの各点を 30 秒注視することを全点について行った。実験中に、瞬きは自由に行わせた。

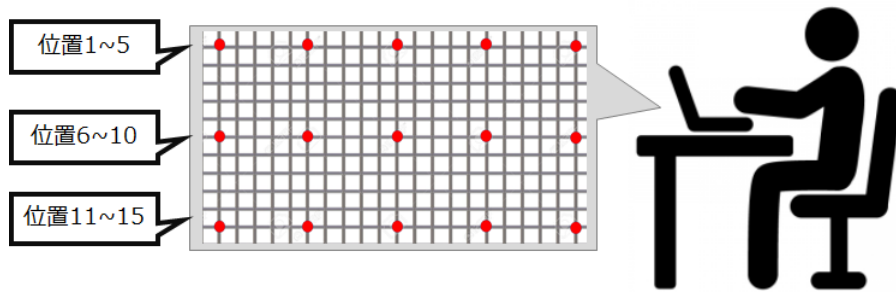


図 2 実験における注視対象

RF	J48	SVM	最近傍法
99.9	99.9	97.7	99.9

表 1 分類器ごとの全サンプルデータに対する正答率[%]

	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6	位置7	位置8	位置9	位置10	位置11	位置12	位置13	位置14	位置15
RF	1	1	1	1	1	0.99	1	0.99	1	1	1	1	1	1	1
J48	0.99	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99	1	0.99	1	1	1	1	1	0.99
SVM	0.95	0.94	0.97	0.98	0.98	0.95	0.92	0.95	0.99	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99	0.98
最近傍法	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

表 2 分類器ごとの眼球姿勢 15 点それぞれにおける F 値

認識結果を表 1, 2 に示す。複数の分類器を用いて 10 分割交差検証を行った。分類器は 4 種類で、ランダムフォレスト、J48、SVM、最近傍法である。表 1 は全サンプルデータに対する正答率を分類器ごとに示している。また、表 2 は眼球姿勢 15 点それぞれにおける F 値を示している。F 値は分類器の精度評価の指標である。

結果は、本実験の検証仮説を支持した。表 1 の結果から、全サンプルデータに対する正答率は最大 99% であり、また、いずれの分類器も 99% の精度であるとわかる。これらは、提案手法によって眼球姿勢が明確に認識できることを示している。また表 2 の結果から、すべての眼球姿勢において F 値が高いとわかり、この結果は提案手法がいずれの眼球姿勢も高精度に認識できることを示している。

以上から、眼球姿勢の認識への提案手法の有効性を確認した。

3.1.2 眼球移動の認識の評価

本実験では、提案手法による眼球移動認識の実現可能性を評価した。

眼球が上下左右のどの方向に移動しているかという眼球移動はアイヘルスに関わる。例えば、一点を凝視し続けるのは目に負担がかかる。既製品である JINSMEME もこの種の眼球移動の認識機能を有している。

アルゴリズムについては、次のように、一般的な機械学習を用いた認識手法の流れである。

特徴量抽出：センサデータを一定の時間幅で分割し、その時間幅ごとに特徴量を算出する。ここでは時間幅を 0.1 秒間隔とした。また、特徴量は眼球の移動量を意味する数値として、切り出した時間幅の最初と最後のセンサ値の差を採用した。

認識：眼球姿勢の認識を、機械学習と正解データをもとに行う。ここでの認識は、特徴量の時間幅である 0.1 秒ごとに行われる。正解データは、データベースに事前記録しているものである。

データセットは次のように収集した。実験では、3 名の被験者が本デバイスを装着して特定のタスクを行った。タスクは、ディスプレイ上に遍在する特定の赤点から赤点への視線移動である。赤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 4 点あり、具体的には前述の図 2 の例の横方向と縦方向の中央列の最端の 4 点である。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。実験中に、瞬きは自由に行わせた。

RF	J48	SVM	最近傍法
96.3	89.9	48.8	94.5

表 3 分類器ごとの全サンプルデータに対する正答率[%]

	下方向	右方向	左方向	上方向
RF	0.97	0.91	0.94	0.97
J48	0.94	0.81	0.85	0.94
SV	0.64	0.67	0.44	0.11
最近傍法	0.97	0.8	0.92	0.97

表 4 分類器ごとの移動方向それぞれにおける F 値

認識結果を表 3, 4 に示す。複数の分類器を用いて 10 分割交差検証を行った。分類器は 4 種類で、ランダムフォレスト, J48, SVM, 最近傍法である。表 3 は全サンプルデータに対する正答率を分類器ごとに示している。また、表 4 は移動方向それぞれにおける F 値を示している。F 値は分類器の精度評価の指標である。

結果は、本実験の検証仮説を支持した。表 1 の結果から、全サンプルデータに対する正答率は最大 96% であった。ランダムフォレストの精度が最も高く、SVM では精度が低かいことから、ランダムフォレストに類する分類器がこの認識には適しているとわかる。また表 2 の結果から、すべての移動方向において F 値が高いとわかり、この結果は、いずれの眼球移動の方向も提案手法が高精度に認識できることを示している。

以上から、眼球移動の認識への提案手法の有効性を確認した。

3.2 実験 2 瞬目運動に関するパラメータの認識精度の評価

本実験では、提案手法による瞬目認識の実現可能性を評価した。

瞬目はアイヘルスに関する要因である。瞬目率の低下は、コンピュータビジョン症候群の主な原因であり、ドライアイ症候群と密接に関連している[15, 16, 17, 18]。瞬目率が低下すると、涙液膜は完全には補充されず、時間が経つにつれてドライアイになる可能性が高まる[19, 20]。VDT 作業などの画面閲覧において視覚的な集中力を必要とする作業を行うと、大幅に低下し[21, 22]、例えば、平均瞬目率は会話中であれば 15 回/分だが、ディスプレイ使用中であれば 5 回/分に低下する[22]。

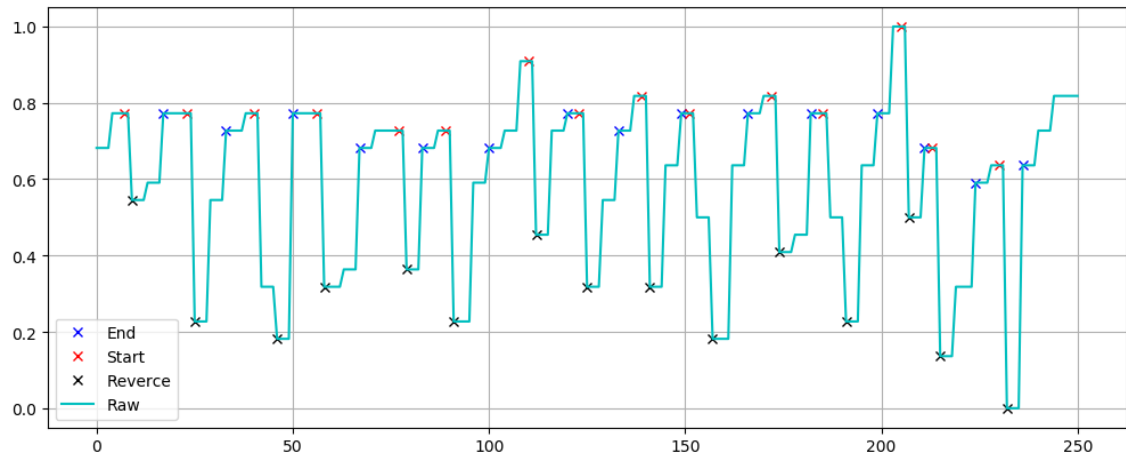


図3 センサ値から瞬目運動を認識している様子

アルゴリズム：図3に認識の様子を示す．エメラルドグリーンの線がセンサ値の波形であり，その上の3色の×点は，瞬目の始点が赤×，開閉動作の折り返し点が黒×，瞬目の終点が青×である．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，瞬目の一連の流れが，提案手法によって認識できているとわかる．

本手法の瞬目認識アルゴリズムの大枠は次のようになる．瞼の閉じる動作の際にはセンサ値の勾配は下りになり，瞼の開き動作の際にはセンサ値の勾配は上りになる．これらに基づいて瞬目を認識するために，センサ値の勾配や分散，平均を用いた．全体の流れは次のようになる．

- 高解像度でのセンサ値のサンプリング：赤外線反射は10 kHzでサンプリングされる．
- センサ値の平滑化：移動平均でセンサ値を平滑化する．
- ダウンサンプリング：データは認識処理を軽量にするために，100 Hzにダウンサンプリングされる．
- 瞬目運動の認識：センサ値の勾配，分散，平均値などの特徴量から瞬目運動を認識する．勾配は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．勾配や分散や平均などを利用して瞬目の開始点，瞼の開閉動作の折り返し点，瞬目の終了点を検出する．これらで得た瞬目1回分の3点から，瞬目の詳細な状況を判定する．例えば，瞬目の深さについては次のようになる．瞼の開閉運動の切り替え時点でのセンサ値は，上瞼と下瞼が閉じている程度を示す．これを踏まえて，この時点でのセンサ値が一定の閾値を超えているかで，瞬目の程度が十分か不十分かの判定ができる．また，この閾値調整によって，例えば，瞼の一時の上下運動が，アイヘルズに意味のある瞬目として誤認識されないようにできる．この閾値の設定は個人ごとに事前に設定する．

3.2.1 瞬目回数の認識の評価

本手法による瞬目の認識精度を評価した．ここでは単純な瞬目の回数の認識精度を評価した．

データセットは次のように収集した．実験では，3名の被験者が本デバイスを装着して特定のタスクを行った．あらゆる眼球姿勢における瞬目が認識できるかを検証するために，タスクは，ディスプレイ上に遍在する特定の赤点を注視しながらの瞬目とした．赤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2のものである．ひとつの赤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．実験中に，瞬きは自由に行わせた．ここでは，瞬目の回数の正解データを得るために，被験者の目元を高解像度ビデオカメラを用いて60 fpsで記録した映像をもとに，瞬目の回数を手動で判定して正解データを得た．

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

表 5 眼球姿勢 15 点それぞれにおける F 値

全サンプルデータに対する正答率は 99.8%（誤認識率は 0.02%）であり、表 5 は眼球姿勢 15 点それぞれにおける F 値を示している。これらの結果は、提案手法が瞬目の回数を正確に認識できることを示し、また、その精度がいずれの眼球姿勢においても高いことを示している。既存の瞬目回数の認識手法と比べると提案手法の瞬目の認識精度は同等以上の性能と考えられる。EOG 法は 95.83%の精度であることが示されている[23]。また、カメラをメガネに搭載したシステムでは 95%である[3]。また、本手法の類似であり目横の筋肉運動をフォトフレクタで認識する手法が 85%である[24]。これらを踏まえると、より大規模な実験は必要であるが、提案手法の瞬目の認識精度が既存手法と同等以上であるとわかる。

以上から、本手法による瞬目回数の認識への、提案手法の有効性を確認した。

4 まとめ

本研究では、アイヘルス向上を支援するウェアラブルシステムのプラットフォームの開発を目指し、まずはアイヘルスに関わる要因を常時センシングするセンサデバイスとソフトウェアの開発を行った。提案手法では、筋肉運動に伴う皮膚の隆起変動に着目したセンシング技術を採用した。そして、プロトタイプシステムを実装し、瞬目運動や眼球運動の認識精度に関する複数の評価を行った。評価結果から、提案手法の有効性や実現可能性を確認した。

今後はより複数の考慮事項に関する評価を進める予定である。手法の頑健性を評価するために、多様な条件や場面で検証する。例えば、照明条件の異なる屋内や屋外での検証が必要であり、この照明条件はカメラベースの手法の精度が低下する要因として知られている。人種の違いにも対応できるかの検証も必要である。また、静止状態や歩行状態、運動状態といった身体運動に伴う状況での手法の精度評価も必要である。また、瞼の開き具合や瞬目持続時間などのアイヘルスに関わる他のパラメータの認識技術についても設計予定である。

本研究の遂行において多大なご支援を頂きました貴財団に心よりお礼申し上げます。

【参考文献】

1. Yan, Z., Hu, L., Chen, H., & Lu, F. Computer Vision Syndrome: A widely spreading but largely unknown epidemic among computer users. *Computers in Human Behavior*, 24(5), 2026-2042. (2008).
2. Miljanović, B., Dana, R., Sullivan, D. A., & Schaumberg, D. A. Impact of dry eye syndrome on vision-related quality of life. *American journal of ophthalmology*, 143(3), 409-415. (2007).
3. Rostaminia, S., Mayberry, A., Ganesan, D., Marlin, B., & 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).
4. Javadi, M. A., & Feizi, S. Dry eye syndrome. *Journal of ophthalmic & vision research*, 6(3), 192. (2011).
5. The Vision Council. 2016 Digital Eye Strain Report. Retrieved July 5, 2018 from https://visionimpactinstitute.org/wp-content/uploads/2016/03/2016EyeStrain_Report_WEB.pdf
6. Chau, M., & Betke, M. *Real time eye tracking and blink detection with usb cameras*. Boston University Computer Science Department. (2005).
7. Divjak, M., & Bischof, H. Eye Blink Based Fatigue Detection for Prevention of Computer Vision Syndrome. In *MVA*, 350-353 (2009).
8. Tobii Glasses: Mobile Eye Tracker for real world research. <http://www.tobii.com>.
9. Kassner, M., Patera, W., & Bulling, A. Pupil: an open source platform for pervasive eye tracking and mobile gaze-based interaction. In *Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and*

- ubiquitous computing: Adjunct publication*, 1151-1160. (2014).
10. Javadi, A. H., Hakimi, Z., Barati, M., Walsh, V., & Tcheang, L. SET: a pupil detection method using sinusoidal approximation. *Frontiers in neuroengineering*, 8, 4. (2015).
 11. Tonsen, M., Zhang, X., Sugano, Y., & Bulling, A. Labelled pupils in the wild: a dataset for studying pupil detection in unconstrained environments. In *Proceedings of the Ninth Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 139-142 (2016).
 12. SMI Eye Tracking Glasses. 2016
<http://www.eyetracking-glasses.com/products/eye-tracking-glasses-2-wireless/technology/>
 13. JINS MEME Eyewear. <https://jins-meme.com/en/>
 14. Ahmad, R. *Understanding the Language of the Eye: Detecting and Identifying Eye Events in Real Time via Electrooculography* (Doctoral dissertation, UC San Diego) (2016).
 15. Blehm, C., Vishnu, S., Khattak, A., Mitra, S., & Yee, R. W. Computer vision syndrome: a review. *Survey of ophthalmology*, 50(3), 253-262. (2005).
 16. Johnston, P. R., Rodriguez, J., Lane, K. J., Ousler, G., & Abelson, M. B. The interblink interval in normal and dry eye subjects. *Clinical ophthalmology (Auckland, NZ)*, 7, 253. (2013).
 17. Joan K Portello, Mark Rosenfield, and Christina A Chu. 2013. Blink rate, incomplete blinks and computer vision syndrome. *Optometry 8 Vision Science* 90, 5, 482--487 (2013).
 18. Rodriguez, J. D., Ousler III, G. W., Johnston, P. R., Lane, K., & Abelson, M. B. Investigation of extended blinks and interblink intervals in subjects with and without dry eye. *Clinical Ophthalmology (Auckland, NZ)*, 7, 337. (2013).
 19. Holly, F. J., & Lemp, M. A. Tear physiology and dry eyes. *Survey of ophthalmology*, 22(2), 69-87 (1977).
 20. Kojima, T., Ishida, R., Dogru, M., Goto, E., Takano, Y., Matsumoto, Y., ... & Tsubota, K. A new noninvasive tear stability analysis system for the assessment of dry eyes. *Investigative ophthalmology & visual science*, 45(5), 1369-1374 (2004).
 21. Freudenthaler, N., Neuf, H., Kadner, G., & Schlöte, T. Characteristics of spontaneous eyeblink activity during video display terminal use in healthy volunteers. *Graefes archive for clinical and experimental ophthalmology*, 241(11), 914-920 (2003).
 22. Schlöte, T., Kadner, G., & Freudenthaler, N. Marked reduction and distinct patterns of eye blinking in patients with moderately dry eyes during video display terminal use. *Graefes archive for clinical and experimental ophthalmology*, 242(4), 306-312 (2004).
 23. Pal, M., Banerjee, A., Datta, S., Konar, A., Tibarewala, D. N., & Janarthanan, R. Electrooculography based blink detection to prevent computer vision syndrome. In *2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 1-6 (2014).
 24. Dementyev, A., & Holz, C. 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(1), 1 (2017).

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月