

青山学院大学理工学部
情報テクノロジー学科
2024年度卒業研究論文

動画視聴における瞬目促進
フィードバック手法の検証

2025年1月28日提出

指導教員 ロペズ・ギヨーム 教授

提出者学生番号 氏名
15821068 新村 温人

動画視聴における 瞬目促進フィードバック手法の検証

新村 溫人 (15821068)

ロペズ研究室

1. はじめに

近年、動画配信市場は急速に拡大しており、その市場規模は2019年から2024年の4年間で96%増加し、長時間視聴が恒常化している[1]。一方、デジタルデバイスの使用中には瞬目(瞬き)の頻度が大幅に低下し、これがドライアイや眼精疲労を引き起こす要因となり、社会的な課題となっている[2]。

本研究は、眼精疲労やドライアイの対策として、動画視聴中の瞬目促進を目的としている。瞬目をリアルタイムで検出し、視覚、聴覚、触覚を活用した4種類のフィードバックによって瞬目を促進するシステムを提案し、その効果を比較する。

2. 関連研究

東覚らは、ドライアイ軽減のため、瞬目回数を検知しリマインドを提示するシステムを提案した[3]。瞬目が10秒間に2回以下になる条件でリマインドを行う方法が最も効果的であり、瞬目の安定化に寄与することが示された。一方で、リマインド方法が邪魔と感じやすいという意見があり、他の感覚モダリティ（聴覚や触覚など）を用いた比較や評価は行われていない。

前川らは、瞬目の模倣と印象形成への影響を調査した[4]。その結果、瞬目が同期する画像は非同期の画像より好感度が高く評価されることを確認した。

3. 瞬目促進システムの概要

本研究では、動画視聴中の瞬目を促進するため、瞬目検出とフィードバック提示機能を備えた瞬目促進システムを開発した。瞬目検出機能、フィードバック提示機能と、データ記録機能の3つで構成される。

瞬目検出には、MediaPipe ライブラリを使用し、ノートPCの内蔵カメラによる顔のランドマーク検出を通じて目の開閉状態を判定する[5]。具体的には、EAR

(Eye Aspect Ratio) を用い、上下まぶた間の距離が一定以下の場合に瞬目と判定する[6]。

フィードバック提示機能では、視覚2つ（フラッシュと、アニメーションGIF）、聴覚1つ（短音通知）、触覚1つ（スマートウォッチの振動）の4種類を実装した。通常の平均瞬目回数である10秒間で瞬目回数が3回を基準に設定し、3回以下になった際にフィードバックを提示する[2]。

データ記録機能では、分析のために10秒ごとの瞬目回数とフィードバックの有無を記録する。ユーザは動画視聴中、自然な形で瞬目を促進するフィードバックを受けることで、眼精疲労やドライアイの軽減が期待される。

4. 瞬目促進システムの効果検証方法

まず、EARの閾値設定条件を最適化するため、5名を対象として予備実験を実施した。結果、EARが0.17の付近で実際の瞬目回数と検出された瞬目回数が最も近似することが確認された。

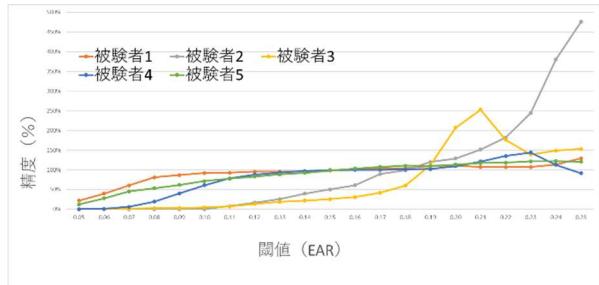


図1. 連続フレーム数2における閾値ごとの瞬目検出精度

一方で、個人差が大きく、各被験者に適した閾値を設定する必要があることが分かった。これを踏まえ、本実験では被験者ごとに事前調整の時間を設け、適切な閾値を設定して実験を進めた。

そして、4種類のフィードバックに加えて、フィー

ドバックなしの 5 条件で比較を行うため、30 分間の動画視聴中に各条件を 6 分ごとにランダムに切り替えた。被験者 10 名を対象に瞬目回数や視聴体験への影響を評価し、アンケートによる各フィードバックの印象や視聴体験への影響を調査した。

5. フィードバック条件の有効性検証結果

瞬目促進システムの 5 つの条件における瞬目回数の結果を図 1 に示す。10 秒間における瞬目の平均回数はフィードバックなしと比べて各フィードバックで増加した。また、フラッシュを除く 3 つのフィードバック方法では基準値である「10 秒間に 3 回」を上回った。

また Tukey の多重比較検定[7]を用いて条件間の差を分析した結果を表 1 に示す。フィードバックなしの条件に比べて、音の条件 ($p=0.03$) および、スマートウォッチの条件 ($p=0.01$) で瞬目回数が有意に増加したことが確認された。一方、GIF、フラッシュ、音、スマートウォッチの間では統計的に有意な差は認められなかった ($p>0.05$)。

次に被験者ごとの有意差を同様に検証した結果、10 名中 8 名で条件間に有意差が確認され、音とスマートウォッチの条件で瞬目回数が増加した。一方、被験者 1 と 8 では有意差が見られず、個人差が顕著であることがわかった。

アンケートでは、各フィードバックが視聴体験に影響を与えるとの意見がある一方で、GIF や認識されないケースも確認された。また、事前説明により瞬目を意識した可能性があり、今後は自然な瞬目促進効果を評価する実験方法が必要である。これらの結果は、認識度と視聴体験への影響を最適化したフィードバック設計が必要であることを示唆している。

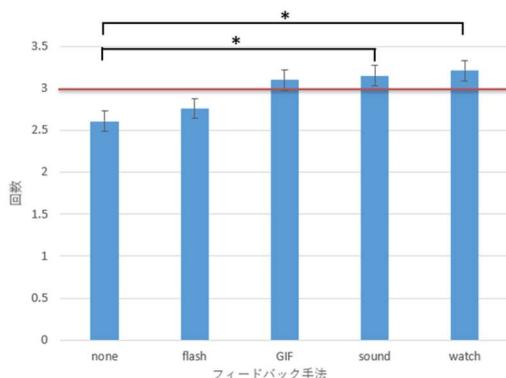


図 2. 10 秒間の平均瞬目回数 (* : $p < 0.05$)

表 1. Tukey の多重比較検定による各フィードバック間の有意差

比較条件 (Group1)	比較条件 (Group 2)	p 値	有意差
none	flash	0.9290	FALSE
none	GIF	0.0662	FALSE
none	sound	0.0301	TRUE
none	watch	0.0113	TRUE
flash	GIF	0.3622	FALSE
flash	sound	0.2189	FALSE
flash	watch	0.1113	FALSE
GIF	sound	0.9986	FALSE
GIF	watch	0.9756	FALSE
sound	watch	0.9979	FALSE

6. まとめ

本研究では、動画視聴中の瞬目促進を目的とした 4 種類のフィードバックシステムを提案し、その効果を検証した。結果、音とスマートウォッチのフィードバックが瞬目回数を有意に増加させた。一方でフィードバックが認識されない場合があり、設計の改善が必要とされた。また、個人差や被験者が瞬目を意識した可能性が示唆され、自然な条件下での評価が課題である。

今後は、モバイルデバイスでの適応型アルゴリズムの開発や、瞬目促進による視覚疲労やドライアイ軽減の長期的効果の検証を通じて、実用性の向上を目指す。

参考文献

- [1] 総務省: 令和 6 年版情報通信白書データ集 (2022) . https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/white_paper/ia/r06/html/datasu.html#f00263. (最終閲覧日 : 2025/1/26)
- [2] ウエルビーイングクリニック駒沢公園: デジタル時代における眼精疲労 (Digital EyeStrain, DES) <https://wbck.tokyo/archives/1353>. (最終閲覧日 : 2025/1/26)
- [3] 東覚瑠菜, 神場知成: ドライアイ軽減のためのまばたきリマインド機能の開発と評価, インタラクション 2024 論文集, 論文 ID: 1P-82, pp. 556-561 (Feb. 2024).
- [4] Maekawa, T. and Inui, T.: 瞬目の模倣が他者の印象に与える影響, 認知心理学研究, Vol. 16, No. 2, pp. 15-24 (2019).
- [5] Google AI for Developers: MediaPipe ソリューション ガイド <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=ja>. (最終閲覧日 : 2025/1/26)
- [6] Soukupova, T., & Cech, J.: Eye blink detection using facial landmarks , 21st computer vision winter workshop, Rimske Toplice, Slovenia, Vol. 2, pp. 1-6 (2016).
- [7] Tukey, J. W.: Comparing individual means in the analysis of variance, Biometrics, Vol.5, No.2, pp.99-114 (1949).

目 次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 動画配信市場規模の増加	1
1.1.2 VDT作業における健康問題	2
1.1.3 涙と瞬目の役割	2
1.1.4 VDT作業と瞬目の関係	3
1.1.5 ドライアイ患者の割合と瞬目の関係	3
1.2 研究目的と目標	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 関連研究	5
2.1 瞬目に関する研究	5
2.1.1 瞬目促進のフィードバック提示	5
2.1.2 瞬目検出に関する研究	6
2.1.3 感覚刺激と瞬目行動の関係に関する論文	6
2.2 目の健康に関する論文	8
2.2.1 デジタルデバイスによる目の影響	8
2.3 注意喚起に関する論文	8
2.4 先行研究のまとめ	9
第3章 開発システムについて	10
3.1 瞬目促進システムの概要及び提案手法	10
3.2 瞬目促進システムのハードウェアの構成	10
3.3 瞬目促進システムのソフトウェアの構成	12
3.3.1 瞬目検出機能	12
3.3.2 フィードバック提示機能	14
3.3.3 データ記録機能	16
3.4 システムの利用方法	16

第4章 瞬目促進システムの効果検証実験	17
4.1 実験目的	17
4.2 実験概要	17
4.2.1 瞬目検出条件の最適化実験の概要	17
4.2.2 フィードバック条件の有効性検証実験の概要	18
4.3 実験手順	18
4.3.1 瞬目検出条件の最適化実験	18
4.3.2 フィードバック条件の有効性検証実験	19
4.4 データ分析方法	21
4.5 アンケートでの評価方法	21
第5章 実験結果及び考察	23
5.1 瞬目検出条件の最適化実験の結果	23
5.2 フィードバック条件の有効性検証実験の結果	28
5.3 アンケート結果	32
5.4 考察	32
第6章 結論	34
6.1 まとめ	34
6.2 今後の展望	34
参考文献	37

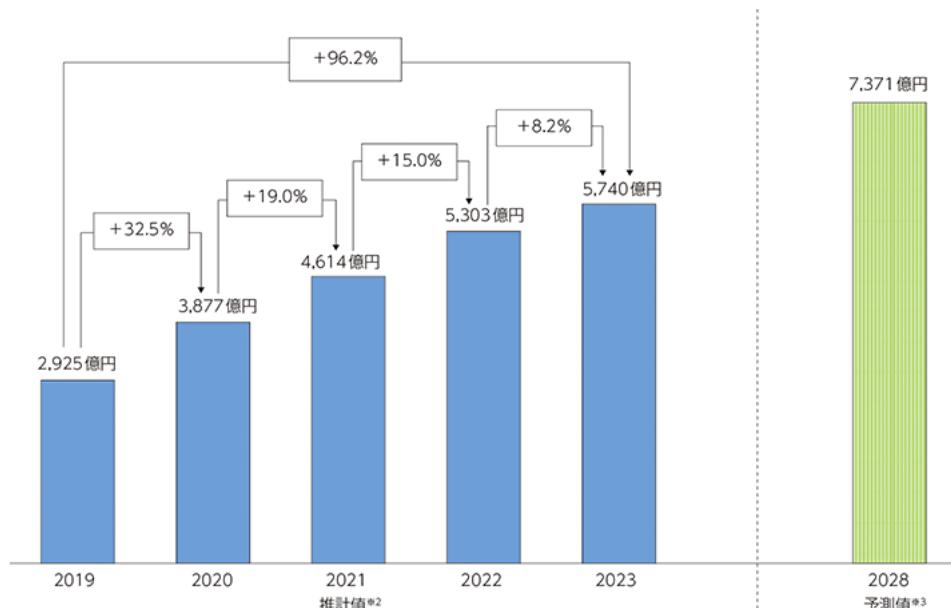
第1章 序章

本章では、社会的な背景をもとに研究の位置付けを明確にする。1.1節では、研究背景としてコンテンツ視聴における現状と課題について述べる。1.2節では、背景に挙げた課題を踏まえた本研究の目的を定義する。1.3節では、本論文の構成について述べる。

1.1 研究背景

1.1.1 動画配信市場規模の増加

近年、日本で動画配信市場が増加傾向にある。総務省が実施した、消費者が動画配信サービス事業者に支払った金額の合計に関する調査の報告によると、2019年は2,959億円であったのに対し、2023年は5,704億円と4年間で96.2%の増加を示している[1]。また、2028年における予測値は7,371億円となり、今後も市場規模は拡大していくことが予想されている。これにより、動画視聴体験の質向上や健康的な視聴態度の促進が重要な課題となっている。



*1 動画配信規模：「定額制動画配信（SVOD）」「レンタル型動画配信（TVOD）」「動画配信販売（EST）」の合計

*2 契約形態に関わらず、消費者が動画配信サービス事業者に支払った金額の総額

*3 消費者調査の結果、日本と米国の動画配信のこれまでの普及実績と映像ホームエンタテインメント全体におけるDVD・BD市場と動画配信の比率、また新型コロナウイルスの流行の影響を踏まえ、「ベース」「楽観」「悲観」の3つのシナリオで試算。本値は「ベース」シナリオによる

図 1-1: 日本の動画配信市場規模の推移 ([1] より引用)

1.1.2 VDT 作業における健康問題

VDT (Visual Display Terminal) 作業に伴う健康問題は社会的に注目を集めている。厚生労働省の調査では、VDT 作業を行う労働者のうち 68.6 %が身体的疲労を感じており、その中でも、図 1-2 に示すように「目の疲れ・痛み」を最も多く挙げている (90.8 %) [2]。また、第一三共ヘルスケア株式会社の調査によれば、図 1-3 に示すように、テレワーク中の男女において、眼精疲労を訴える割合は女性 22.0 %、男性 15.7 %であることが示された [3]。これらの結果から、VDT 作業による瞬目頻度の減少が健康に悪影響を及ぼしていることが示唆されている。

区分	身体的な疲労や症状がある労働者計	身体的な疲労や症状の内容 (複数回答)								身体的な疲労や症状がある (平成 15 年)	
		頭痛	目の疲れ・痛み	首、肩のこり・痛み	腕、手、指の疲れ・痛み	背中の疲れ・痛み	腰の疲れ・痛み	足の疲れ・痛み	その他		
平成 20 年	[68.6]	100.0	23.3	90.8	74.8	17.4	22.9	26.9	8.3	1.7	[78.0]

図 1-2: VDT 作業における身体的疲労に関する調査データの抜粋 ([2] より引用)

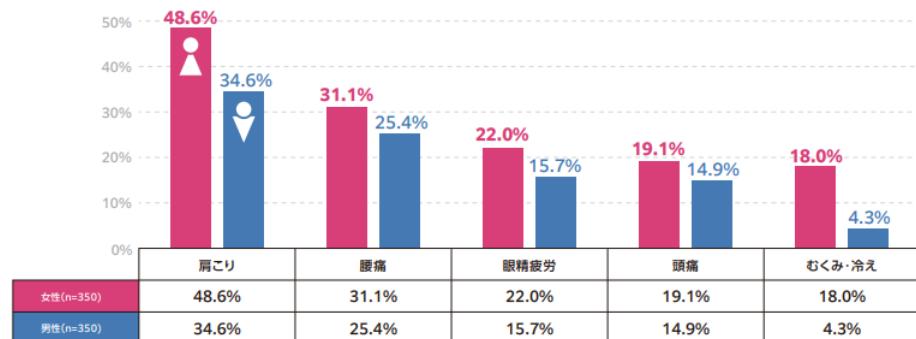


図 1-3: テレワークにおける不調内容の男女比較 ([3] より引用)

1.1.3 涙と瞬目の役割

涙は多くの役割を持っている。坪田によると、涙は目の表面が必要としているビタミン類およびタンパク質などの供給、目の表面の酸化および炎症から目を守る働き、外からの侵入物および古くなった細胞のを運び去る役割など多くの役割を持っている [4]。そして、瞬目は涙を目の表面を均一に運ぶ役割があり、瞬目を行わないと目の表面が乾燥し、涙が作られても上手く分配することが可能でなくなるため、意識的に瞬目を行う必要がある。近年人々の涙は減少傾向にあり、その分瞬目の重要度はますます高まっている。

1.1.4 VDT 作業と瞬目の関係

デジタルデバイスの普及は人々の健康に影響を与えている。ウェルビーイングクリニック駒沢公園は、DES と呼ばれるデジタルデバイスの長時間使用が引き起こす眼精疲労が新たな健康問題として注目されていることを示した [5]。DES の原因として、通常は1分間に平均18-22回である瞬目が、デジタルデバイスの使用中には1分間に5-7回まで減少してしまうことで、目の表面に形成された涙液膜が破れるまでの時間が短縮されることが挙げられる。結果としてドライアイ症状の発生が懸念されることが述べられている。

1.1.5 ドライアイ患者の割合と瞬目の関係

ドライアイは、目を守るために必要な涙の量が不足したり、涙の質のバランスが崩れることで、涙が目全体に均等に行きわたらなくなる病気である。ドライアイ研究会によると、高齢化およびエアコンの使用、パソコンおよびスマートフォンの長時間使用、さらにはコンタクトレンズの装用者の増加に伴い、ドライアイの患者数は増加しており、その数は約2,200万人にのぼると述べている。[6]。ドライアイは主に涙の量が減少する「量的な異常」と、涙の性質および涙を保持する能力が変化する「質的な異常」の2つに分類することが可能であり、特に「質的な異常」の中には、「BUT短縮型ドライアイ」と呼ばれる症状が強いタイプがある。BUT短縮型ドライアイは涙の分泌はされるが目の表面で涙の膜が安定せず、5秒以内に涙が乾いてしまうのが特徴であり、VDT 作業の多いオフィスワーカーおよびコンタクトレンズ装用者に多く見られる傾向があるとされている。

1.2 研究目的と目標

1.1節で述べたように、近年、動画配信市場の拡大とともに、動画視聴に伴う健康問題の改善が求められている。特に、眼精疲労およびドライアイは、VDT 作業中の瞬目減少が一因として挙げられ、重要な課題とされている。本研究では、動画視聴中における瞬目促進による健康問題の改善することを目的とする。

動画視聴中の瞬目回数を検出し、その回数が基準値を下回った場合に適切なフィードバックを与えることで、瞬目を促進し、健康的な視聴態度を促すシステムの提案と開発を目的とする。具体的には、瞬目を検出するアルゴリズムを用いて瞬目の減少をリアルタイムで判断し、基準値未満の場合に画面にフラッシュの表示、GIF表示、音声再生、またはスマートウォッチの振動といった4種類のフィードバックを提供する。さらに、それぞれのフィードバックの有効性を比較・評価する実験を実施し、最適なフィードバック手法を探ることを目指す。

1.3 本論文の構成

第1章では、本論文の研究背景、研究目的、及び本論文の構成について述べた。第2章では、関連研究について説明する。

第2章 関連研究

本章では、関連研究について述べる。2.1節では瞬目に関する研究、2.2節では目の健康に関する研究、2.3節では注意喚起に関する研究について述べる。

2.1 瞬目に関する研究

2.1.1 瞬目促進のフィードバック提示

東覚らは、長時間のパソコン作業によるドライアイ軽減を目的とし、瞬目回数を検知して適切なタイミングでリマインドを行うシステムを提案した[7]。図2-1は、本研究で提案されているフィードバック方法である。内蔵カメラとMediaPipeライブラリを活用し、上下まぶた間の距離を基に瞬目を検出する。比較実験では、「10秒間に瞬目回数が2回以下の場合にリマインド」の条件が最も効果的で、瞬目回数の増加や不完全な瞬目の減少が確認された。長時間使用実験でも瞬目の安定化が示され、被験者からの評価も高かった。一方で、リマインド方法が邪魔と感じやすいという意見があり、他の感覚モダリティ(聴覚や触覚など)を用いた比較や評価は実施されなかった。また、瞬目の質改善にはさらなる検証が必要であることが示唆された。

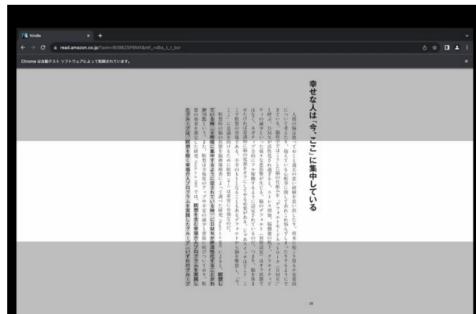


図2-1: 提案されているフィードバック方法 ([7]より引用)

大石らは、VDT作業による瞬目減少を防ぎ、ドライアイを軽減するための瞬目促進システムを提案した[8]。システムは瞬目検出、促進、制御機能から構成され、瞬目減少時に画面を白く曇らせることで注意を促すように開発された。従来のポップアップ警告では効果が限定的であったが、提案された手法は視覚的变化でユーザーの注意を引きやすいと

考えられた。今後は実証実験を通じて有用性を検証し、適応性の向上が目標として掲げられた。

伊藤らは、スマートグラス（SG）、LCD、紙媒体によるVDT作業の眼精疲労度を比較した[9]。77名の被験者を対象に、瞬目回数、フリッカーレベル、高周波成分（HFC）などを測定。SG群は疲労が少なく、紙群は最も強い疲労を示した。SGは視線移動を減らし負担軽減に寄与したが、ドライアイ傾向の被験者も存在した。結果は、医療現場でのSG利用時に配慮が必要であることが示唆された。

2.1.2 瞬目検出に関する研究

Terezaらは、顔のランドマーク検出を活用した瞬目検出アルゴリズムを提案した[10]。ランドマーク検出器を用いて眼の特徴点を抽出し、眼の開閉状態を表す指標である「眼裂縦横比（EAR）」を計算し、EARの変動パターンを用いて、瞬目をSupport Vector Machine（SVM）およびHidden Markov Model（HMM）を通じて分類・検出した。これらの方針は、精度が高く、リアルタイムで動作可能であり、データセット（ZJU, Eyeblink8, Silesian）での評価でも既存手法と比較して良好な結果を示した。瞬目頻度および持続時間といった特性を活用し、運転中の眠気検知および注意力監視などの応用が期待された。

2.1.3 感覚刺激と瞬目行動の関係に関する論文

前川らは、瞬目の模倣が無意識に行われる現象と、それが印象形成に与える影響を調査した[11]。実験では、ランダムに瞬目する画像が提示されると、参加者も無意識に画像の瞬目と同期して瞬目を行うことが確認された。また、参加者の瞬目に同期する画像は、非同期の画像よりも好感度が高く評価された。結果として、視覚的に提示された瞬目が観察者の瞬目行動を誘発し、模倣行動が他者への好意的印象を促進する可能性が示唆された。

山田らは、驚愕性瞬目反射に先行刺激が与える影響を調査した[12]。微弱な先行刺激（S1）が強い音刺激（S2）に先行する場合、刺激間隔（ISI）によって反射が抑制または促進されることが確認された。特に、ISIが短い場合は反射量が抑制され、長い場合は促進効果が見られた。山田らの研究は、視覚および聴覚の刺激が瞬目反射に与える影響を明らかにし、感覚刺激が反応制御に寄与する可能性を示唆した。

山田らは、驚愕性瞬目反射を用いた「驚愕プローブパラダイム」の手法で感情を定量的に評価する研究を行った[13]。急峻な音刺激によって誘発される瞬目反射が、感情状態（快・不快）によって促進または抑制される特性を利用している。視覚および嗅覚などの感覚刺激を通じ、特定の感情を惹起した際の反射量を測定し、感情状態を客観的に評価する方法論を提案した。また、薬物および遺伝子型、性差が感情処理に与える影響も検討さ

れた。結果として、驚愕性瞬目反射は他覚的な感情評価の有効な指標となり得ることが示唆された。山田らの研究は、感情の評価と健康科学の応用可能性を広げる一助となる知見を提供した。

Rushworth は、瞬目反射がさまざまな刺激（視覚、聴覚、触覚）に応じて引き起こされるメカニズムを調査し、瞬目反射が神経系の病変の診断および評価に役立つ可能性が示唆された [14]。実験では、グラベラ（眉間）へのタップ、強い音、明るい光フラッシュが刺激として使用され、これらがどのように異なる神経経路を活性化するかを解析した。特に、明るい光フラッシュは瞬目反射を誘発する有効な刺激であり、その反射の遅延および強度が神経系の健康状態を示唆することが分かった。さらに、これらの反射が単なる保護反応ではなく、感覚入力を統合する複雑なプロセスに関与している可能性も提案された。

2.2 目の健康に関する論文

2.2.1 デジタルデバイスによる目の影響

Bin らは、デジタルアイストレイン (DES) と呼ばれる、デジタルデバイスを使用することによって引き起こされる眼の不快感および視覚的な問題の普及とその影響を探った [15]。大学生を対象に、彼らのデバイス使用時間および頻度、経験する症状の種類を調査した。結果として、67 % の参加者が 1~5 種類の症状を報告し、最も一般的な症状は目の乾燥および痛み、頭部および首のこりであった。また、デバイス使用時間が長いほど症状が悪化する傾向が見られた。研究は、デジタル環境が眼の健康に与える影響を強調し、適切な対策および予防策の重要性が示唆された。

Kaur らは、デジタルデバイスの使用が増加する中、DES の症状およびリスク要因、影響を受ける人口について詳しく分析した [16]。主な症状には目の乾燥、かゆみ、頭痛、光に対する過敏性などがあり、特に学生および若年層に多く見られる。調査結果では、デジタルデバイスの使用時間が長いほど、これらの症状の発生率が高くなることが示された。また、適切な休憩および目のケアが重要であることも強調されていて、全体としてデジタル環境における視覚的健康の重要性と、予防策の必要性を提示した。

Irina らは、デジタルデバイスの使用に伴う「コンピュータビジョン症候群 (CVS)」を取り上げた [17]。CVS は長時間の画面使用による視覚的・筋骨格的な症状および行動変化を指し、主な症状として視力低下、目の疲れ、頭痛、首および肩の痛み、注意力の低下が挙げられていた。研究は、CVS の主要な要因として、デバイスの不適切な使用、照明条件、長時間の作業、乾燥した環境などを指摘した。特に女性および子ども、スマートフォンの過剰使用者にリスクが高いことが示された。また症状の予防には、20 分ごとに作業を中断し、20 秒間、6 メートル (20 フィート) 以上離れた場所を見る「20-20-20 ルール」および目を閉じて 2 秒間静止し、その後、まぶたを強く閉じる動作を繰り返す点滅運動などが有効だと提示した。

2.3 注意喚起に関する論文

Wickens らは、多重資源理論 (Multiple Resource Theory) に基づき、タスク間の干渉を予測するモデルを提案した [18]。多重資源理論では、タスクが共有する認知資源（感覚モダリティ、処理段階、符号化の種類など）の特性により、干渉の程度が変化することが示された。特に、異なる感覚モダリティ（例：視覚と聴覚）を使用するタスクは、同じモダリティを共有するタスクよりも干渉が少ないとされていた。著者は、音が他の感覚刺激を補完し、注意喚起およびタスク切り替えを促進する役割を果たす点を強調し、高負荷環境

での実用性を示した。理論とモデルは、操縦士および運転者が複数のタスクを効率的に処理する設計への応用可能性があると結論づけた。

岡村らは、視覚、聴覚、触覚の3つの感覚刺激が同時に提示された場合の情報統合の特性を調査した[19]。結果として、視覚刺激が最も重要であり、触覚は視覚および聴覚に次ぐ役割を果たすことが示された。また、触覚刺激は他の感覚と相互作用しながら情報統合を補完し、注意喚起に寄与する可能性があることを示した。岡村らの研究は、感覚モダリティ間の重要度を明らかにした。

Xuらは、視線移動に基づく触覚フィードバック(eyerofeedback)が注意喚起に与える効果を調査した[20]。触覚刺激により、被験者は自身の視線挙動と注意状態を自覚しおよびすくなり、特に注意維持が難しい長時間タスクでパフォーマンスが向上した。Xuらの研究は、触覚刺激が他の感覚モダリティを補完し、注意喚起を促進する手段として有効であることを示した。

2.4 先行研究のまとめ

これまでの研究では、感覚刺激を利用した瞬目促進および注意喚起の効果が多く示されており、それぞれの感覚モダリティが瞬目行動および視覚健康に与える影響が明らかにされてきた。しかし、異なる感覚モダリティを比較検討する研究は限られており、それぞれの手法の有効性を包括的に評価する必要がある。本研究では、視覚、聴覚、触覚を活用したフィードバック手法を通じて、瞬目促進における最適な刺激方法を明らかにすることを目指す。本研究により、瞬目不足が引き起こす眼精疲労およびドライアイの軽減に寄与し、日常生活に適用可能なシステム設計への新たな知見を提供することを目指している。

第3章 開発システムについて

本章では、本論文が開発および提案する、動画視聴中の瞬目促進システムについて述べる。

3.1 瞬目促進システムの概要及び提案手法

本システムは、Python を用いて開発された瞬目検出アプリケーションをベースに構築されている。動画視聴中に瞬目が減少することによるドライアイのリスクを低減し、視覚の健康を維持することを目的として開発された。特に、瞬目の頻度低下による目の乾燥を防ぎ、ユーザの快適な動画視聴体験を支援することを目指している。

3.2 瞬目促進システムのハードウェアの構成

本研究で使用するノート PC は、図 3-1 に示している、NEC 社が開発した「LAVIE Direct PM」である [21]。第 11 世代の Intel Core i7-1165G7 プロセッサ（基本クロック周波数: 2.80 GHz）を搭載し、16GB のメモリと 512GB の SSD ストレージを備えたノートパソコンである。13.3 インチのフル HD ディスプレイを搭載し、約 1.2kg の軽量設計で持ち運びが容易である。LAVIE Direct PM は実験システムの動作環境として使用され、Python ベースの瞬目検出アプリケーションを実行し、内蔵カメラを用いて被験者の瞬目をリアルタイムで計測する役割を果たす。



図 3-1: NEC 社が開発した「LAVIE Direct PM」（[21] より引用）

本研究で使用するスマートウォッチは、図 3-2 に示している、Google 社が開発した「Google Pixel Watch」である [22]。GPS および心拍計に加えて、3 軸加速度計、3 軸角速度計、3 軸磁力計などの多くのセンサを搭載したスマートウォッチである。瞬目検出条件の最適化実験ではフィードバックの一つであるスマートウォッチの振動と GIF の表示を行うために用いる。



図 3-2: Google 社が開発した「Google Pixel Watch」（[22] より引用）

3.3 瞬目促進システムのソフトウェアの構成

システムは、以下の3つの主要機能から構成されている。

1. 瞬目検出機能
2. フィードバック提示機能
3. データ記録機能

各機能は相互に連携し、瞬目の検出およびフィードバック提示をリアルタイムで行うように設計されている。図3-3にシステム全体のフロー図を示す。

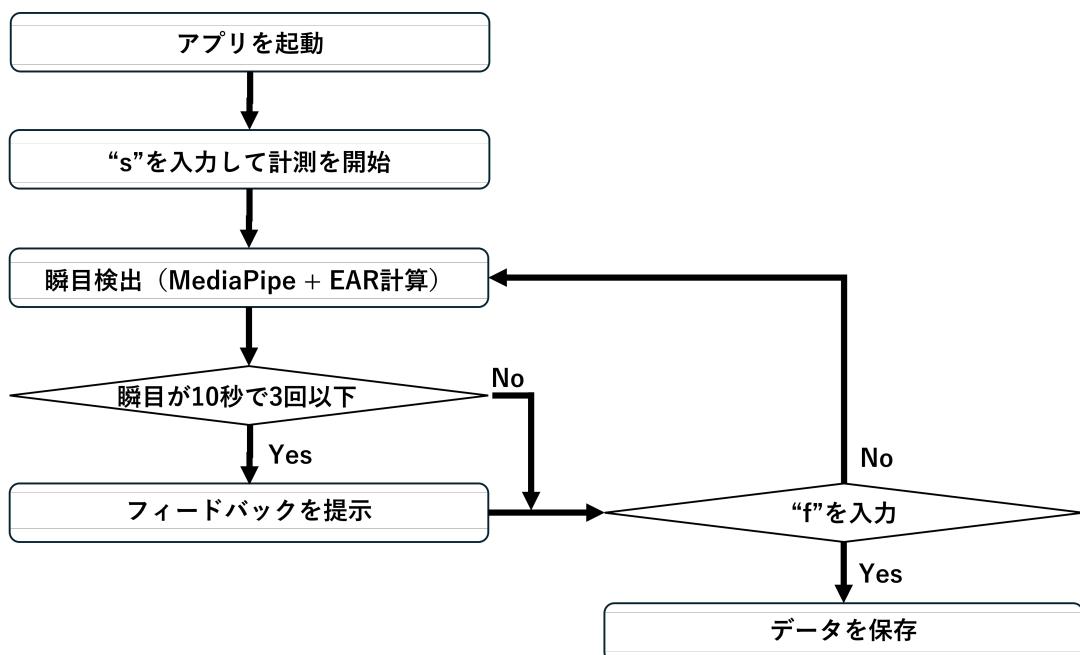


図3-3: システム全体のフロー図

3.3.1 瞬目検出機能

瞬目検出機能にはPythonのライブラリであるMediaPipe Solutionsを使用している。MediaPipe Solutionsは、アプリケーションに人工知能（AI）および機械学習（ML）の技術を迅速に適用するためのライブラリとツールのスイートである[23]。本ソリューションはすぐに利用可能で、ニーズに応じたカスタマイズが可能である。MediaPipe SolutionsはMediaPipeオープンソースプロジェクトの一部であり、提供されるソリューションコードをさらにカスタマイズすることで、アプリケーションの特定の要件に対応することが可能である。複数の開発プラットフォームに対応しており、幅広い用途で活用することが可能である。オブジェクト検出、画像・テキスト・短音の分類、画像生成など様々な機能があ

るが、本研究では顔のランドマーク検出機能を使用し、目の形状から眼の開閉状態を検出する。

瞬目の検出手法として、EAR（Eye Aspect Ratio）を用いる。EARは目の開閉状態を評価するための単一スカラー量であり、目のランドマーク（特徴点）を基に計算される[10]。目が開いている間、EARの値はほぼ一定であり、目が閉じるにつれて値が0に近づく。本指標は、個人差および頭部の姿勢の影響を受けにくく、画像のスケーリングおよび顔の平面回転に対して完全に不变です。また、両目は同期して瞬目を行うため、両目のEARを平均して計算します。EARは以下の式で定義される。

$$\text{EAR} = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2 \cdot \|p_1 - p_4\|}$$

p_1, p_4 目の左右の端点（水平方向の幅を表す）

p_2, p_6 目の上下の端点（垂直方向の高さを表す）

p_3, p_5 目の垂直方向中央の上下の点（補助的な高さを表す）

EARの計算結果例を図3-4に示す。また、システムにおけるEARおよびEARの連続フレーム数という2つの閾値は、瞬目検出条件の最適化実験を基に設定する。

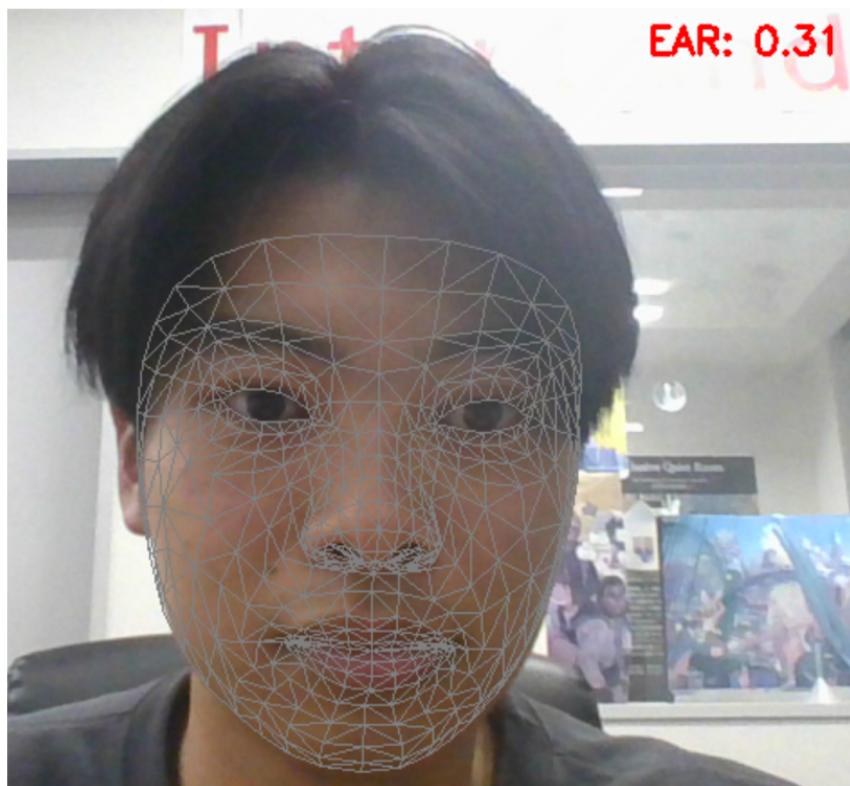


図3-4: EARの計算結果例

3.3.2 フィードバック提示機能

瞬目検出条件の最適化実験では、以下の4種類のフィードバックを実装している。

1. フラッシュ
2. アニメーション GIF 表示
3. 短音通知
4. スマートウォッチの振動・GIF 表示

視覚的刺激として、フラッシュとアニメーション GIF の表示を採用した。Rushworth (1962) は、視覚刺激を用いた瞬目反射の研究で、強い光フラッシュが反射的な瞬目を誘発する有効な刺激であることを示した [14]。本研究では、この知見を基に、瞬目促進を目的としたフィードバックとして（図 3-5）のような「フラッシュを模倣した白い画面の一瞬表示」を採用した。白い画面の表示は、フラッシュと同様に瞬間的な明暗変化を生じさせるため、視覚的注意を瞬時に引きつけ、瞬目を誘発する可能性がある。このような視覚刺激の利用は、瞬目促進システムにおける効果的なフィードバックとして機能することが期待される。また、アニメーション GIF の表示は、図 3-6 のように画面上部に目が瞬目するアニメーションを表示する。視覚的に提示された瞬目が観察者によって無意識に模倣される現象が示されているため [11]、GIF の動きに合わせた模倣行動を通じて自然な瞬目を誘発することを目指している。



図 3-5: フラッシュの実装例



図 3-6: アニメーション GIF 表示の実装例

短音通知は、聴覚的刺激として「ピピッ」と表現される短い音を使用し、瞬目への意識を高める役割を果たす。聴覚的刺激は、他の感覚刺激を補完し、注意喚起およびタスクの切り替えを促進する効果があるとされており [18]、短い「ピピッ」と表現される音は、瞬目不足を自然に意識させ、行動を促進する効果が期待される。また、音刺激は聴覚を通じ

て瞬間に注意を喚起し、反射的な瞬目を誘発する要因であることが示されている [12]. これにより、短音通知は負担を抑えつつ、瞬目促進を効果的に実現する手法として有用であると考えられる.

触覚的刺激としては、スマートウォッチの振動を採用した. 触覚は、視覚および聴覚に集中している状況でも有効な代替手段として機能し、負担を抑えながら注意を喚起することが可能である点で有用性がある [20]. また、Google Pixel Watch の振動機能と画面表示を組み合わせ、視覚・触覚の両面から瞬目を意識させるよう設計した（図 3-7）. アニメーション GIF の表示は、他の視覚刺激と同様に模倣行動を誘発し、自然な瞬目を促進する狙いがある.



図 3-7: スマートウォッチの振動・GIF 表示の実装性

これらのフィードバック手法を用いた実験を通じて、異なる感覚刺激が瞬目促進にどのような効果をもたらすかを比較検討し、それぞれの有効性を明らかにすることを目指している.

フィードバックのタイミングは、先行研究 [7] を基に選定した. 先行研究では、瞬目促進に効果的な 4 つの方法が比較され、以下の結果が得られている：

1. リマインドなし（ベースライン）：瞬目回数が少なく、短い瞬目が多い傾向であった.
2. 一定（40 秒に 1 回）：瞬目回数は増加するが、短い瞬目が増える場合もある.
3. 瞬目の回数が 10 秒あたり 2 回以下になった時：瞬目回数が最も増加し、短い瞬目も減少する効果が最も高かった.
4. 質の悪い瞬目が 40 秒あたり 2 割を超えた時：効果が限定的で、被験者が使いづらいと感じる場合があった.

1.1.4 節で述べたように、通常は1分間に平均18-22回である瞬目が、デジタルデバイスの使用中には1分間に5-7回まで減少してしまう [5]. したがって、本研究では、先行研究と同様10秒ごとにフィードバックを提示するが、基準の設定を通常の平均瞬目回数である「10秒で3回以下」とし、基準を満たす場合に提示をするように開発をした。

3.3.3 データ記録機能

データ記録機能では、経過時間、瞬目の頻度、フィードバックの有無を10秒単位で記録する。各フィードバックの効果を後述する実験で評価が可能であるように設計されている。

3.4 システムの利用方法

本システムの利用方法は以下の通りである。

1. パソコンでPython アプリケーションを起動する
2. スマートウォッチを装着し、スマートウォッチアプリを起動する
3. 動画視聴直前にアプリのウィンドウで「s」を入力し、瞬目の計測を開始する
4. 計測中はフィードバックが自動で提示されるため、ユーザは動画視聴を続ける
5. 30分の実験終了後、「f」を入力して記録データを保存する

第4章 瞬目促進システムの効果検証実験

本章では、瞬目促進システムを用いた評価実験について述べる。評価実験における被験者は実験説明を受け、実験に対する同意書による同意をもって、実験に参加する。

4.1 実験目的

本システムは動画視聴中の瞬目回数を増加させることを目的としているため、実験では瞬目促進効果やシステムの利便性を評価する。また、実験の流れや評価指標についても詳述する。

フィードバック条件の有効性検証実験の目的は、4種類の異なるフィードバック手法が、瞬目促進に及ぼす効果を比較検討することである。特に、瞬目回数の増加およびユーザ体験（視聴体験への影響や不快感の有無）に焦点を当て、それぞれのフィードバック手法の有効性を評価する。また、被験者の瞬目行動に対する感覚刺激の適応性や、長時間使用における実用性を検証することで、瞬目不足が引き起こすドライアイや眼精疲労の軽減に貢献する新たなシステム設計の可能性を探る。

4.2 実験概要

瞬目検出条件の最適化実験は、瞬目検出条件の最適化実験とフィードバック条件の有効性検証実験の2段階で構成されている。

- 瞬目検出条件の最適化実験では、EARの閾値と連続フレーム数を基準に、瞬目検出の最適な条件を調査する
- フィードバック条件の有効性検証実験では、フィードバックの有無や種類による瞬目促進効果を評価する

4.2.1 瞬目検出条件の最適化実験の概要

瞬目検出条件の最適化実験では、瞬目検出の閾値（EAR）の適切な範囲を調査することを目的とし、各被験者に対してEARの閾値と検出結果の関係を確認した。使用するシステムは、本システムから機能を限定し、アプリの起動時間とEARの値のみを保存するよ

うに改良したものを使用する。EARの値被験者は男女5名とし、各自が10分間の動画視聴を行い、その間のEARの変動データを記録した。EARの閾値は0.00から0.30までを0.01刻みで設定し、MATLABを用いて各閾値ごとの瞬目検出回数を算出する。また、視聴中の動画を撮影し、実際の瞬目回数を目視で計測する。得られた実際の瞬目回数と各閾値で検出された瞬目回数を比較し、最も実際の回数に近いEARの閾値を確認することで、最適なEAR閾値を特定する。被験者は成人男性3名、成人女性2の計5名（年齢層は21歳から23歳）に協力してもらった。実験環境の均一性を保つため、被験者にはすべて実験者が用意したノートPCを使用させ、視聴する動画はNetFlixから各自で選択させる形式とした。被験者は男女10名で、各自が同様の条件下で実験を行う。また、フィードバック提示順序による影響を排除するため、提示順序は被験者ごとに異なるように設定する。

4.2.2 フィードバック条件の有効性検証実験の概要

フィードバック条件の有効性検証実験では、異なるフィードバック条件下での瞬目促進効果を調査することを目的とし、被験者に動画視聴を行わせながら各種フィードバックの影響を確認した。被験者は成人男性8名、成人女性2の計10名（年齢層は21歳から53歳）、全員が同じ条件下で実験を実施した。フィードバックは画面のフラッシュ、画面にアニメーションGIFの表示、音声による通知、スマートウォッチでの振動とアニメーションGIFの表示の4つにフィードバックなしを加えた5種類である。動画視聴時間は30分間とし、6分ごとにフィードバックを切り替える設定とした。フィードバックの提示順序による影響を排除するため、提示順序は被験者ごとに異なるようにランダム化した。また、被験者は動画視聴中に一切の操作を必要とせず、フィードバックの切り替えはすべて自動で行われるよう設計した。視聴する動画および視聴環境は瞬目検出条件の最適化実験と同様に、被験者自身がNetFlixから選択する形式とし、実験者が用意したノートPCを使用させた。

4.3 実験手順

4.3.1 瞬目検出条件の最適化実験

瞬目検出条件の最適化実験では、システムによる瞬目検出精度を評価する。実験は以下の手順で行う。

1. 被験者の動画撮影を開始する。
2. PCでアプリを起動する。
3. 動画を10分間視聴する。

4. データを保存する.

以下に実験手順のフロー図を図 4-1 示す.



図 4-1: 瞬目検出条件の最適化実験の手順を示すフロー図

4.3.2 フィードバック条件の有効性検証実験

フィードバック条件の有効性検証実験は次のような手順で実施する.

1. PC で動画選択後, アプリを起動する.
2. 被験者のスマートウォッチを装着してもらい, スマートウォッチのフィードバックアプリを起動する.
3. 被験者にアプリのウィンドウで「s」を入力してもらい, 計測を開始する.
4. 被験者に動画を全画面で 30 分視聴する.
5. 30 分経過後, アプリのウィンドウで「f」を入力してもらい, データを保存する.
6. アンケートの記入を行う.

以下に実験手順のフロー図を図 4-2 に示す.

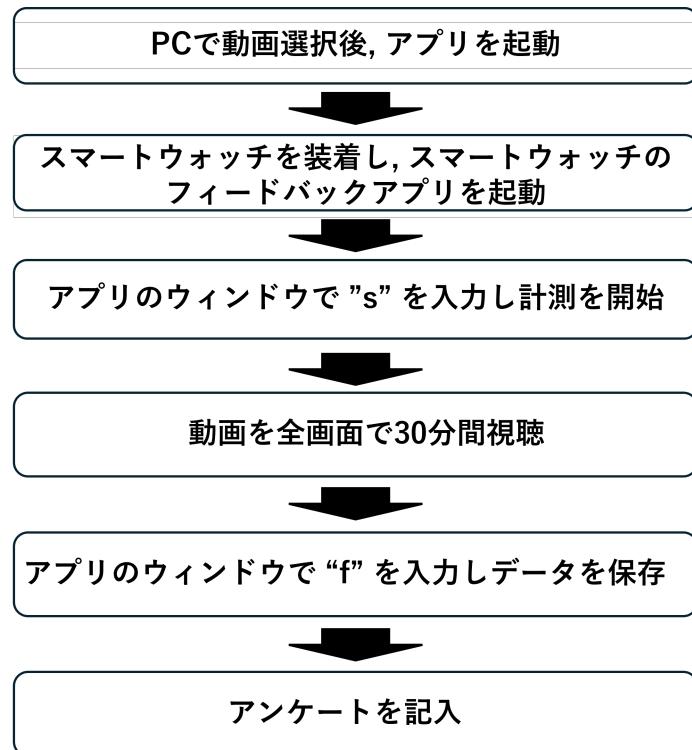


図 4-2: フィードバック条件の有効性検証実験の手順を示すフロー図

フィードバック条件の有効性検証実験では、被験者には瞬目が少なくなった時にフィードバックがある旨の説明のみを行うが、直接的にフィードバックに反応するよう指示はしない。瞬目検出条件の最適化実験の目的については説明を省略し、被験者自身が行動変容を促し、瞬目が増えるかどうかを検証する。実験の様子を以下の図 4-3 に示す。

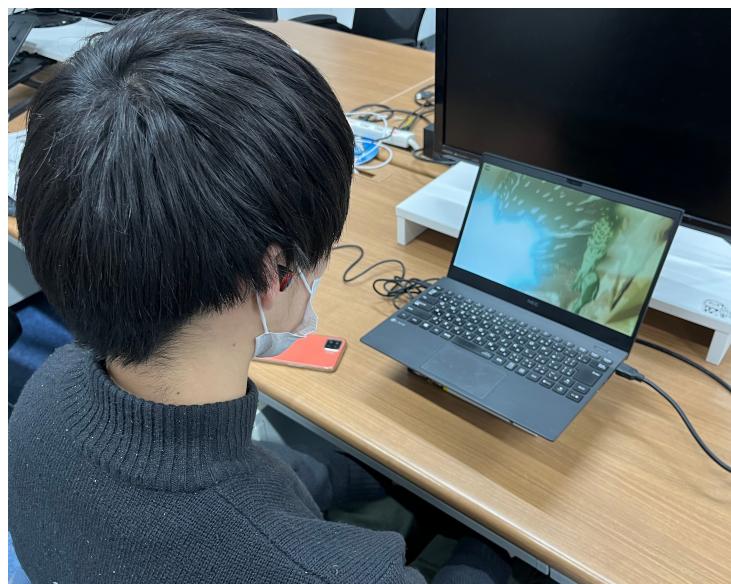


図 4-3: フィードバック条件の有効性検証実験の様子

4.4 データ分析方法

本研究では、各フィードバック条件における瞬目回数の違いを統計的に検証するためには、分散分析（ANOVA）および事後検定として Tukey の多重比較検定を用いた。

分散分析（Analysis of Variance, ANOVA）は、複数の群間で観測されたデータの平均値に有意差が存在するかを評価するための手法である [24]。この手法は、群内分散と群間分散を比較することにより、各条件間の差異が統計的に意味のあるものであるかを検証するために用いられる。本研究では、瞬目回数の分散分析を実施し、フィードバック条件間で有意な差が存在するかどうかを検証した。

さらに、有意差が確認された場合には、Tukey の多重比較検定を実施し、どの条件間で有意な差が存在するかを特定した。Tukey の多重比較検定は、ANOVA によって条件間に有意差が認められた際に、条件ごとの平均値をペアで比較するための手法である [25]。この手法は、全体の有意水準（FWER）を保ちながら、すべての条件間の差異を評価することを可能にする。本研究では、各条件における瞬目回数の違いを詳細に分析するために、この手法を適用した。

これらの手法を用いることで、瞬目促進システムの各フィードバック条件が瞬目回数に与える影響を明確化し、条件間の差異を定量的に評価した。

4.5 アンケートでの評価方法

アンケートに基づいて各フィードバックが瞬目を促すのに有効であったか、また動画視聴体験を損なわなかったかどうかを尋ねることで、システムの有効性とユーザ体験への影響を総合的に評価する。瞬目検出条件の最適化実験で使用したアンケートの内容を以下の表 4-1 に示す。

表 4-1: 評価実験のアンケート項目

question	
Q1	実験中にメガネまたはコンタクトを着用していましたか？
Q2	ドライアイの治療を受けたことがありますか？
Q3	普段動画を視聴している際に、瞬きが少ないと感じることはありますか？
Q4	フィードバックとして認識できたものを選択してください。
Q5	画面がフラッシュのように光るフィードバックについて、動画視聴の妨げになる・動画に集中できないと感じましたか？
Q6	画面がフラッシュのように光るフィードバックについて、瞬きをしようと思う・瞬きをしてしまうと感じましたか？
Q7	画面に目が瞬きをする GIF が表示されるフィードバックについて、動画視聴の妨げになる・動画に集中できないと感じましたか？
Q8	画面に目が瞬きをする GIF が表示されるフィードバックについて、瞬きをしようと思う・瞬きをしてしまうと感じましたか？
Q9	音が流れるフィードバックについて、動画視聴の妨げになる・動画に集中できないと感じましたか？
Q10	音が流れるフィードバックについて、瞬きをしようと思う・瞬きをしてしまうと感じましたか？
Q11	スマートウォッチが振動して GIF が表示されるフィードバックについて、動画視聴の妨げになる・動画に集中できないと感じましたか？
Q12	スマートウォッチが振動して GIF が表示されるフィードバックについて、瞬きをしようと思う・瞬きをしてしまうと感じましたか？
Q13	実験で一番印象に残ったフィードバックがあれば教えてください。 (自由記述)

第5章 実験結果及び考察

5.1 瞬目検出条件の最適化実験の結果

瞬目検出条件の最適化実験の結果を以下に示す。閾値設定の違いにより、瞬目検出結果は大きく変化することが明らかになった。連続フレーム数を2とした場合の被験者1の結果を図5-1に示す。

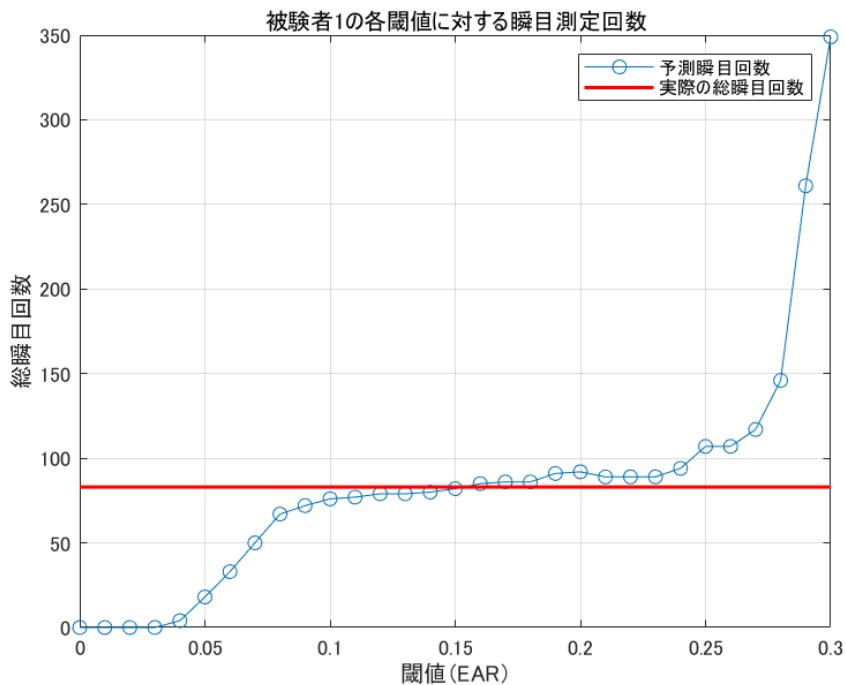


図5-1: 連続フレーム数2における閾値ごとの瞬目検出精度

被験者1の結果としては、EARが0.15のとき実際の値に一番近く瞬目を検出できることが分かった。また、0.15前後を閾値に設定した場合には比較的安定して瞬目を検出できていることが確認できる。

1フレーム、2フレーム、3フレームそれぞれの結果を図5-1、図5-2、図5-3に示す。それぞれ実際の総瞬目回数と一番近い値に色を付けている。

表 5-1: 連続フレーム数 1 における実測瞬目回数と EAR 閾値別検出回数の比較

閾値 (EAR)	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5
0.05	43	0	0	4	67
0.06	69	0	1	16	125
0.07	80	0	3	56	175
0.08	86	0	5	148	209
0.09	87	1	6	231	230
0.10	88	1	14	321	239
0.11	87	7	23	353	252
0.12	87	16	36	373	256
0.13	87	28	44	388	267
0.14	90	38	48	392	268
0.15	89	48	56	390	275
0.16	90	67	66	400	290
0.17	91	77	100	401	291
0.18	92	91	161	406	289
0.19	95	113	338	428	286
0.20	93	121	566	504	303
0.21	90	153	541	612	324
0.22	92	168	306	737	328
0.23	96	289	236	895	329
0.24	108	431	239	659	317
0.25	117	585	241	535	342
実際の総瞬目回数	83	66	144	387	239

表 5-2: 連続フレーム数 2 における実測瞬目回数と EAR 閾値別検出回数の比較

閾値 (EAR)	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5
0.05	18	0	0	1	29
0.06	33	0	0	3	66
0.07	50	0	2	23	108
0.08	67	0	4	75	127
0.09	72	0	4	155	147
0.10	76	0	6	235	171
0.11	77	5	10	303	185
0.12	79	11	19	341	198
0.13	79	17	27	360	211
0.14	80	26	31	375	220
0.15	82	33	37	383	235
0.16	85	40	44	387	247
0.17	86	59	60	386	257
0.18	86	65	86	391	264
0.19	91	79	160	395	262
0.20	92	85	298	422	271
0.21	89	100	364	468	280
0.22	89	120	254	523	282
0.23	89	161	200	557	290
0.24	94	251	214	435	291
0.25	107	314	220	354	288
実際の総瞬目回数	83	66	144	387	239

表 5-3: 連続フレーム数 3 における実測瞬目回数と EAR 閾値別検出回数の比較

閾値 (EAR)	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5
0.05	4	0	0	0	6
0.06	8	0	0	1	26
0.07	11	0	0	7	37
0.08	22	0	1	23	53
0.09	30	0	2	72	63
0.10	38	0	2	133	78
0.11	46	1	4	191	89
0.12	47	3	6	256	107
0.13	54	10	10	292	115
0.14	61	18	14	320	135
0.15	63	26	16	341	152
0.16	69	29	21	356	163
0.17	71	37	32	372	176
0.18	73	51	48	376	192
0.19	77	59	88	383	207
0.20	82	71	197	405	217
0.21	84	76	276	429	235
0.22	85	101	208	463	248
0.23	86	115	169	471	262
0.24	91	174	183	379	272
0.25	101	229	197	288	275
実際の総瞬目回数	83	66	144	387	239

各フレーム条件における検出結果を分析したところ、特定の EAR 値（例：0.13～0.17）で高い精度が得られることが分かった。1 フレーム条件では、被験者によって最適な EAR 閾値にはばらつきがあり、全体的に安定性に欠けると考えられる。一方、2 フレーム条件では EAR 値 0.17 付近が多くの中の被験者で最適値となり、全体的にバランスの取れた結果を示した。このため、実験条件として適用する上で有効であると考えられる。

3 フレーム条件では、EAR 値 0.20 付近で比較的安定した検出が可能であるものの、被験者ごとの検出精度にはばらつきが見られた。特に、被験者 3 では最も近い値でも 50 近くの誤検出が生じており、全体的に過検出が多い傾向にあることが確認された。瞬目が過検出されると、フィードバックの効果検証が正確に行えない可能性があるため、今回の実験において 3 フレーム条件は適していないと判断される。

2 フレーム条件は全体的に最も安定した結果を示し、実験条件として適用しやすいと考えられる。一方、被験者によって最適な EAR の値にはばらつきがあり、被験者ごとの個別調整によってさらに精度を高める可能性が示唆された。このため、瞬目検出条件の最適化実験では事前に1分程度を用いて、個別に最適な EAR 閾値を設定する時間を設けることとする。

図 5-2 に、EAR が 0.05 から 0.25 における連続フレーム数 2 の条件で得られた精度比較を示す。このグラフは、被験者ごとの EAR 閾値における検出精度の分布を視覚的に示しており、2 フレーム条件が他の条件と比較して最もバランスの取れた結果を示していることを確認できる。

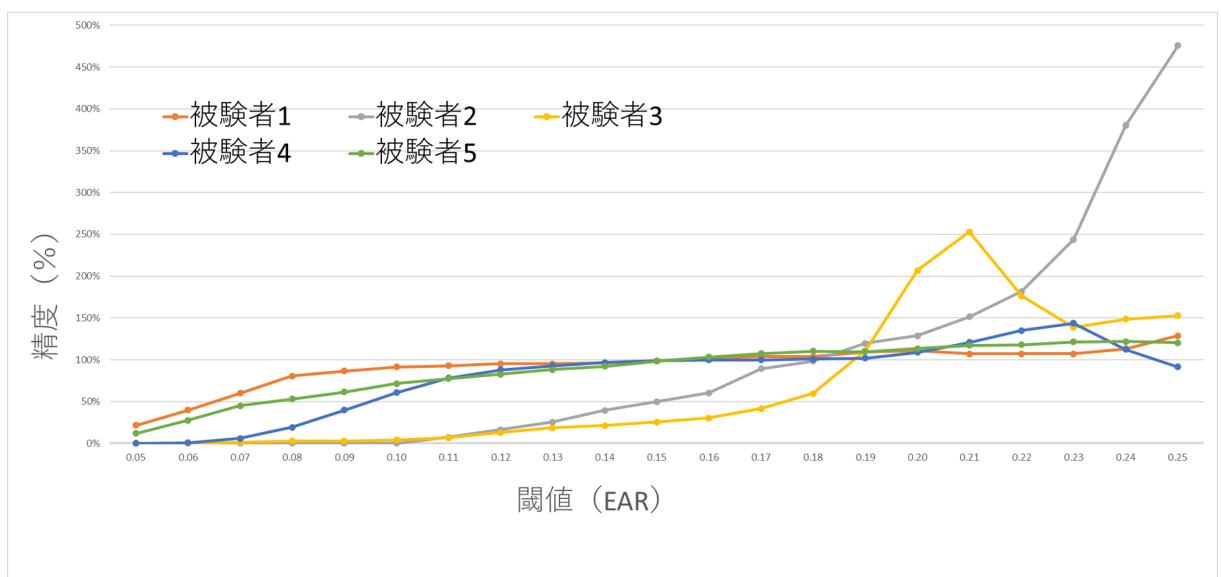


図 5-2: 連続フレーム数 2 における閾値ごとの瞬目検出精度

5.2 フィードバック条件の有効性検証実験の結果

フィードバック条件の有効性検証実験の結果を以下に示す。10人の被験者ごとに各フィードバックにおける10秒間の瞬目回数の平均を算出し、さらに各被験者の平均から全体の平均を算出した。結果を以下の図5-3に示す。各条件の平均値を比較するために、誤差バーとして標準誤差を付加した。これにより、平均値の信頼性を視覚的に示すことが可能となった。平均回数を比較すると、フィードバックなしよりも各フィードバックの方が瞬目回数が多いことがわかった。また、GIF表示、短音通知、スマートウォッチによるフィードバックの3条件については、通常時の瞬目回数である「10秒間に3回」という基準回数を上回る結果となった。

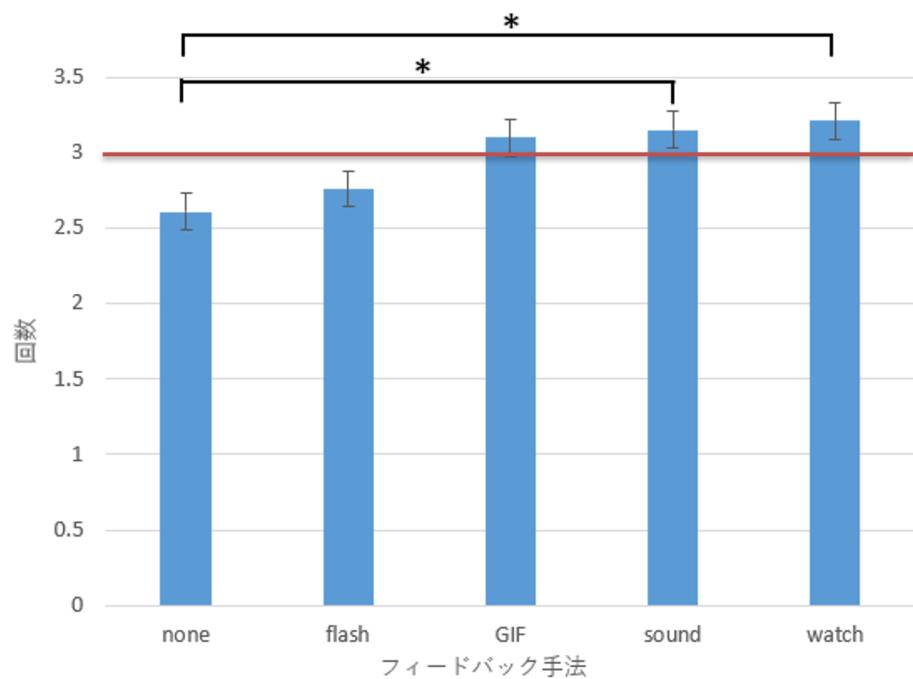


図5-3: 各フィードバックにおける10秒の平均瞬目回数

* : $p < 0.05$

6分間における10秒間の瞬目平均回数について、条件間の有意差を検討するために分散分析(ANOVA)を実施した。統計解析にはPython(scipyおよびstatsmodelsライブラリ)を使用した。分散分析(ANOVA)の結果、フィードバック条件間で統計的に有意な差が認められた($F(4, 45) = 4.05, p=0.0028$)。

ANOVAで有意差が認められたため、どの条件間で差があるのかを明確にするために、Tukeyの多重比較検定を実施した。結果として、以下の条件間で有意な差が認められた。

- ・フィードバックなし(none)と音声フィードバック(sound)条件(平均差=0.54, $p=0.030$)
- ・フィードバックなし(none)と視覚フィードバック(watch)条件(平均差=0.60, $p=0.011$)

一方，その他の条件間では有意差は認められなかった。Tukey の多重比較検定の結果をまとめて表 5-4 に示す。

表 5-4: Tukey の多重比較検定による各フィードバック間の有意差

比較条件 (Group1)	比較条件 (Group 2)	平均差	p 値	信頼区間 (Lower, Upper)	有意差
none	flash	0.1500	0.9290	(-0.3584, 0.6584)	FALSE
none	GIF	0.4889	0.0662	(-0.0196, 0.9973)	FALSE
none	sound	0.5417	0.0301	(0.0332, 1.0501)	TRUE
none	watch	0.6000	0.0113	(0.0916, 1.1084)	TRUE
flash	GIF	0.3389	0.3622	(-0.1696, 0.8473)	FALSE
flash	sound	0.3917	0.2189	(-0.1168, 0.9001)	FALSE
flash	watch	0.4500	0.1113	(-0.0584, 0.9584)	FALSE
GIF	sound	0.0528	0.9986	(-0.4557, 0.5612)	FALSE
GIF	watch	0.1111	0.9756	(-0.3973, 0.6196)	FALSE
sound	watch	0.0583	0.9979	(-0.4501, 0.5668)	FALSE

次に，被験者ごとにフィードバック条件が瞬目回数に与える影響を検討するために，各被験者に対して先ほどと同様に分散分析 (AVONA) および Tukey の多重比較検定を行った。その結果，10 名中 7 名の被験者において統計的に有意な差が認められた ($p < 0.05$)。表 5-5 に，各被験者の結果を示す。

表 5-5: Tukey の多重比較検定による被験者間の有意差

被験者	F 値	p 値	有意差
1	1.60	0.1773	FALSE
2	3.48	0.0091	TRUE
3	4.76	0.0011	TRUE
4	10.03	< 0.0001	TRUE
5	15.69	< 0.0001	TRUE
6	2.96	0.0213	TRUE
7	3.78	0.0056	TRUE
8	0.55	0.6981	FALSE
9	2.49	0.0448	TRUE
10	8.41	< 0.0001	TRUE

被験者 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 では、フィードバック条件による瞬目回数の有意な違いが認められた（それぞれの p 値は 0.05 未満）。特に、被験者 4 と被験者 5 においては、F 値がそれぞれ 10.03 および 15.69 と非常に高く、フィードバック条件間の違いが顕著であることが示唆された。一方、被験者 1, 8, 9 では有意差が認められず ($p > 0.05$)、フィードバック条件が瞬目回数に与える影響は小さいか、明確ではないことが示唆された。

さらに、有意差が認められた被験者について、どの条件間で有意な差があるかを特定するため Tukey の多重比較検定を実施した。有意差が認められた条件間を抽出したものを表??に示す。

被験者 2 では、フィードバックなし (none) と音声フィードバック (sound) 条件間で有意な差が認められた ($p=0.0046$)。被験者 3 では、フラッシュフィードバック (flash) と音声フィードバック (sound)、および音声フィードバック (sound) と視覚フィードバック

表 5-6: Tukey の多重比較検定による有意差が認められた条件間の比較結果

被験者	条件 1	条件 2	平均差	p 値	有意差
2	none	sound	-1.00	0.0046	TRUE
3	flash	sound	1.47	0.0034	TRUE
3	sound	watch	-1.39	0.0069	TRUE
4	GIF	sound	-0.78	0.0070	TRUE
4	none	sound	-1.36	< 0.001	TRUE
4	flash	sound	-1.03	< 0.001	TRUE
4	sound	watch	1.00	< 0.001	TRUE
5	none	GIF	-2.72	< 0.001	TRUE
5	none	sound	-3.11	< 0.001	TRUE
5	none	watch	-2.39	< 0.001	TRUE
5	flash	GIF	-2.39	< 0.001	TRUE
5	flash	sound	-2.78	< 0.001	TRUE
5	flash	watch	-2.06	< 0.001	TRUE
6	none	GIF	1.63	0.0109	TRUE
7	flash	watch	-1.50	0.0403	TRUE
7	sound	watch	-1.53	0.0348	TRUE
10	none	GIF	-2.14	< 0.001	TRUE
10	none	sound	-1.78	< 0.001	TRUE
10	none	watch	-1.69	< 0.001	TRUE

(watch) の間で有意な差が確認された ($p=0.0034$, $p=0.0069$). 被験者 4 では, GIF フィードバック (GIF) と音声フィードバック (sound), およびフィードバックなし (none) と音声フィードバック (sound) で有意な差が認められた ($p=0.007$, $p < 0.001$). 被験者 5 では, GIF フィードバック (GIF) とフィードバックなし (none), フラッシュフィードバック (flash) と音声フィードバック (sound) など複数の条件間で有意な差が確認された ($p < 0.001$). これらの結果から, フィードバック条件が瞬目回数に与える影響は被験者間で異なるものの, 多くの場合で特定の条件間において有意な差が生じることが示された.

5.3 アンケート結果

本研究では, 瞬目促進システムのフィードバックが動画視聴体験および瞬目行動に与える影響を評価するため, 被験者 10 名を対象にアンケート調査を実施した. その結果, 以下の知見が得られた.

被験者の 30 %がメガネまたはコンタクトを着用し, 10 %がドライアイ治療経験を有していた. また, 70 %が普段動画視聴中に瞬目が少ないと感じると回答した. これにより, 被験者の中に瞬目不足やドライアイに関心を持つ人が一定数いることが示された.

フィードバックの認識度では, スマートウォッチの振動が全被験者に認識され, GIF は 80 %, 音とフラッシュは 60 %の認識度にとどまった. 特に優位差が確認された音のフィードバックは認識されないと効果がないため, 改善の必要性が示された.

視聴体験への影響では, フラッシュが「妨げになる」と回答した人が 57 %と最多で, GIF は 33 %, スマートウォッチは 40 %, 音は 50 %が「妨げになる」と回答した. この結果, GIF が最も動画視聴体験への影響が少ないと感じられていることがわかった.

瞬目促進効果については, GIF が最も高く 66.7 %が「促される」と回答し, フラッシュと音が 50 %, スマートウォッチは 40 %にとどまった. また, 「フラッシュは字幕が読みにくくなる」といった課題が指摘された一方, GIF は「目立つが不快ではない」と評価され, スマートウォッチは視聴体験への影響が少ないとの意見が多かった.

5.4 考察

本研究では, 動画視聴中の瞬目を促進するためのフィードバックシステムを提案し, その効果を評価した. データ分析およびアンケート調査の結果を踏まえ, 以下の考察が得られた.

まず, 瞬目促進効果について, データ分析では音声フィードバックとスマートウォッチによる触覚フィードバックが瞬目回数を有意に増加させることができた. 一方で, 視覚的フィードバック (GIF およびフラッシュ) については有意な差が認められなかつたが,

GIFが瞬目促進において一定の効果を示した。これらの結果は、視覚的フィードバックが瞬目促進に寄与する可能性を示す一方で、音声や触覚のフィードバックがより強い瞬目促進効果を持つことを示唆している。

アンケート結果では、スマートウォッチの振動は全ての被験者に認識され、視聴体験への影響がGIFに次いで少ないと評価を受けた。一方で、音のフィードバックは認識率が60%と低く、視聴体験において50%が「妨げになる」と回答したことから、認識率の向上および視聴体験への配慮が必要であることが示唆された。また、視覚的フィードバックについては、フラッシュが「動画視聴の妨げになる」と回答した被験者が57%と最も多かったが、GIFについては「目立つが不快ではない」との意見が多く、視聴体験を損ねない設計の可能性を示している。

さらに、アンケート自由記述からは、視覚的フィードバックが瞬目を促す効果を持つ一方で、「フラッシュの光が動画の字幕を読みにくくする」といった負の影響も指摘された。これに対し、GIFは視覚的に目立つが不快感が少なく、動画視聴体験を損ねにくい特性を有していることが確認された。また、被験者の自由記述から、フィードバックの強さやタイミングが視聴体験に大きく影響を与える可能性が示唆された。

最後に、瞬目促進効果の個人差については、被験者間で有意差の有無やフィードバック認識度にばらつきが見られたことから、個別調整が効果的であることが明らかとなった。例えば、事前にEAR閾値やフィードバックの種類を調整することで、より効果的な瞬目促進が可能になると考えられる。

これらの考察を踏まえ、今後の課題として、(1) フィードバックの認識度を向上させる工夫、(2) 視聴体験を損ねない設計のさらなる改善、(3) 個別最適化による瞬目促進効果の強化が挙げられる。本研究は、瞬目促進システムの可能性を示す一方で、改善の余地があることも明確にした。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では、動画視聴中における瞬目不足による健康問題の軽減を目的として、視覚、聴覚、触覚を活用した4種類のフィードバックを提示する瞬目促進システムを提案し、その効果を評価した。瞬目検出にはEAR（Eye Aspect Ratio）を用い、個別に閾値を調整することで、各被験者に適した瞬目検出が可能であることを確認した。

実験の結果、音声およびスマートウォッチの振動が瞬目回数を有意に増加させ、視聴体験を大きく損ねない効果的なフィードバックであることが示された。一方、視覚的フィードバック（フラッシュおよびGIF）については瞬目促進効果が認められたものの、一部で視聴体験を妨げると評価され、特にフラッシュに関しては改善の余地があることが分かった。

また、アンケート調査では、GIFが視覚的に目立つが不快感は少ないという肯定的な意見が多く得られた一方、音やフラッシュの認識率が低い場合もあることが確認された。さらに、瞬目促進効果やフィードバック認識度には個人差が大きいことが示され、個別調整の重要性が示唆された。

以上の結果から、本研究は瞬目促進システムの有効性と課題を明らかにし、瞬目不足の軽減に向けた重要な知見を提供した。

6.2 今後の展望

本研究の成果を踏まえ、以下の課題と今後の展望を示す。

フィードバックの改良

フィードバックの認識率を向上させ、視聴体験を損ねない設計が求められる。特に、フラッシュによる視覚的負担を軽減するための工夫や、音声フィードバックの認識率向上に向けた改善が必要である。

個別調整の強化

被験者ごとの瞬目促進効果やフィードバック認識度には個人差が大きいため、事前に適切な閾値やフィードバックの種類を調整するシステムの自動化が期待される。

自然な条件下での評価

本研究では事前説明が瞬目意識に影響を与えた可能性があるため、より自然な状況で瞬目促進効果を評価できる実験設計が求められる。これにより、システムの実際の使用シーンにおける有効性をより正確に検証できる。

長期的な影響の評価

今回の実験は短期間で実施されましたが、長期的な使用が瞬目促進や眼精疲労軽減に与える影響を評価することが必要である。これにより、システムの持続的な効果を確認できる。

モバイルデバイスへの対応

スマートフォンやタブレットなどのモバイルデバイスに対応することで、利用シーンが広がると考えられる。特に、ソファでくつろぐようなだらけた姿勢でも瞬目検知を可能にすることで、より幅広い動画視聴環境への適応が期待される。また、スマートフォンで動画を視聴する人が多い現状において、これらのデバイスへの対応が重要である。

本研究は瞬目促進システムの可能性を示すとともに、さらなる改善のための方向性を示した。これらの課題に取り組むことで、より快適で健康的な動画視聴体験の提供に貢献できると考えられる。

謝辞

本研究を進めるうえで、丁寧なご指導を頂きました青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科ロペズ・ギヨーム教授に深く感謝をいたします。研究目標を達成するだけでなく、高い意欲を継続して研究に取り組むことができたのは、先生の温かく丁寧なご指導のおかげです。また、研究環境の補助をしてくださった大熊氏、システム開発にご意見をくださった高山先輩をはじめとするロペズ研究室の皆様、同期の方々、評価実験にご協力いただいた皆様に心よりお礼申し上げます。

2025年1月27日
新村温人

参考文献

- [1] 総務省：令和6年版 情報通信白書 データ集(2022). <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/datashu.html#f00263>.
- [2] 厚生労働省：平成20年技術革新と労働に関する実態調査結果の概況(2008). <https://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/saigai/anzen/08/02.html>.
- [3] 第一三共ヘルスケア株式会社：テレワークによる体の不調「テレワーク不調」に関する調査(2022). <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/datashu.html#f00263>.
- [4] 坪田一男：涙のチカラ 涙は7マイクロリットルの海, 株式会社技術評論社(2008). (参照日 2025/1/17).
- [5] ウエルビーアイクリニック駒沢公園：デジタル時代における眼精疲労(Digital Eye Strain, DES) (2025). <https://wbcck.tokyo/archives/1353>.
- [6] ドライアイ研究会：ドライアイとは. <https://dryeye.ne.jp/for-general/dryeye-summary/>.
- [7] 東覚瑠菜, 神場知成：ドライアイ軽減のためのまばたきリマインド機能の開発と評価, 情報処理学会 インタラクション 2024 論文集, pp. 556–561 (2024).
- [8] 大石太郎, 戸田健, 高橋謙介, 劉欣欣：VDT画面を曇らせることによるVDT利用者瞬き促進システムの試作と評価, 電気学会研究会資料. PI= The papers of Technical Meeting on "Perception Information", IEE Japan,/知覚情報研究会 [編], Vol. 2014, No. 56-80 · 82-93, 電気学会, pp. 21–23 (2014).
- [9] 伊藤奈々, 武田朴, 笠井亮佑, 上條史記, 加納敬, 島峰徹也, 萩野稔, 日向奈惠, 篠原一彦, 田仲浩平：VDT作業における眼精疲労度の比較—スマートグラスとLCDおよび印刷物の比較—, 医療機器学, Vol. 90, No. 5, pp. 405–413 (2020).

- [10] Soukupová, T.: Eye-Blink Detection Using Facial Landmarks, Master's thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering (2016). Available at <ftp://cmp.felk.cvut.cz/pub/cmp/articles/cech/Soukupova-TR-2016-05.pdf>.
- [11] Maekawa, T. and Inui, T.: 瞬目の模倣が他者の印象に与える影響, 認知心理学研究, Vol. 16, No. 2, pp. 15–24 (2019).
- [12] 山田富美雄, 宮田洋: ヒトの驚愕性瞬目反射における先行刺激効果, 心理学研究, Vol. 49, No. 6, pp. 349–356 (1979).
- [13] 山田富美雄: 驚愕プローブパラダイムによる感情研究, 日本生理人類学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 45–56 (2023).
- [14] Rushworth, G.: Observations on blink reflexes, *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, Vol. 25, No. 2, p. 93 (1962).
- [15] Bin Maneea, M. W., Alamawi, H. O., Almuqbil, A., Abukhlaled, J. K., Alsusailem, G., Alabdulminaim, J., Aladawi, A. M. M. and Alshangiti, A. Y.: Digital Eye Straining: Exploring Its Prevalence, Associated Factors, and Effects on the Quality of Life, *Cureus*, Vol. 16, No. 5, p. e59442 (online), <https://doi.org/10.7759/cureus.59442> (2024).
- [16] Kaur, K., Gurnani, B., Nayak, S., Deori, N., Kaur, S., Jethani, J., Singh, D., Agarkar, S., Hussaindeen, J. R., Sukhija, J. and Mishra, D.: Digital Eye Strain- A Comprehensive Review, *Ophthalmology and Therapy*, Vol. 11, No. 3, pp. 1655–1680 (online), <https://doi.org/10.1007/s40123-022-00466-5> (2022).
- [17] Pavel, I. A., Bogdanici, C. M., Donica, V. C., Anton, N., Savu, B., Chiriac, C. P., Pavel, C. D. and Salavastru, S. C.: Computer Vision Syndrome: An Ophthalmic Pathology of the Modern Era, *Medicina*, Vol. 59, No. 2, p. 412 (online), <https://doi.org/10.3390/medicina59020412> (2023).
- [18] Wickens, C. D.: Multiple resources and performance prediction, *Theoretical issues in ergonomics science*, Vol. 3, No. 2, pp. 159–177 (2002).
- [19] 岡村友俊: 感覚統合における視・聴・触覚の重要度, 日本感性工学会論文誌, Vol. 11, No. 3, pp. 503–507 (2012).
- [20] Xu, S. and Zhang, X.: Oculomotor trajectory mapping on body as an effective intervention to enhance attention, *arXiv preprint*, Vol. 2307.15172v2 (online), <https://arxiv.org/abs/2307.15172> (2023).

- [21] NECLAVIE 公式サイト：仕様 LAVIE Direct PM(X) [Pro Mobile] - 13.3 型モバイルパソコン. <https://lenovo-nec.jp/navigate/products/pc/193q/10/lavie/pmx/spec/index.html>.
- [22] au: Google Pixel Watch. <https://www.au.com/mobile/product/plus-one/pixelwatch/>.
- [23] for Developers, G. A.: MediaPipe ソリューションガイド (2025). <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=ja>.
- [24] Fisher, R.: *Statistical Methods for Research Workers*, Biological monographs and manuals, Oliver and Boyd (1925).
- [25] Tukey, J. W.: Comparing individual means in the analysis of variance, *Biometrics*, pp. 99–114 (1949).

質疑応答

戸辺 義人 情報テクノロジー学科 教授

Q	本当に面白い動画なら GIF に気づかないかもしれないと思うのですが、どのように考えていますか？
A	実際に動画に集中して GIF に気付いていない被験者もいましたが、実験結果としては GIF の認識率は 80 % であり、他のフィードバックと比較すると高い認識率でした。今回 GIF の表示は画面の上部であるため、今後は認識率を上げるような表示方法を検討しています。

戸辺 義人 情報テクノロジー学科 教授

Q	どのようなルールでフィードバックを生成していますか？
A	本研究では、10秒ごとにフィードバックを提示するかの判定を行い、「10秒間で瞬目回数が3回以下」という条件を満たした場合にフィードバックを提示しています。

伊藤 雄一 情報テクノロジー学科 教授

Q	実験前の指示の際、瞬目を刺激することを説明しましたか？
A	今回の実験では、事前説明として「瞬目の回数が少ないときに何らかのフィードバックがあります。」との旨を伝えています。デバイスの使用中は瞬目が少なくなるため、瞬目を意識して行うことが健康的な動画視聴態度に繋がります。したがって、瞬目を多少意識してしまうことは問題ないと判断し、事前説明を加えました。

伊藤 雄一 情報テクノロジー学科 助教授

Q	まずどんなフィードバック刺激が瞬目を起こすという基礎実験した方が良いのではないですか？
A	本研究では瞬目を多少意識してしまうことは問題ないと判断したため、基礎実験は行わずに事前説明を加えて実験を行いました。今後はフィードバック刺激が直接瞬目に影響するかを考慮したフィードバック手法の開発も検討しています。