適切な瞬目タイミングを考慮した反射性瞬目誘発システム

内海壮一朗[1] 大西鮎美[1] 寺田 努[1] 塚本昌彦[1]

概要：集中時等における瞬目の減少は，ドライアイをはじめとする様々な疾患を引き起こす原因となる．瞬目を促す手法については数多くの研究が行われてきた．しかし，視覚情報の変化が激しい状況で瞬目を促すと，瞬目によって視界が遮られた瞬間に重要な情報を見逃してしまう恐れがある．そこで本研究では，瞬目によって視界が遮断されても問題のないタイミングで反射性瞬目を誘発することで，ユーザのタスクに支障をきたさないように瞬目を増加させるシステムを提案する．本論文ではまず，簡単なコンピュータゲームのプレイ中にゲーム画面を遮断することで，適切な瞬目タイミングを調査する実験を行った．その結果，不適切な瞬目タイミングの存在とゲーム中における適切な瞬目タイミングの個人差が確認された．次に，空気を目に向けて吐出するデバイスを実装し，ゲーム中にシステムを使用した際の反射性瞬目の誘発率と瞬目回数を調査した．瞬目の誘発率は 21.4%と低かったが，瞬目回数は無刺激と比較して増加した．

1. はじめに

瞬目は目の健康を維持するために重要な役割を果たしている．例えば，目を瞬かせることで角膜を涙で充填させ乾燥を防止する．また，涙に含まれた酸素や養分，リゾチームなどを角膜に運ぶといったも役割もある．しかし，コンピュータやテレビなどの VDT の凝視時 [1] や，車の運転中 [2]，オーケストラの合奏中 [3] といった状況下では，高い集中力を要するため，瞬目が減少してしまう．瞬目の減少は，ドライアイや充血，微生物の侵入および感染などを引き起こす原因となる [4]．特にドライアイは，日本国内において約 2000 万人，世界に 10 億人以上の患者が存在すると推測されており [5], [6]，予防や改善を行うことが重要である．しかし，瞬目は集中することで無意識のうちに減ってしまうものであり，意識して増やすことは困難である．

瞬目を促す手法はこれまで数多く研究されてきた．例えば，VDT 作業中に LED の点滅 [14] やコンピュータ画面のぼかし [15]，アニメーションの表示 [16] を行うことで瞬目を促す手法が提案されている．近年では，睫毛に向けて空気を吐出することで反射性瞬目を誘発するウェアラブルデバイスが提案されており [18]，VDT 作業のみならず様々な状況で瞬目を促すことが可能になりつつある．

しかし，瞬目の促進にはデメリットが伴うことがある．瞬目が減少するのは，視覚情報の変化が激しく注意を要する状況であることが多い [7]．そのような状況で，瞬目によって視界が遮断されると，重要な情報を見逃してしまう可能性がある．瞬目による視界遮断は 100–150 ms ほど継続し [8]，この間は視覚情報を得ることができない．したがって，視界が遮断されても問題のないタイミングでユーザに瞬目を促すシステムが求められるが，従来の瞬目促進に関する研究ではそのような視界遮断の影響を考慮できていない．

本論文では，視界が遮断されても問題のないタイミングで反射性瞬目を誘発するシステムを提案する．これにより，視覚情報が激しく変化する状況でも，情報を見逃すことなく瞬目を誘発させることが期待できる．提案システムは状況認識機能，瞬目検知機能および瞬目誘発機能を有する．まず，瞬目検知機能によってユーザの瞬目回数の減少を検出する．次に，状況認識機能によって，ユーザの瞬目を促しても問題がないタイミングを検出する．そして，瞬目誘発機能がユーザの瞬目を誘発する．本論文では，以上の提案システムの機能を実現するために，まずユーザに適した瞬目のタイミングを定めるための調査を行う．適切な瞬目タイミングの調査では，瞬目が減少するゲーム中を想定した．複数の視界遮断タイミングの条件を設定し，ゲームスコアへの影響を比較する．

本論文では以降，2 章で関連研究を紹介し，3 章で提案システムについて述べる．4 章で適切な瞬目タイミングの調査について述べ，5 章で提案システムの評価を行い，最後に 6 章で本論文をまとめる．

2. 関連研究

本章では，瞬目の機能に関する研究，瞬目の検知に関する研究および瞬目の促進に関する研究について述べる．

[1] 神戸大学大学院工学研究科

© 2021 Information Processing Society of Japan

2.1 瞬目の機能

我々は，個人差はあるが平均して 3–4 秒に 1 回ほど瞬目を行っている [9]．瞬目には，涙を角膜全体に充填させつつ涙の排出も同時に行うという機能がある [10]．涙腺から分泌される涙には電解質や多種多様なタンパク質などが含まれおり，中にはペプチドなどの養分や酸素を運搬するタンパク質，殺菌作用をもつリゾチームなどが存在する [11]．角膜には血管が存在しないため，これらが涙によって角膜にに運ばれることで目は健康に保たれる．また，涙が眼表面全体に等しく広げられることで，眼表面は潤い，光学特性は最適な状態となる．このような涙膜の安定性は，一般的には瞬目の 4–5 秒後から低下し始めることが知られている [12]．ドライアイ患者やコンタクトレンズ装用者においてはより早い時間で涙膜が壊れていく．涙膜の安定性はドライアイと密接に関わっており，長時間の瞬目減少はドライアイを引き起こすことがある [13]．

本研究で提案するシステムでは，ドライアイを緩和するために瞬目を誘発する．十分に瞬目を行えている際に過度に瞬目を誘発しないよう，瞬目の検知を行う．

2.2 瞬目の検知

瞬目を検知するセンサを組み込んだウェアラブルデバイスは数多く存在し，その多くはカメラと画像処理を利用している．赤外センサを用いた瞬目検知も行われており，有名な例として Google Glasses がある [19]． Dementyev らも同様に赤外 LED とフォトトランジスタを搭載した反射型フォトリフレクタを用いて瞬目の検知を行っており，ユーザの瞬目のうち 85.2%を検知することができている [18]．また，眼電位 (EOG) センサによる瞬目や眼球運動の検知も行われており [20]，JINS MEME にはこの手法が用いられている [21]．Pal らは，SVM とウェーブレット変換を用いた EOG データの解析を行うことで，95.83%の精度で瞬目を識別した [22]．EOG センサは瞬目以外の眼球運動を検出する際には有用であるが，接触型であり汗やセンサの位置ずれの影響を受けやすい．最近では，Mandelcorn らが導電性のアイテープを瞼の折り目に挟むことで，82.6%の精度で瞬目を検知した [23]．これは美容を重要視する場合に有用である．

本研究では，瞬目を検知するために反射型フォトリフレクタを使用する．フォトリフレクタは消費電力が小さく軽量であるため，長時間使用やウェアラブルセンシングを行う上で優れている．ただし，赤外線を放出するため，目に対して長時間フォトリフレクタを使用する際は，レーザ安全規格の IEC 60825–1 に準拠し安全性に配慮すべきである [24]．

2.3 瞬目の促進

瞬目を促す手法に関する研究は，近年盛んに行われている．Miura らは，コンピュータのモニタ上部に配置された LED を 4 秒の一定の周期で光らせることで瞬目を促した [14]．このシステムは LED が光るたびにがユーザの瞬目を促すよう設計されており，瞬目の増加に成功した．しかし，4 秒に 1 回という周期的な瞬目の促進は，もともと瞬目の周期が一定でないためユーザが不自然に感じる問題点がある．Crnovrsanin らは，4 秒から 8 秒のランダム周期でユーザにモニタを通して視覚刺激を与えた [15]．視覚刺激には画面のフラッシュ，画面のぼかし，ウィンドウの境界の点滅，ポップアップ通知の 4 種類が用いられた．画面のぼかしとポップアップ通知は，ユーザが瞬目を行うまで消えないように設計された．この実験では画面のぼかしが最も効果的であったが，瞬目を行わないと作業ができないという欠点がある．Nosch らは，被験者のコンピュータ使用時に，アニメーションが出現するたびに 2 回連続で瞬目を行うというタスクを 1 週間与えた [16]．アニメーションの出現頻度は被験者のコンピュータ使用前の瞬目データに基づいて決定され，コンピュータ使用後に涙液層の安定性を評価した．このシステムを使用することで，涙液層が安定し，被験者のドライアイ症状の緩和に成功した．これらのシステムはユーザが意図的に瞬目を行わなければならず，使用状況が VDT 利用時に限定されている．提案システムでは，運転時やオーケストラの合奏時などを含めた様々な状況下において，ユーザの意図を必要とせずに瞬目を誘発する．

Wink Glasses は，曇るガラスと瞬目検知センサを兼ね備えた市販の眼鏡装着型デバイスである [17]．瞬目を一定時間検知しないと目の前に設置されたガラスが曇り，瞬目を促進する．しかし，このデバイスは，視界を遮ることによってユーザの活動に支障をきたしたり危険が伴ったりする可能性がある．Dementyev らは，光，物理タップ，空気圧によって反射性瞬目を誘発させる眼鏡型デバイス DualBlink を提案した [18]．反射性瞬目は無意識に起こるため，ユーザが進行中の作業に意識を集中させたまま瞬目の促進が行える．評価実験によると，空気圧刺激はユーザの不快感が比較的小さく，反射性瞬目を 62.4%の精度で誘発していた．

本研究では，関連研究をふまえ，的確に瞬目を誘発させるために空気圧刺激を用いる．本研究で提案するシステムは，反射性瞬目を誘発するだけでなく，瞬目に適したタイミングを検出する．

これらの先行研究では，瞬目の検知や誘発は可能だが，視覚遮断が生じても問題のないタイミングについては検討されていない．本研究では，適切なタイミングで反射性瞬目を促進するシステムを実装するために，ゲームのプレイ中を想定して，視覚が遮断されても問題のないタイミングについて調査する．

© 2021 Information Processing Society of Japan

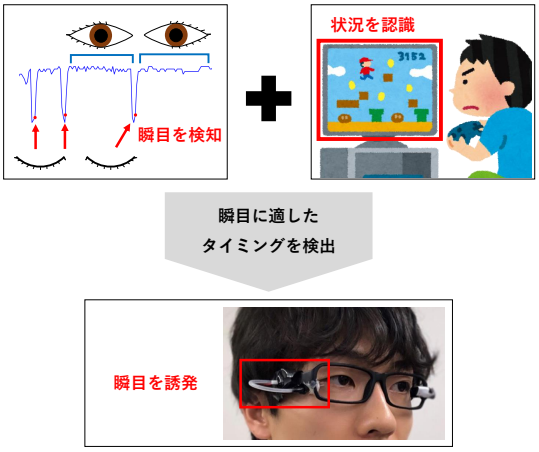

図 1: 提案システムのイメージ

図 3: ウェアラブルデバイスを装着した様子

図 2: 瞬目の検知と誘発を行うウェアラブルデバイス

図 4: 瞬目を検知する機能の実装部分

3. 提案システム

本章では，適切な瞬目タイミングで反射性瞬目を誘発するシステムを提案する．

3.1 設計

提案システムのイメージを図 1 に示す．提案システムは，瞬目検知機能，状況認識機能，瞬目誘発機能で構成されている．まず，常時，瞬目検知機能によって瞬目状況を検知する．次に，状況認識機能によって，ユーザの行動や周囲の状況をセンシングすることで瞬目に適したタイミングを検出する．ユーザの瞬目回数が減少し，かつ瞬目を促しても問題がないタイミングを判断し，瞬目誘発機能で反射性瞬目を誘発する刺激をユーザに与える．

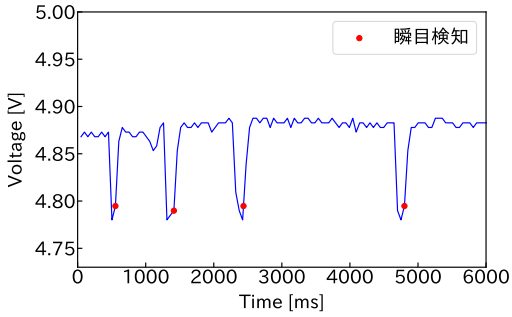

図 5: 瞬目を行った際のフォトリフレクタの出力

3.2 実装

瞬目の検知と誘発を行う眼鏡型ウェアラブルデバイスを実装した．実装したウェアラブルデバイスを図 2，装着した様子を図 3 に示す．瞬目の検知と誘発の各機能の実装部分について詳細を記す．

瞬目検知機能

瞬目検知機能の実装部分を図 4 に示す．瞬目の検知には反射型フォトリフレクタを用いた．反射型フォトリフレクタは発光部と受光部に分かれている．発光部の赤外線 LED から出た赤外光が眼表面やまぶたに反射し，受光部のフォトトランジスタで反射光を受け取ることでまぶたが閉じた瞬間を検知する．目に悪影響が生じないようにするため，赤外光の強度は 20 mW に設定した [24]．瞬目を行った際のフォトリフレクタの出力を図 5 に示す．100 ms の間に出力電圧が 25 mV 以上下がり，そこから次の 100 ms で 25 mV 以上電圧が上がった際に瞬目を行ったと判断した．サンプリング周期は 50 ms とした．

瞬目誘発機能

瞬目誘発機能の実装部分を図 6 に示す．空気を吐出することができる小型のアクチュエータとして，マイクロブロア (MZB1001T02, 村田製作所)[26] を使用した．吐出する空気を睫毛に向けて一点に集中させるために，チューブと

© 2021 Information Processing Society of Japan

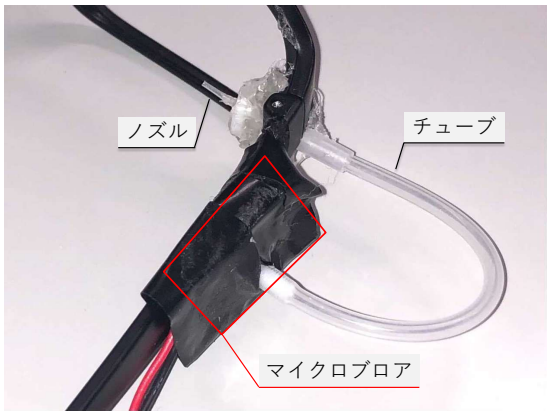

図 6: 反射性瞬目を誘発する機能の実装部分

ノズルを用いた．Arduino から信号を送ることでオンとオフを制御し，1 回につき 100 ms の間空気を吐出した．

3.3 瞬目に適したタイミングの検出

状況認識機能

瞬目に適したタイミングは，ユーザの置かれている状況によって異なると想定される．例えば，素早い判断を要するテレビゲームをプレイしているときにおける瞬目に適したタイミングを考える．視覚情報の変化が緩やかな状況や次に起こることが予測できるような状況は瞬目に適していると考えられる．また，オーケストラの演奏者の合奏中であれば，楽譜の内容を覚えている箇所を演奏しているときには楽譜に集中する必要がないため，瞬目に適しているといえる．

本研究では，コンピュータゲームをプレイしているときに状況を限定して調査を行った．詳細は次章以降にて記す．

4. 適切な瞬目タイミングの調査

本章では，ゲーム中に視覚遮断が生じても問題のないタイミングについて確認するために，瞬目の代わりにゲーム画面を遮断し，プレイヤの成績に及ぶ影響を調査する実験を行った．なお，この実験は神戸大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行った．

4.1 ゲームの実装

視覚情報の変化が激しいゲームとして本研究ではブロック崩しを採用した．ブロック崩しのゲーム画面を図 7 に示す．ブロック崩しとは，反射しながら移動するボールを左右に操作できるバーで打ち返し，画面上部のブロックにボールを当てることでブロックを消していくゲームのことである．ボールを打ち返すのに失敗するかブロックを全て消すことができればゲームが終了する．実装したゲームでは，バーの中心をマウスカーソルの x 座標に合わせて動くようにし，ボールが当たった場所がバーの中心からずれた場合は，ずれた方向に反射角を大きくした．また，ブロックが少なくなるにつれてボールの速度が上がるように設定し，ボールの移動空間が広くなることによる難易度の低下が生じにくいようにした．

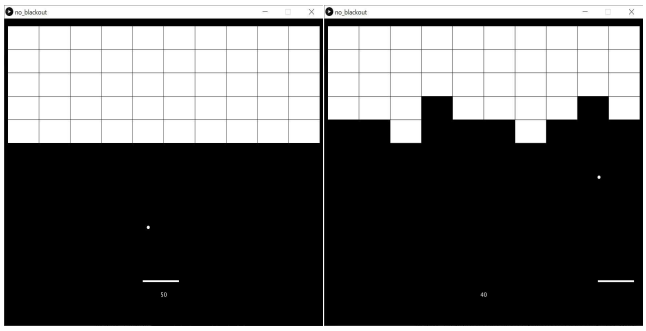

図 7: ブロック崩しのゲーム画面

4.2 実験方法

実験では，3 つのタイミングにおいてゲーム画面を遮断した場合の，画面遮断回数および消したブロックの数 (スコア) を記録した．

筆者が事前にランダムなタイミングで画面遮断が生じるゲームをプレイして感じたことをもとに，適切なタイミングと不適切なタイミングについて仮説を立てた．ボールがバーに当たるまでの時間に余裕があるときやボールが直線運動など単純な動きを行っているときには，画面を遮断しても大きな問題がないと考えた．逆に，最下段のブロックでボールが反射したときやボールが画面下部に向かっているときには，ボールがバーに当たるまでの時間に余裕がなく，ボールの速度の横方向成分が大きいときや反転したときには，集中しなければミスをしやすく，画面を遮断するべきではないと考えた，したがって，画面遮断を行うタイミングは以下の 3 つとした．

- *Random*: ランダムなタイミング
- *Suitable*: 瞬目に適していると予想したタイミング
  - 画面上部 1/3 にボールが存在するとき
  - ボールが画面上部に向かっておりかつ直線運動をしているとき
- *Unsuitable*: 瞬目に適していないと予想したタイミング
  - 最下段のブロックでボールが反射したとき
  - ボールが画面下部に向かっておりかつ速度の横方向成分が大きいとき
  - ボールが画面下部に向かっておりかつ横の壁やブロックの横に反射したとき

ただし，いずれも画面遮断の間隔は少なくとも 2 秒以上あけるようにし，*Random* においては画面遮断の間隔が 2 秒から 3 秒の間に収まるようにした．瞬目における視覚遮断は 100–150 ms の間継続するため，1 回の画面遮断の時間を 150 ms とした．また，ベースラインとして画面遮断を

© 2021 Information Processing Society of Japan

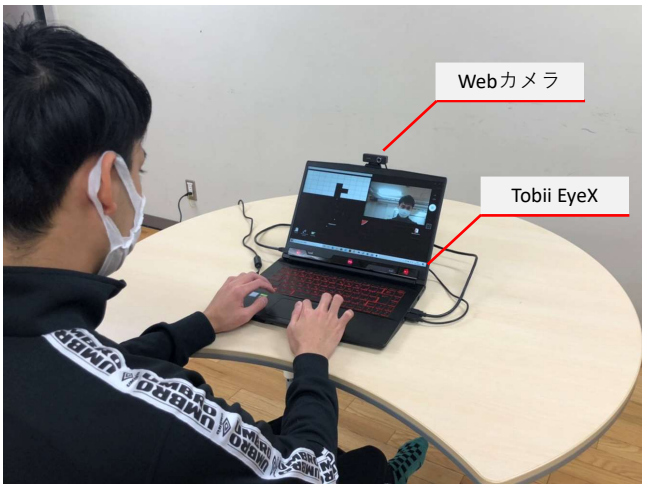

図 8: 予備実験の様子

行わない条件 (以下，遮断無し) においても実験を行い，同様の記録を行った．20 代男性 7 名，20 代女性 1 名の計 8 名を被験者とした．

4.3 実験手順

被験者はゲームに慣れてもらうために，記録前に画面遮断が無い状況でブロック崩しを 5 分間練習し，3 分間の休憩をとる．その後，各画面遮断のタイミングにつき 10 回ずつゲームをプレイする．各 10 回のプレイ後には 3 分間の休憩をとる．4 種類の画面遮断のタイミングでゲームを試行する順序は，被験者ごとに順序を入れ替えて実験を行う．実験の様子を図 8 に示す．ゲームを 10 回行うのにかかる時間は 2–3 分であり，休憩時間を含めると，実験に要する時間は 30 分程度である．実験中は，被験者自身の瞬目を確認するために Web カメラで映像を記録した．また，視線情報の記録には，Tobii 社のスクリーンベースのアイトラッカである Tobii EyeX[25] を用いた．実験を終了した後に，それぞれの画面遮断のタイミングに対するプレイのやり難さについてのアンケート調査を行い，5 段階で評価してもらった．なお，被験者には 3 種類の画面遮断がどの条件であるかを知らせずに実験を行った．

4.4 実験結果

4 つの条件におけるゲームのスコアを図 9 に示す．スコアの平均値は，遮断無しが 15.0 点，*Random* が 14.4 点，*Suitable* が 13.3 点，*Unsuitable* が 12.9 点であった．平均値には差があるようにみえたが，有意差はなかった．難しい局面が起こった頻度や被験者の集中力など，瞬目のタイミングよりプレイの失敗に大きく影響する要因があった可能性が考えられる．

また，画面遮断の間隔は *Random* において 20.4 回/分，*Suitable* において 26.6 回/分，*Unsuitable* において 12.6 回/分といったようにばらつきが生じた．これは，*Unsuitable* に該当するタイミングが *Suitable* ほど多く現れなかったことが原因である．*Unsuitable* では，画面遮断の頻度が最も低かったにもかかわらず点数が最も低いという結果が出ており，*Unsuitable* にて画面遮断を行うと，ミスを誘発させるという予想がおおむね正しかったといえる．

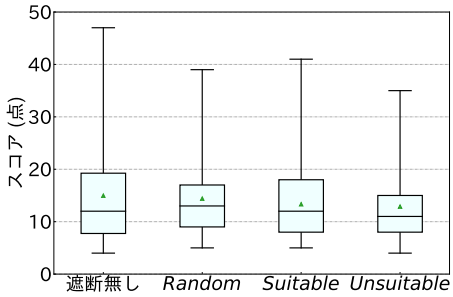

図 9: 4 つの画面遮断タイミングにおけるゲームスコア

次に，全体のアンケート結果を図 10，被験者ごとのアンケート結果を表 1 に示す．なお，被験者には遮断無しを「1: やり易い」と評価させ，これを基準にその他 3 種類の画面遮断を「1: やり易い – 5: やり難い」の 5 段階で評価させた．これも全体としては有意差はみられなかった．しかし，遮断無し以外の 3 種類の画面遮断のうち *Unsuitable* が最もやり易かったと答えた被験者は一人もおらず，*Suitable* が最もやり易いと答えた群 (A 群) と *Random* が最もやり易いと答えた群 (B 群) に分かれた．特に B 群に関しては，4 人全ての被験者が *Suitable* が最もやり難いと答えた．この結果から，*Suitable* は A 群に属するユーザにとっては適切であるが，B 群に属するユーザにとっては不適切であるといえる．

また，*Random* で行われた画面遮断のうち *Suitable* に該当するものは 37.8%，*Unsuitable* に該当するものは 11.2%，いずれにも該当しないものが 52.3%であった．*Random* では比較的高いスコアが得られ，アンケート結果でも最もやり易いと答えた被験者が全体の半数もいたため，*Suitable* や *Unsuitable* 以外の中に適切なタイミングが存在する可能性が高いと考えられる．今後，得られたデータの分析やデータ収集を重ねて，適切なタイミングをより明らかにしていく．

5. 評価実験

本章では，提案システムが瞬目を誘発するか確認するために，システムを使用した際の瞬目誘発率と瞬目回数を調査した．なお，この実験は神戸大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行った．

5.1 実験方法

実験では，ユーザにとって適切な瞬目タイミングに反射性瞬目を促す刺激を与えるように提案システムを設定し，

© 2021 Information Processing Society of Japan

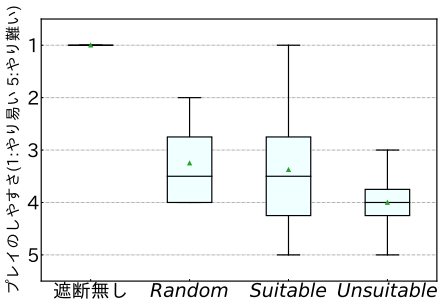

図 10: 4 つの画面遮断タイミングにおけるアンケート結果

表 1: 被験者ごとのアンケート結果

群	被験者	*Random*	*Suitable*	*Unsuitable*
A	a	4	3	5
	b	4	2	5
	c	4	3	4
	d	4	1	3
B	e	3	5	4
	f	2	4	4
	g	2	4	3
	h	3	5	4

(1: やり易い – 5: やり難い)

ゲーム中に提案システムを使用した際の瞬目誘発率や瞬目の増加について評価する．提案システムを用いてブロック崩しをプレイした際の，瞬目回数，瞬目誘発率を調査した．本実験では，20 代男性 2 名を被験者とした．

実験の様子を図 11 に示す．被験者は実装デバイスを装着した状態で，ブロック崩しをコンピュータ上でプレイする．瞬目を誘発するタイミングはコンピュータにて管理し，空気の吐出はデバイスが行った．予備調査の結果より，最適な瞬目タイミングに個人差があることが分かったため，瞬目を誘発するタイミングは 4 章と同じく *Random*，*Suitable*，*Unsuitable* とした．ただし，空気を吐出してから瞼が閉じきるまでにかかる時間は約 100 ms とされている [27] ので，4 章の画面遮断をするタイミングより 100 ms 前に空気を吐出した．また，4 章と同様に Web カメラにて実験を撮影し，瞬目回数を記録した．被験者は無刺激時もゲームをプレイし，3 つのタイミングと無刺激の計 4 パターンで瞬目回数を記録した．

実験手順は前章と同様に，被験者はまず練習を行い，その後に 10 回 ×4 セットブロック崩しをプレイした．被験者は全てのセットでデバイスを装着したままゲームをプレイした．実験を終了した後に，それぞれの画面遮断のタイミングに対するプレイのやり難さを 5 段階で評価してもらった．なお，前章と同様に，被験者にはどの画面遮断がどの条件であるかを知らせずに実験を行った．

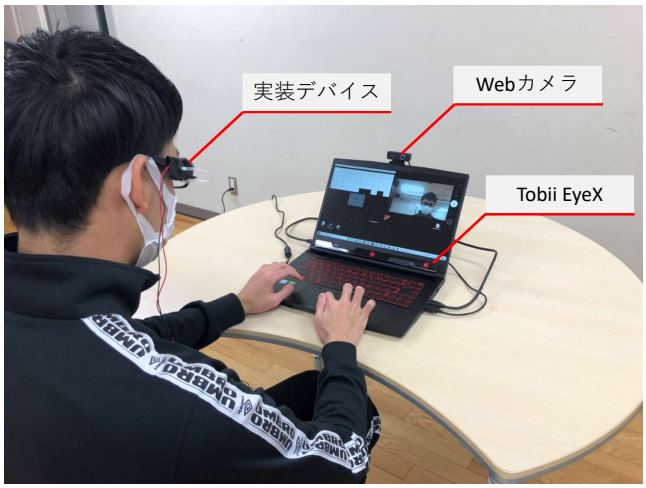

図 11: 評価実験の様子

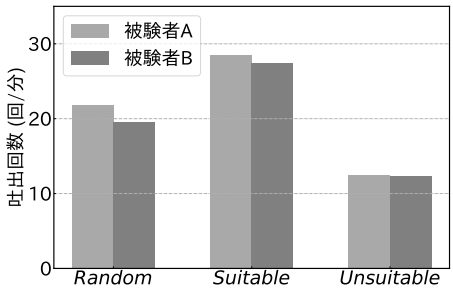

図 12: 空気の吐出頻度

5.2 実験結果

各条件ごとの空気の吐出頻度を図 12，瞬目の誘発率を図 13 に示す．先行研究の DualBlink[18] では瞬目誘発率は 62.4%であったが，本システムによる瞬目誘発率は被験者 A が 16.7%，被験者 B が 29.4%であり，先行研究より 30% 以上低かった．誘発率が低くなった原因は，刺激頻度が高かったことが考えられる．本実験の刺激頻度は *Random* で 21.0 回/分，*Suitable* で 28.1 回/分，*Unsuitable* で 12.4 回/分であった．先行研究では 1 分間に 6 回刺激を与えており，本実験の刺激回数はどれも先行研究より多かった．被験者のコメントからも，高い頻度での刺激が刺激の慣れを生んだことが分かっており，刺激頻度が高すぎたことで誘発率が低くなったと考えられる．また，先行研究では動画の視聴中に瞬目の誘発を行っているが，本実験ではゲームプレイ中に瞬目を誘発している．ゲームプレイ中のほうが集中力が高く瞬目が誘発されにくかったと考えられる．

被験者の瞬目頻度を図 14 に示す．被験者 A は無刺激時の瞬目回数は 3.7 回/分であった．しかし，*Random*，*Suitable*，*Unsuitable* はそれぞれ 5.7 回/分，6.3 回/分，8.0 回/分であり，1 分間に平均で 3.0 回増えたことが分かった．被験者 B も，無刺激において瞬目回数が 7.9 回/分であったのに対し，*Random*，*Suitable*，*Unsuitable* はそれぞれ 11.5 回/分，15.8 回/分，15.1 回/分であり，1 分間に平均で 6.3

© 2021 Information Processing Society of Japan

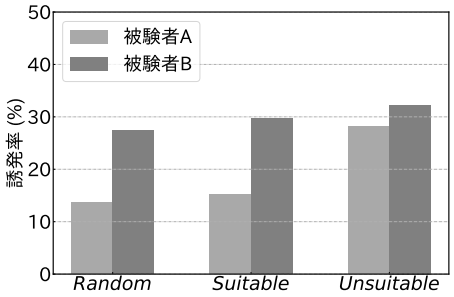

図 13: 反射性瞬目の誘発率

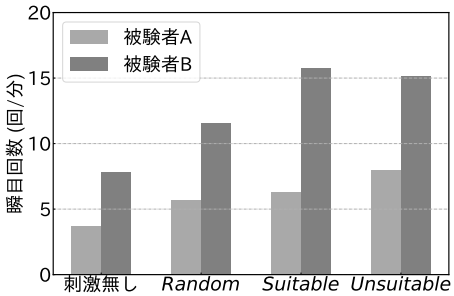

図 14: 被験者の瞬目頻度

回増えた．

以上より，瞬目誘発率は平均 21.4%と先行研究 [18] と比較して低かったが，瞬目回数は無刺激と比較して増加した．よって，提案システムは誘発率は低いが瞬目の回数を増加させることがわかった．今後は高い集中力を要するゲーム中においてより確実に瞬目を誘発するために，今後は刺激を与える頻度や刺激の種類を再検討する．また，他の使用状況でもデータ収集を重ねて，瞬目に適したタイミングを明らかにしていく．

6. まとめ

本論文では，適切なタイミングで反射性瞬目を誘発させるシステムを提案した．提案システムは，反射型フォトリフレクタを用いて瞬目の減少を検知し，睫毛に向けて空気を吐出することで，反射性瞬目を誘発する．提案システムを用いた適切なタイミングでの瞬目誘発の実現のために，瞬目に適したタイミングを調査した．

調査では，コンピュータゲームであるブロック崩しのプレイ中に使用状況を限定して，視界が遮断されても問題のないタイミングを検討した．3 種類のタイミング (ランダム *Random*, 適切と考えられるタイミング *Suitable*, 不適切と考えられるタイミング *Unsuitable*) でゲーム画面を遮断した際と，画面を遮断しない際の計 4 条件で被験者 8 名がブロック崩しをプレイした．各条件におけるスコアの平均値と画面遮断回数を比較すると，*Unsuitable* では最も画面遮断回数が多かったにもかかわらず平均点が最も低かった．また，アンケートの回答は個人差があり，遮断無し以外の 3 種類の画面遮断のうち *Suitable* が最もやり易いと答えた群と *Random* が最もやり易いと答えた群に分かれた．後者の被験者群のうち全員が *Suitable* が最もやり難いと答えた．これらの結果から，ゲーム中における瞬目に不適切なタイミングや適切なタイミングが人によって異なることが分かった．

また，提案システムが瞬目を誘発するか確認するために，被験者 2 名に対しシステムを使用した際の瞬目誘発率と瞬目回数を調査した．誘発率は 21.4%と先行研究と比較して低かったが，瞬目回数は無刺激と比較して増加しており，提案システムは誘発率は低いが瞬目の回数を増加させていた．高い集中力を要するゲーム中においてより確実に瞬目を誘発するために，今後は刺激を与える頻度や刺激の種類を再検討する．また，他の使用状況でもデータ収集を重ねて，瞬目に適したタイミングを明らかにしていく．

謝辞

本研究の一部は，JST CREST(JPMJCR18A3) の支援によるものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

[1] C. Blehm, S. Vishnu, A. Khattak, S. Mitra, and R. W. Yee: Computer Vision Syndrome: A Review, *Survey of Ophthalmology*, Vol. 50, No. 3. pp. 253–262 (May 2005).

[2] S. Benedetto, M. Pedrotti, L. Minin, T. Baccino, A. Re, and R. Montanari: Driver Workload and Eye Blink Duration, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 13, No. 3, pp. 199–208 (May 2011).

[3] H. J. M. Beckers, M. A. W. van Kooten-Noordzij, R. M. P. C. de Crom, J. S. A. G. Schouten, and C. A. B. Webers: Visual Complaints and Eye Problems in Orchestral Musicians, *Medical Problems of Performing Artists*, Vol. 31, No. 3, p. 140 (Sep. 2016).

[4] A. M. Griff and E. Hersh: How Many Times Do You Blink a Day?, *Healthline*, `https://www.healthline.com/health/how-many-times-do-you-blink-a-day` (Sep. 2020).

[5] J. L. Gayton: Etiology, Prevalence, and Treatment of Dry Eye Disease, *Clinical Ophthalmology*, Vol. 3, pp. 405–412 (July 2009).

[6] T. Inomata, T. Shiang, M. Iwagami, F. Sakemi, K. Fujimoto, Y. Okumura, M. Ohno, and A. Murakami: Changes in Distribution of Dry Eye Disease by the New 2016 Diagnostic Criteria from the Asia Dry Eye Society, *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1918, pp. 1–7 (Jan. 2018).

[7] G. Cardona, C. García, C. Serés, M. Vilaseca, and J. Gispets: Blink Rate, Blink Amplitude, and Tear Film Integrity during Dynamic Visual Display Terminal Tasks, *Current Eye Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 190–197 (Jan. 2011).

[8] L. A. Riggs, F. Volkmann, and R. K. Moore: Suppression of the Blackout Due to Blinks, *Vision Research*, Vol. 21, No. 7, pp. 1075–1079 (Feb. 1981).

[9] A. R. Bentivoglio, S. B. Bressman, E. Cassetta, D. Carretta, P. Tonali, and A. Albanese: Analysis of Blink Rate Patterns in Normal Subjects, *Movement Disorders*, Vol.

© 2021 Information Processing Society of Japan

12, No. 6, pp. 1028–1034 (Nov. 2004).

[10] M. G. Doane: Interaction of Eyelids and Tears in Corneal Wetting and the Dynamics of the Normal Human Eyeblink, *American Journal of Opthalmology*, Vol. 89, No. 4, pp. 507–516 (Apr. 1980).

[11] Y. Ohashi, M. Dogru, and K. Tsubota: Laboratory Findings in Tear Fluid Analysis, *Clinica Chimica Acta*, Vol. 369, No. 1, pp. 17–28 (July 2006).

[12] A. A. V. Cruz, D. M. Garcia, C. T. Pinto, and S. P. Cechetti: Spontaneous Eyeblink Activity, *The Ocular Surface*, Vol. 9, No. 1, pp. 29–41 (Jan. 2011).

[13] F. J. Holly and M. A. Lemp: Tear Physiology and Dry Eyes, *Survey of Opthalmology*, Vol. 22, No. 2, pp. 69–87 (Oct. 1977).

[14] D. L. Miura, R. M. Hazarbassanov, C. K. N. Yamasato, F. B. e Silva, C. J. Godinho, and J. Á. P. Gomes: Effect of a Light-Emitting Timer Device on the Blink Rate of Non-Dry Eye Individuals and Dry Eye Patients, *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 97, No. 8, pp. 965–967 (Mar. 2013).

[15] T. Crnovrsanin, Y. Wang, and K. Ma: Stimulating a Blink: Reduction of Eye Fatigue with Visual Stimulus, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2014)*, pp. 2055–2064 (Apr. 2014).

[16] D. S. Nosch, C. Foppa, M. Tóth, and R. E. Joos: Blink Animation Software to Improve Blinking and Dry Eye Symptoms, *Optometry and Vision Science*, Vol. 92, No. 9, pp. e310–e315 (Sep. 2015).

[17] M. Ebling: Virtual Senses, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Vol. 8, No. 4, pp. 4–5 (Oct. 2009).

[18] A. Dementyev and C. 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 (IMWUT2017)*, Vol. 1, No. 1, pp. 1:1–1:19 (Mar. 2017).

[19] J. Crook: The Google Glass Wink Feature Is Real, *TechCrunch*, `https://www.google.com/glass/start/` (May 2013).

[20] A. Bulling, J. A. Ward, H. Gellersen, and G. Tröster: Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography, *the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI 2011)*, Vol. 33, No. 4, pp. 741–753 (Apr. 2011).

[21] Y. Uema and K. Inoue: JINS MEME Algorithm for Estimation and Tracking of Concentration of Users, *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 297–300 (Sep. 2017).

[22] M. Pal, A. Banerjee, S. Datta, A. Konar, D. N. Tibarewala, and R. Janarthanan: Electrooculography Based Blink Detection to Prevent Computer Vision Syndrome, *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT 2014)*, pp. 1–6 (Jan. 2014).

[23] E. Luo, R. Fu, A. Chu, K. Vega, and H. Kao: Eslucent: an Eyelid Interface for Detecting Eye Blinking, *Proceedings of the International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2020)*, pp. 58–62 (Sep. 2020).

[24] F. L. Castro: Class I infrared Eye Blinking Detector, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 148, No. 2, pp. 388–394 (Sep. 2008).

[25] Tobii: Tobii EyeX, `https://eyecomtec.com/ja/3118-Tobii-EyeX`.

[26] 村田製作所: マイクロブロア (エアポンプ) MZB1001T02, `https://www.murata.com/ja-jp/products/mechatronics/fluid/microblower_mzb1001t02`.

[27] F. V. Werf, P. Brassinga, D. Reits, M. Aramideh, and B. O. de Visser: Eyelid Movements: Behavioral Studies of Blinking in Humans Under Different Stimulus Conditions, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 89, No. 5, pp. 2784–2796 (May 2003).

© 2021 Information Processing Society of Japan