情報処理学会論文誌 Vol.62 No.2 667–679 (Feb. 2021)

Bubble Gaze Lens：バブルレンズ法の視線操作への適用

崔 明根[1,a)] 坂本 大介[1] 小野 哲雄[1]

受付日 2020年4月15日, 採録日 2020年11月5日

概要：本稿では，密集した小さなターゲットに対して高速にターゲット選択を行うことができるよう拡張した手法であるバブルレンズ法を，視線操作インタフェースに適用した手法 Bubble Gaze Lens を提案する．本手法は，サッケードが弾道的な運動と修正的な運動によって構成されていることを利用して，ターゲット付近で拡大レンズを起動することで，視線入力インタフェースにおける小さなターゲットの選択を容易にする．提案手法の有用性を検討するために既存手法である Bubble Gaze Cursor と提案手法 Bubble Gaze Lens に対してポインティングタスクを行った結果，提案手法は既存手法と比較してつねに高速に動作し，エラー率を 54.0 %削減した．さらに，ユーザビリティやメンタルワークロードにおいても提案手法の方が既存手法よりも有意に優れていた．

キーワード：視線インタフェース，エリアカーソル，拡大レンズ，ポインティングタスク

Bubble Gaze Lens: Applying Bubble Lens Technique to Eye-gaze Interaction

Myungguen Choi[1,a)] Daisuke Sakamoto[1] Tetsuo Ono[1]

Received: April 15, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: In this paper, we present a method of applying a bubble lens technique, which is the method to achieve easy and fast selection for a small target, to the eye-gaze interface. This method makes it easy to select a small target in eye-gaze interface by activating magnification lens near the target to use knowledge that a saccade includes a ballistic movement and corrective movements. We performed a pointing task to validate usefulness of bubble gaze lens by comparing a bubble gaze cursor and a bubble gaze lens which is our proposed technique. Results indicated that our proposed technique always faster than the bubble gaze cursor, and reduced the error rate by 54.0%. In addition, the usability score and mental work load score was also significantly better than the bubble gaze cursor.

Keywords: eye-gaze interface, area cursor, magnifying lens, pointing task

1. はじめに

Bolt [1] が視線入力を用いたマルチモーダルインタフェースの可能性を HCI（ヒューマンコンピュータインタラクション）の分野で提案して以来，視線入力インタフェースは HCI 分野において広く研究されるようになった．視線は遠距離に対するインタラクションが可能である [2], [3] うえに，非常に高速である [4], [5]．このため視線と他の入力を組み合せることでマウス操作よりも高速な入力や効率的な操作が可能になった．一方で，視線単一の入力手法は何点か課題をかかえており，特に顕著な問題として，小さなターゲットの選択が困難であるという問題がある．この問題は固視微動（人間の意図とは関係なく不随意に起こる非常に微小な眼球運動）やアイトラッカーの精度の限界 [6] などが原因で，ターゲット内に視線を固定し続けることが難しいため起こる．この問題を解消するためにはズームなどの手法を用いて選択を容易にするよう工夫することや [7], [8], [9], [10], [11]，そもそも大きなターゲットのみが配置されるようなインタフェースデザインを採用すること [12] などが必要になる．しかしこれらの手法は，ポイン

1 北海道大学
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060–0814, Japan
a) myungguenchoi@complex.ist.hokudai.ac.jp

© 2021 Information Processing Society of Japan

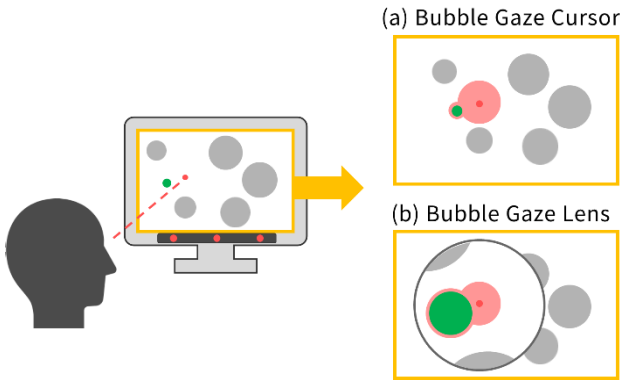

図 1　既存手法 Bubble Gaze Cursor [16] のイメージ (a) と提案手法 Bubble Gaze Lens のイメージ (b)

Fig. 1　An image of Bubble Gaze Cursor [16] which is an existing method (a), and an image of Bubble Gaze Lens which is our proposed method (b).

ティングを容易にする代わりに，ポインティング速度やインタフェースデザインの汎用性を著しく損なってしまう．

我々はこの既存手法の課題を解決し，かつ小さなターゲットの選択を容易にする手法として，エリアカーソル [13], [14] の一種であるバブルカーソル [15] を視線入力インタフェースに用いる手法 Bubble Gaze Cursor（図 1 (a)）[16] を提案した．この手法は視線操作インタフェースにおいて最も用いられているポイントカーソルによるターゲット選択よりも有意に高速であり，さらにユーザビリティやメンタルワークロードの面においても有意に優れていた．しかし，バブルカーソルで密集した小さなターゲットの選択することは難しく，Bubble Gaze Cursor のみでは小さなターゲットのポインティングを完全に容易にすることは難しい．

そこで本稿では，バブルカーソルの改善手法であるバブルレンズ [17] を視線入力インタフェースに用いる手法 Bubble Gaze Lens を提案する．バブルレンズはバブルカーソルで取得が困難な，密集した小さなターゲットの選択を容易にするための手法である．バブルレンズは，十分な大きさのターゲットに対してはバブルカーソルとして動作するが，閾値以上に小さいターゲットを選択する場合はターゲット付近で拡大レンズが自動的に開く．この拡大レンズによってターゲットの幅を拡大し，容易なポインティングを達成している．この結果，視線入力インタフェースにバブルレンズを用いることで Bubble Gaze Cursor で困難だった小さなターゲットの選択を容易にすることができると考えられる．一方で，バブルレンズを視線インタフェースとして活用し Bubble Gaze Lens として実装するためには自明ではない解決するべき問題が存在する．たとえば，バブルレンズを視線入力インタフェースで扱うためにはトリガとなる視線の移動を検出する必要があるため，本研究ではこのアルゴリズムを開発する．また，ここでのトリガとなる視線の動作を 2 次サッケードと呼ぶが，リアルタイムでの視線インタフェースを実現するためにはオンラインでの 2 次サッケードの検出をする必要がある．

本稿においては，まず Bubble Gaze Lens のアルゴリズムについて詳細を示したのち，既存手法 Bubble Gaze Cursor と提案手法 Bubble Gaze Lens に対して小さなターゲットに対するポインティングタスクを行い，その結果を報告する．

本研究の貢献を下記に要約する．

- 視線操作インタフェースにおける小さなターゲットの選択を容易にすることを目的としてバブルレンズを視線入力に対して用いる Bubble Gaze Lens を提案した．
- Bubble Gaze Cursor と提案手法を比較し，提案手法のパフォーマンスやユーザビリティを確認した．
- 実験の結果，提案手法は既存手法である Bubble Gaze Cursor のエラー率から 54.0%改善した．

2.　関連研究

2.1　視線操作インタフェースに必要なターゲットサイズ

人はターゲットをはっきりと見るとき，網膜の中心に存在する中心窩でオブジェクトをとらえる必要がある．中心窩は人の高精細な中心視野に寄与している部位であり，視角は約 1～2°（眼球中心からディスプレイまでの角度）である．視線操作インタフェースにおけるオブジェクトの大きさは，この視角以上の大きさが必要である [6]．また，ターゲット注視時のディスプレイ上の視点位置は固視微動によって分散が大きく，すべての視点位置を内包する領域は非常に大きくなる．Feit ら [18] はターゲットに対して注視しているときの視線データの 95%がターゲット内に内包されるようなターゲットサイズを調査した．その結果，75%のユーザにとって十分なターゲットサイズは，生の視線データを扱う場合は 3.28 × 3.78 cm（2.91 × 3.33°），適切な平滑化アルゴリズムを使用する場合は 1.90 × 2.35 cm（1.67 × 2.07°）であった．この大きさはマウスやタッチ操作に必要なターゲットの大きさと比較すると非常に大きい [12]．また Schuetz ら [19] は，動作時間の減少を目的として，修正サッケード（メインサッケードの後に起こるサッケード）がほとんど発生しない 3 度以上のターゲットサイズを推奨している．Orquin ら [20] はターゲットに対する注視をターゲット内に高い割合で内包するためには，優れたアイトラッカーであっても 5° 以上のターゲットサイズが必要だとした．ゆえに，既存のマウスやタッチ操作に適したインタフェースで小さなターゲットを視線操作で選択する場合，ターゲットサイズを拡大する手法が必要だといえる．

2.2　視線の精度改善手法

視線の精度を検討する際に用いられる指標に Accuracy と Precision がある．Accuracy は実際の注視位置と検出さ

© 2021 Information Processing Society of Japan

れた注視位置の平均誤差であり，Precision は連続した注視点の二乗平均平方根によるデータのばらつきを示している．この Accuracy と Precision が大きいほど，必要なターゲットサイズが大きくなってしまう．そこで Precision を小さくするための手法として，視線データに対する平滑化アルゴリズムが数多くの研究で提案されている [18], [21]．最も単純な平滑化フィルタは，最後の視点位置から N 点の視点位置の平均を現在の視点位置とするようなアルゴリズム [22], [23] である．また，N 点の視点位置ごとに重みをかけてから平均をとるようなアルゴリズム [18], [24], [25], [26] なども提案されている．また平滑化フィルタを用いない手法として，ターゲットの中心に小さなドットを描画し，ターゲットではなくそのドットをユーザに凝視させる手法 [27] も提案されている．一方で，Accuracy はハードウェアやキャリブレーションの影響が大きく，視線データの後処理で Accuracy を改善することは難しい [18]．ゆえに，視線インタフェースにおける小さなターゲットのポインティングを改善するためには，Accuracy と Precision の改善以外のアプローチが必要だといえる．

2.3 ターゲットを拡大する手法

ターゲットの幅を増大させる手法として考えられる手法にズームによるターゲットサイズの拡大があげられる．ズームによるターゲット拡張はマウス操作において動作時間を有意に減少させ，かつズーム後のターゲットの幅に対して Fitts' Law [28], [29] が成り立つ [30], [31] ことが確認されている．このズーム機能を視線操作インタフェースに実装した研究はいくつか存在する．まず，ズーム開始のトリガを視線以外の入力を用いる手法が提案されている [32], [33], [34], [35]．EyePoint [32] はキーボード，Zooming interfaces [33] はスイッチによる入力をトリガとしてユーザの視点位置をズームする手法である．一方で視線のみを用いたズーム手法は少ない．なぜなら，視線が単純な入力しか行うことができないためである．Lankford [7] は 2 段階の滞留時間を用いたズーム手法を提案した．この手法は一定の滞留時間の後に凝視していた領域の拡大領域がポップアップされ，その拡大画面からターゲットを再度凝視し選択するという手法である．類似手法として，Ashmore ら [8] はポップアップの代わりに魚眼レンズを用いた 2 段階ズーム手法を提案している．しかし，これらの手法を用いる場合，拡大領域によって画面内の情報損失が発生する．ゆえに，ほかのズーム手法として視線を向けた領域に対して連続的にズームを行う手法が提案されている [9], [10], [11]．これらの手法は関心領域以外が画面外に移動していくようなズームであるため，関心領域に関する情報損失が少ない．これらの 2 つのズーム手法を比較すると，ポップアップ式のズーム手法はヒット率が高く，逆に連続的なズーム手法は高速であった [36]．しかし，どちらも余分な滞留時間が発生することからズーム手法を用いない手法よりも遅い．

また，ズームを用いずにターゲットの幅を実質的に増大させるような手法も存在する [9], [37], [38]．Špakov ら [37] は視線によってメニューを選択する際に，一定時間凝視したあとにメニューの大きさが拡大されるようなインタフェースデザインを提案した．この手法を用いることでエラーレートを 1/6 に改善することに成功した．しかし，同時に 39%の動作時間の増加が引き起こされた．また，ターゲットの視覚的な大きさは変えずに判定領域だけ大きくするような手法も提案されている [39], [40]．Miniotas ら [39] は視覚的なターゲットの大きさよりも大きな判定領域を用意することで実質的なターゲット拡張を行う手法を提案した．この手法によってポインティングタスクの作業時間は有意に減少したが，この手法は静的な処理であるため，インタフェースのデザインの変更のたびに判定領域を手動で設定する必要がある．また，判定領域内に入力判定のあるオブジェクトを複数配置することができないため，インタフェースデザインに制限がかかってしまう．

上記で触れた手法は，ターゲットサイズを拡大しポインティングを容易にするが，動作時間の増大やデザインの汎用性の損失につながる．特に動作時間に関しては，視線が単一的な入力しか行えないという欠点から，容易なポインティングとトレードオフの関係になっている．

2.4 Bubble Gaze Cursor

視線操作インタフェースにおける動作時間を維持した小さなターゲットの選択手法として，我々は Bubble Gaze Cursor [16] を提案した．この手法はエリアカーソル手法の一種であるバブルカーソル法 [15] を視線操作インタフェースに導入した手法である．バブルカーソルとはターゲットサイズをターゲットのボロノイ領域 [41] につねに拡大する手法である．視線操作インタフェースにおいて最も用いられているポイントカーソルと Bubble Gaze Cursor を比較したところ，すべてのターゲットの有効幅に対して有意に Bubble Gaze Cursor の方が高速であった．よってバブルカーソルは視線操作インタフェースにおいて正常に動作し，同時に Bubble Gaze Cursor は有用な手法であることが明らかになった．**図 2** (a) はボロノイ領域とバブルカーソルの図示，(b) はボロノイ領域で拡大されたターゲット領域である．

一方で Bubble Gaze Cursor はバブルカーソルがもともと持っていた欠点を引き継いでいる．その欠点とは，密集した小さなターゲットの選択が難しいという点である．バブルカーソルはターゲットサイズをボロノイ領域の大きさに拡大する手法であり，もともとのボロノイ領域が小さいターゲットの選択には適していない．特に視線操作インタフェースにおいては比較的大きなターゲットサイズが必要

© 2021 Information Processing Society of Japan

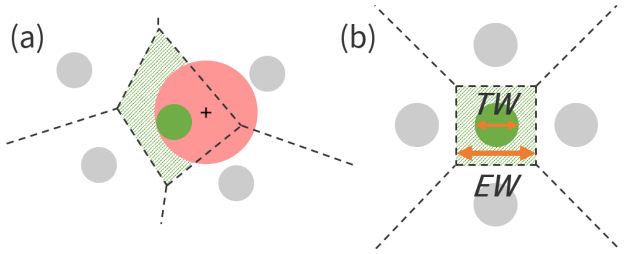

図 2　(a) ボロノイ領域とバブルカーソル．(b) ターゲットの幅（TW）とターゲットの有効幅（EW）

Fig. 2　(a) A Voronoi diagram and a bubble cursor. (b) Target width (TW) and effective width (EW).

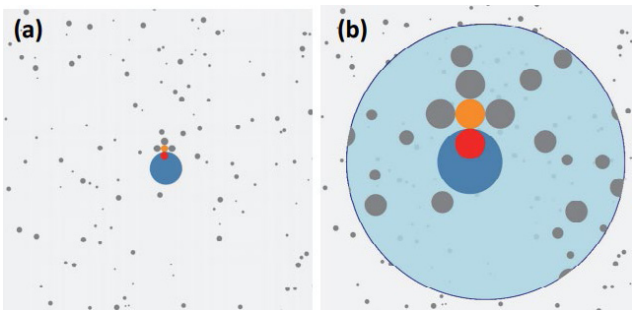

図 3　(a) バブルレンズの拡大レンズが起動する直前 (b) 拡大レンズが起動した画面状態 [17]

Fig. 3　(a) The bubble lens before automatic magnification. (b) The lens after automatic magnification [17].

となるため，この欠点は致命的である．

2.5　バブルレンズ

バブルカーソルが有する密集した小さなターゲットの選択が難しい，という問題を解消するために，Mott らはバブルレンズ法を提案した [17]．この手法はバブルカーソルによって十分に拡大されないようなターゲットの付近で拡大レンズを自動的に起動することでターゲットを拡大し，十分なターゲットサイズを確保する手法である．拡大レンズは，カーソルの動作が弾道運動と修正運動から成り立つという Meyer らの Initial impulse model [42] にのっとった手法であるキネマティックトリガを用いており，閾値以下の大きさのターゲット付近にてカーソルの速度プロファイルに 2 度以上極小値が検出されたときに起動する．バブルレンズ法をバブルカーソル法と比較したところ，動作時間は 10.2%減少し，エラー率は 37.9%減少した．**図 3** にバブルレンズ法での拡大レンズが起動する様子を示す．

3.　提案手法

本稿で提案する Bubble Gaze Lens は視線操作インタフェースにバブルレンズ法を用いた手法である．本手法ではゴールターゲット付近にユーザの視線が近づいたときに，ゴールターゲットを内包する拡大レンズが自動的に起動される．この拡大レンズによって Bubble Gaze Cursor で選択が困難であった密集した小さなターゲットの選択を容易にする．Bubble Gaze Lens のアルゴリズムはバブルレンズ法のアルゴリズムであるキネマティックトリガにのっとっている．

3.1　Bubble Gaze Lens の原理

バブルレンズの拡大レンズの起動は，マウスカーソルの動作が単一の弾道運動と複数の修正運動によって成り立つという Meyer らのモデル [42] にのっとっている．サッケード（視線の高速移動）も，マウスカーソルの挙動と同様に単一の弾道運動と修正運動を有している場合がある．サッケードは基本的に単一の弾道運動のみで構成されているが，ターゲット指向のサッケードはターゲットの離心率の 5〜10%ほど離れた位置に着地することがあり [43], [44]，それを追加の短いサッケード（2 次サッケード）[45], [46] が修正することがある．この 2 次サッケードを修正運動と考えることで，バブルレンズを視線操作インタフェースに導入することが可能であると私たちは考えた．

3.2　Bubble Gaze Lens のアルゴリズム

Bubble Gaze Lens のアルゴリズムはバブルレンズのキネマティックトリガを参考にしている．キネマティックトリガはマウスカーソルの速度プロファイルに極大値が 2 カ所検出されたときに拡大レンズを起動するアルゴリズムである．具体的なキネマティックトリガの仕組みを以下に記述する．まず，マウスカーソルの速度データを 100 Hz でリサンプリングした後にガウシアンカーネルフィルタで平滑化する．そして極大値が 2 カ所検出され，かつマウスカーソルの直近ターゲットが既定の有効サイズよりも小さい場合に拡大レンズを起動する．

提案手法ではキネマティックトリガを視線操作用に拡張した．まず，バブルレンズにおいては速度データをリサンプリングした後に平滑化を行ったが，Bubble Gaze Lens においてはアイトラッカーのサンプリングレートが低い（90 Hz）ことからリサンプリング・平滑化を行わなかった．さらに，視線はマウスと異なりつねに動き続けているため，判定をリセットするためにウインドウサイズを定める必要がある．このウインドウサイズは潜時（Saccade Latency；メインサッケードの前に生じる 150〜200 ms の視線の固定）と一連のサッケードを十分に含む大きさである必要があり，それを考慮した値であるウインドウサイズ 50 データに定めた．Bubble Gaze Lens のアルゴリズムを以下に示す（**図 4**）．

① ウインドウの初めに視線が 150 ms の間 8.8°/s（固視閾値）以内である（潜時の推定）
② 100°/s 以上の極大値（メインサッケード）と 30°/s 以上の極大値（2 次サッケード）を検出
③ 2 カ所の極大値が 50〜250 ms 離れている

© 2021 Information Processing Society of Japan

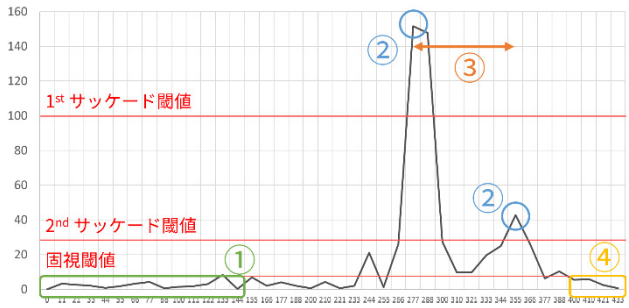

図 4　視線の速度プロファイルに対する Bubble Gaze Lens のアルゴリズムの概略

Fig. 4　The bubble gaze lens algorithm about a velocity profile of the gaze.

④　①②③が成り立ち，直近 40 ms の視線が 8.8°/s（固視閾値）以内であるときに拡大レンズを起動する

Bubble Gaze Lens のアルゴリズムの説明，およびパラメタの採用理由に関して順に述べる．まず，①における固視検出は，メインサッケードを検出するために潜時を推定している．その際に固視閾値 8.8°/s を用いた．このパラメタは他の研究で用いられたパラメタ [47], [48] よりも小さく，固視の検出に十分だといえる．次に②はメインサッケードと 2 次サッケードを検出している．メインサッケードの検出に用いた速度閾値 100°/s は，60 Hz のアイトラッカーを用いた研究 [49], [50] におけるサッケード閾値 75°/s よりも大きいため，偽陽性率の低い，適切な値だと考えられる．2 次サッケード閾値 30°/s に関しては，メインサッケードよりも 2 次サッケードの方がピーク速度が小さいことから，検討の結果 30°/s に設定した．次に③は 2 次サッケードと連続したサッケード [51] を分けて検出することを目的としている．サッケード間隔が短すぎる場合，複数のサッケードが連続して行われていると考えられ，サッケード間隔が長すぎる場合，サッケードが終了した後にまたサッケードが開始していると考えられる．そのため，2 次サッケードの潜時が 100～150 ms であること [52] や 2 次サッケードの一種である Dynamic Overshoot [53] を考慮し，サッケード間隔が 50～250 ms 離れていることを 2 次サッケード検出の条件に組み込んだ．最後に④はサッケードが終了したことを検出している．

4.　実験

提案手法が有用であるか検討するために，Bubble Gaze Cursor と Bubble Gaze Lens との比較実験を行い，提案手法のパフォーマンスを測定する．

4.1　実験参加者と使用機器

24 名の実験参加者を募ったが，2 名はキャリブレーションのエラーで，2 名は不規則な視線運動が原因で除外した．ゆえに実験参加者として 20 名（女性 4 名，平均年齢 23.0 歳，標準偏差 2.1 歳）が実験に参加した．1 名はアイトラッキングを用いた経験があった．また，報酬として実験参加者にそれぞれ 1,000 円分の Amazon ギフトカードを渡した．実験時間は約 1 時間であった．

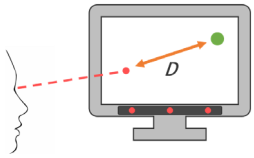

図 5　視線からターゲット中心までの距離 D

Fig. 5　Distance between the gaze and the target.

図 6　ターゲット間のスペース S

Fig. 6　Spacing between targets.

本実験は 3.40 GHz の Intel（R）Core（TM）i7-6700U の CPU を搭載したパソコンで行った．ディスプレイはフル HD の 23 インチ（1,920 × 1,080 ピクセル；1 ピクセルあたり約 0.27,mm）のディスプレイを使用した．アイトラッカーは Tobii Eye Tracker 4C（90 Hz；ライセンス取得済み）を使用し，実験に用いたソフトウェアは C#の Windows Form アプリケーションで作成した．

4.2　実験デザイン

実験は参加者内実験計画を用いて行った．独立変数は 4 つ存在し，それぞれ以下のように設定されている．

- カーソルの種類 CT（Bubble gaze cursor，Bubble gaze lens）
- 視線からターゲット中心までの距離 D（**図 5**）（350，550，800 ピクセル（7.72，12.11，17.54°））
- ターゲットの幅 TW（20，32，52 ピクセル（0.44，0.71，1.15°））
- ターゲット間のスペース S（**図 6**）（スペースなし：0 ピクセル，ターゲット半径の半分：TW/4 ピクセル，ターゲット半径：TW/2 ピクセル））

実験参加者は CT 条件ごとに 15 のセッションを行った．各セッションはランダムな順序で表示される D，TW，S の 27 の組合せによって構成されている．タスクはターゲット選択であり，ターゲットを選択すると D だけ離れたランダムな位置にターゲットが新しく生成される．実験参加者はそれぞれ 2 CT 条件 × 15 セッション × 27（D，TW，S の組合せ）= 810 回のターゲット選択を行う．ゆえに，実験参加者 20 名から 16,200 のデータを収集した．

© 2021 Information Processing Society of Japan

CT に対する従属変数は動作時間とエラー率を求めた．エラーは，間違ったターゲット選択したとき，起動した拡大レンズ内にターゲットが内包されていないとき，そして 5 秒以上ターゲットが選択されなかったときに計上された．また Bubble Gaze Lens に対してのみ，キネマティックトリガが失敗した割合を従属変数として扱った．そして，それぞれの CT 条件完了後にメンタルワークロードとユーザビリティを計測するために System Usability Scale（SUS）[54] と NASA Task Load Index（NASA-TLX）[55] によるアンケートを実施した．なお，SUS の質問項目は付録 A.1 に記載した．

実験中に画面に描画されるユーザの視線位置に対して Saccade detection with a triangular kernel filter [18] を使用し，視線データを平滑化した．これは視線インタフェースにエリアカーソルを用いる場合，視線の平滑化を行わないとバブルのサイズが急激に変化し，ユーザの集中の妨げになるため [16] である．なお，キネマティックトリガの計算のために用いる視線データは平滑化されず，あくまで視線カーソルの位置にのみ平滑化アルゴリズムは用いられている．

Bubble Gaze Lens におけるバブルの最大幅は 100 ピクセル（2.21°）とした．この最大幅は拡大レンズ内でも維持される．バブルの最大幅を設定しない場合，過度にターゲットが拡大され，ターゲットを見ていない状態でもターゲットが選択されてしまう現象が頻繁に起こる．そのため，必要以上にターゲットを拡大しないようバブルの最大幅を設定した．バブルの最大幅の設計時，バブルの最大幅が小さすぎるとターゲットを十分拡大することができないため，適切な最大幅を設定する必要がある．バブルの最大幅を設定した場合，バブルの最大幅よりも小さなターゲットは最低でもバブルの最大幅の 2 倍まで拡大される．つまり，本稿においてターゲットは最低でも 200 ピクセル（4.42°）まで拡大される．この大きさは，本実験で使用する平滑化アルゴリズム（Saccade detection with a triangular kernel filter）を用いた場合において堅牢なインタラクションを可能にするターゲットサイズ（幅 2.07〜2.48°，高さ 2.23〜2.77°）[18] よりも大きな値である．ゆえに，設定したバブルの最大幅は適切だといえる．また，拡大レンズによる拡大率は 4 で，拡大レンズの幅は 560 ピクセル（12.33°）である．したがって，70 ピクセル（1.55°）を半径とする円の領域が拡大される．上記のパラメタは，拡大レンズの拡大率 4 以外は Bubble Lens で用いられているパラメタとは異なり，著者らの事前検討によって決定されている．目標ターゲットは，拡大レンズが画面外に表示されないように，画面横端から 200 ピクセル以内と縦端 150 ピクセル以内に生成されないようにした．また，仮に拡大レンズ内に目標ターゲットが含まれていなかった場合，1 秒後に次の試行へ進む．滞留時間は 600 ms であり，この滞留時間は拡大レンズが起動したときにリセットされる．

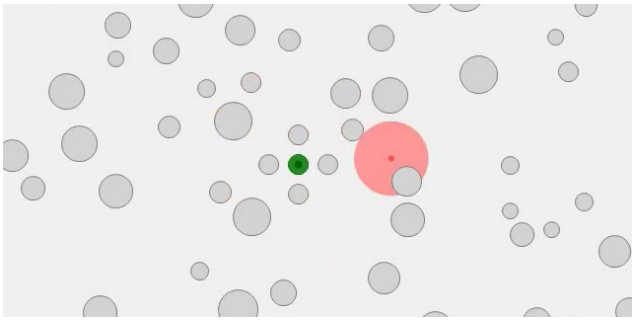

図 7　実験画面のキャプチャ
Fig. 7　A cropped screenshot of the experiment setup.

4.3　実験手順

はじめに，実験参加者をディスプレイから 70 cm ほど離れた位置に座らせ，目がディスプレイの中心に位置する高さに椅子を調整させた．その後，これから行うタスクの内容を紙に印刷された図などを用いて説明した後，アイトラッカーのキャリブレーション（ディスプレイ上の視点位置を個人に合わせて調整すること）を行った．実験開始前には視線入力やタスクの内容に慣れるために，これから行うタスクと同様のポインティングタスクを，パラメタを実際のタスクとは異なった値に設定し，実験参加者が挙動を理解したと宣言するまで練習させた．そして練習が終了した後に実験タスクを開始した．

タスクは複数配置された灰色の偽ターゲットのなかに 1 つだけ配置された緑の目標ターゲットを選択するというものである．目標ターゲットの周りには，バブルカーソルによって拡大される有効幅を制御するために，偽ターゲットが四方に配置されている．偽ターゲットは 16〜40 ピクセル（0.35〜0.88°）の大きさでランダムに位置に計 350 個生成された．目標ターゲットの中心には 10 ピクセル（0.22°）の濃緑色の点が描画されている．これは注視するべき凝視点が存在しない場合ターゲットを注視し続けることが難しい [27] ため，配置した．実験参加者にはポインティングタスクの際に視線カーソルではなくこの濃緑色の点を見るように促した．**図 7** に実際に実験に使用したアプリケーションの画面を示す．

4.4　結果

それぞれの従属変数に対してノンパラメトリックな分散分析手法である整列ランク変換（ART）[56], [57], [58] を行い，混合モデル REML を用いてデータを評価した．多重比較にはウィルコクソンの符号順位検定を用い，Holm 法 [59] による補正を用いた．SUS と NASA-TLX によって得られた値はウィルコクソンの符号順位検定を用い，Holm 法による補正を用いた．また，データの可視化や統計分析のためにターゲットの有効幅（EW）[15] を用いた．ター

© 2021 Information Processing Society of Japan

表 1　TW と S の組合せ
Table 1　Combination of target width (TW) and spacing (S).

	ターゲットの有効幅（EW）								
	20	25	30	32	40	48	52	65	78
TW	20	20	20	32	32	32	52	52	52
S	0	5	10	0	8	16	0	13	26

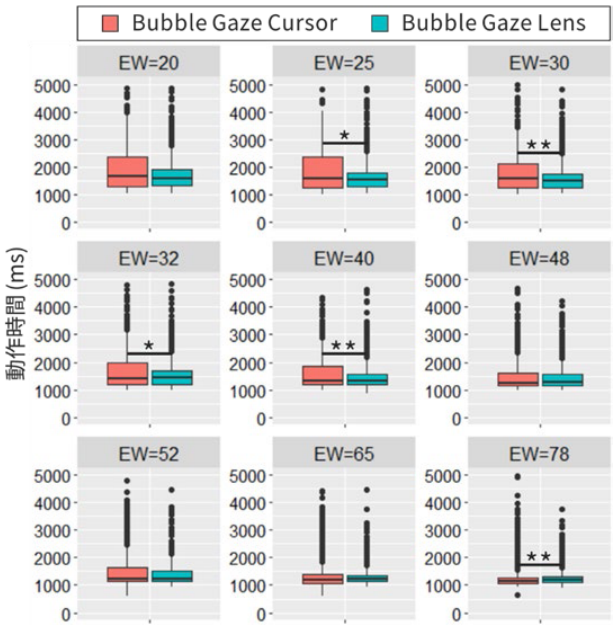

図 8　EW に対する動作時間（有意差：$*p < .05$，$**p < .01$）
Fig. 8　Movement time by effective width. Statistical significance: $*p < .05$, $**p < .01$.

ゲットの有効幅はバブルカーソルによって実質的に拡大されるターゲット幅を指し，TW と S から計算できる．ゆえに 9 つの EW（**表 1**：20，25，30，32，40，48，52，65，78 ピクセル（それぞれ 0.44，0.55，0.66，0.71，0.88，1.06，1.15，1.44，1.72°））が得られる．

4.4.1　動作時間

カーソルの種類 CT，視線からターゲットまでの距離 D，ターゲットの有効幅 EW を独立変数とし，動作時間を従属変数として分析を行った．動作時間に対して CT（$F_{1,10956} = 13.18, p < .01$），D（$F_{2,10954} = 44.75, p < .01$），EW（$F_{8,10954} = 190.72, p < .01$）に有意な差が確認された．さらに 1 次の交互作用として CT × EW（$F_{8,10954} = 13.52$，$p < .01$）が確認された．**図 8** にターゲットの有効幅に対する CT ごとの動作時間を示す．

4.4.2　エラー率

カーソルの種類 CT，視線からターゲットまでの距離 D，ターゲットの有効幅 EW，を独立変数とし，エラー率を従属変数として分析を行った．エラー率に対して CT（$F_{1,16127} = 1980.39$，$p < .01$），EW（$F_{8,16127} = 508.26$，$p < .01$）に有意な差が確認された．さらに 1 次の交互作用として CT × D（$F_{2,16127} = 45.92$，$p < .01$），

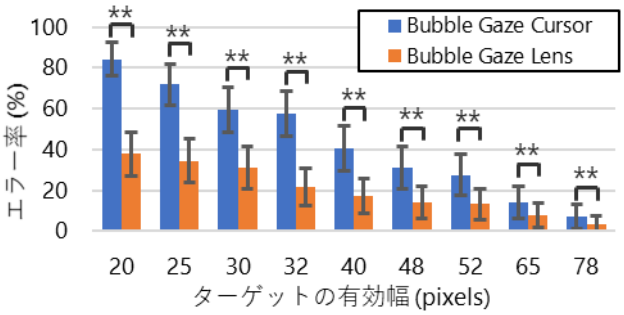

図 9　EW に対するエラー率（有意差：$*p < .05$，$**p < .01$）
Fig. 9　Error rate by effective width. Statistical significance: $*p < .05$, $**p < .01$.

表 2　CT ごとの成功タスク数とエラー率（CT と EW の組合せごとの総タスク数は 900）
Table 2　Number of successful tasks and error rate by cursor type. All combination of cursor type and effective width had 900 tasks in total.

	ターゲットの有効幅（EW）									
	20		25		30		32		40	
	tasks	error	tasks	error	tasks	error	tasks	error	tasks	error
Cursor	142	84%	252	72%	363	60%	381	58%	535	41%
Lens	560	38%	589	35%	619	31%	707	21%	743	17%

	ターゲットの有効幅（EW）							
	48		52		65		78	
	tasks	error	tasks	error	tasks	error	tasks	error
Cursor	619	31%	653	27%	774	14%	835	7.2%
Lens	774	14%	781	13%	831	7.7%	868	3.6%

表 3　D に対するエラー率
Table 3　Error rate by Ds.

D	Bubble Gaze Cursor	Bubble Gaze Lens	Bubble Gaze Lens (When the lens is activated)
350	41.18%	23.15%	6.33%
550	43.78%	20.67%	6.94%
800	46.07%	16.48%	8.46%

CT × EW（$F_{8,16127} = 152.17$，$p < .01$），D × EW（$F_{16,16127} = 1.94$，$p < .05$），2 次の交互作用として CT × D × EW（$F_{16,16127} = 5.44$，$p < .01$）が確認された．**図 9** と**表 2** にターゲットの有効幅に対する CT ごとのエラー率を，**表 3** に D に対するエラー率を示す．

Bubble Gaze Lens におけるエラーがいつ発生したか調べたところ，全体のエラーの 72.79%が，拡大レンズが起動しなかった場合に発生していた．ゆえに Bubble Gaze Lens のエラーの多くはキネマティックトリガが正しく動作しなかったことに起因しているといえる．また，レンズ内にターゲットを含まない位置で拡大レンズが開いた割合は全試行の 0.95%であり，27.21%のエラー試行のうち 3.49%で

© 2021 Information Processing Society of Japan

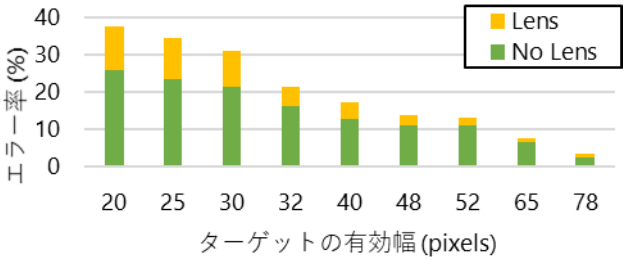

図 10　EW ごとの，拡大レンズが起動した際のエラー（Lens）と拡大レンズが起動しなかった際のエラー（No Lens）の割合

Fig. 10　Inappropriate activation (Lens)/non-activation (No Lens) of the magnifying lens at different effective width.

表 4　EW ごとのエラー率，拡大レンズが起動した際のエラー率，拡大レンズが起動しなかった際のエラー率

Table 4　Error rate and inappropriate activation (Lens)/non-activation (No Lens) of the magnifying lens at different effective width.

	ターゲットの有効幅（EW）								
	20	25	30	32	40	48	52	65	78
Error rate (%)	37.78	34.56	31.22	21.44	17.44	14.00	13.22	7.67	3.56
Activation error rate (%)	11.75	10.94	9.66	5.21	4.51	2.98	2.20	1.08	0.86
Non-activation error rate (%)	26.03	23.62	21.56	16.23	12.93	11.02	11.02	6.59	2.70

あった．図 10 と表 4 にターゲットの有効幅に対する，レンズが開いたときのエラーとレンズが開かなかったときのエラーの割合を示す．

4.4.3　キネマティックトリガが失敗した割合

視線からターゲットまでの距離 D，ターゲットの有効幅 EW を独立変数とし，キネマティックトリガが失敗した割合を従属変数として分析を行った．キネマティックトリガが失敗した割合に対して D（$F_{2,7977.1} = 44.31$，$p < .01$），EW（$F_{8,7977.0} = 8.50$，$p < .01$）に有意な差が確認された．さらに 1 次の交互作用として D× EW（$F_{16,7977.0} = 2.05$，$p < .01$）が確認された．図 11 にターゲットの有効幅に対するキネマティックトリガが失敗した割合を，表 5 に D に対する失敗した割合，失敗した数，全試行数を示す．キネマティックトリガが失敗した平均割合は 28.37%であった．

4.4.4　System Usability Scale（SUS）

得られたスコアに対してウィルコクソンの符号順位検定を用いて分析した．Bubble Gaze Cursor と Bubble Gaze Lens の平均 SUS スコアはそれぞれ 60.88 と 70.13 であり，有意な差が確認された（$Z = 3.11$，$p < .01$）．SUS の質問項目ごとの結果を図 12 に示す．

4.4.5　NASA Task Load Index（NASA-TLX）

NASA-TLX によって得られた 6 つの項目に対するスコアと Overall スコアに対して，ウィルコクソンの符号順位検定を用いて分析した．Bubble Gaze Cursor と Bubble Gaze Lens の平均 Overall スコアはそれぞれ 46.10 と 34.57 であった．また CT に対して Mental（$Z = 3.04$，$p < .01$），Physical（$Z = 2.47$, $p < .05$），Overall workload（$Z = 2.92$，$p < .01$）に有意な差が確認された．NASA-TLX の項目ごとの結果を図 13 に示す．

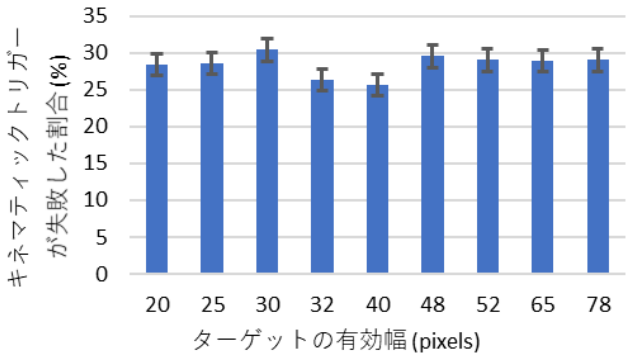

図 11　ターゲットの有効幅に対するキネマティックトリガが失敗した割合

Fig. 11　Kinematic trigger failure rate by effective width.

表 5　D に対するキネマティックトリガが失敗した割合，失敗した数，全試行数

Table 5　Kinematic trigger failure rate and number of failures and number of all tasks by Ds.

D	失敗した割合	失敗した数	全試行数
350	40.04%	1075	2685
550	30.40%	816	2684
800	14.51%	385	2654

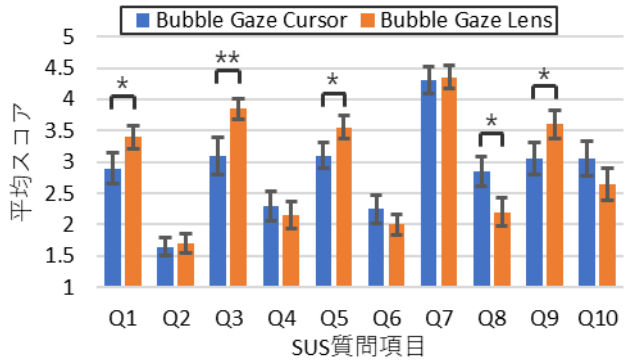

図 12　CT ごとの SUS スコア（有意差：$*p < .05$，$**p < .01$）

Fig. 12　SUS score by cursor type.　Statistical significance: $*p < .05$, $**p < .01$.

4.5　実験結果のまとめ

Bubble Gaze Lens は Bubble Gaze Cursor よりも多くの EW に対して高速であった．しかし，EW = 20 のときに有意に高速ではなかった．これは Bubble Gaze Cursor のエラー率が高く（84%），十分なデータ数が確保できなかったためだと考えられる．そして，EW = 78 のときに

© 2021 Information Processing Society of Japan

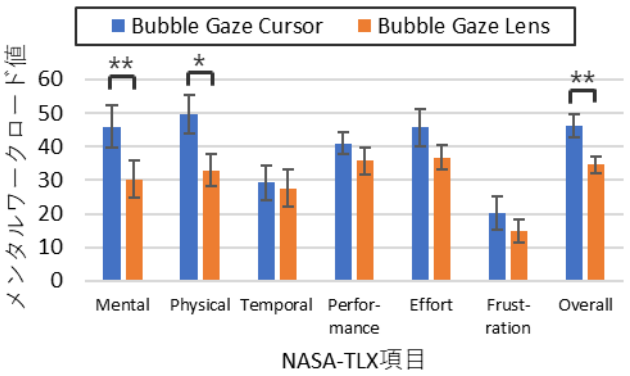

図 13　CT ごとの NASA-TLX スコア（有意差：$*p < .05$, $**p < .01$）

Fig. 13　NASA-TLX score by cursor type. Statistical significance: $*p < .05$, $**p < .01$.

Bubble Gaze Lens は Bubble Gaze Cursor よりも有意に遅くなった．

また，Bubble Gaze Lens はエラー率を 54.0%削減した．ただし，平均エラー率は 20.10%，最も高いエラー率（EW = 20）は 37.78%であった．このエラーの原因の大半はキネマティックトリガが正常に動作せず，拡大レンズが起動しなかったためである．キネマティックトリガの平均エラー率は 28.37%，最も高いエラー率（D = 350）は 40.04%であった．最後に，ユーザビリティとメンタルワークロードの両方において，Bubble Gaze Cursor よりも Bubble Gaze Lens の方が優れていた．

5.　議論

5.1　得られた従属変数に対する考察

5.1.1　動作時間

実験結果より，多くの EW に対して Bubble Gaze Lens の方が Bubble Gaze Cursor よりも高速に動作した．一方で，EW が大きくなるほど動作時間の差が小さくなり，EW = 78 においては動作時間が逆転した．Bubble Gaze Lens は拡大レンズの起動による画面レイアウトの変更が原因で，最善な軌道における通常のポインティングよりも動作時間が大きくなる．なぜなら，画面レイアウトが変わった瞬間にサッケード計画が必要になり，200 ms 程度視線の動きが止まる（潜時）ためである．ゆえに，Bubble Gaze Lens においてもバブルレンズと同様に拡大レンズを用いない方が，動作時間が早くなる閾値が存在すると考えられる．今回の実験より，この閾値は EW = 78 付近に存在すると考えられる．ただし，ユーザごとに視線ポインティングの精度に差があるため，閾値は個別に設定を行う必要があると考えられる．

5.1.2　エラー率

実験結果より，Bubble Gaze Lens は大幅にエラー率を改善した（図 9）．しかし，実用に耐えうるほどの高精度を達成することはできなかった．キネマティックトリガが失敗した割合が EW ごとに大きく変化しなかった（図 11）ことから，エラー率の主な原因はキネマティックトリガが上手く動作しなかったことがあげられる．一方で，拡大レンズが起動した場合においても，エラー率は EW が小さい場合において高くなっている．拡大倍率が 4 であるため，EW = 20 のときターゲットは拡大レンズによって 80 ピクセルまで拡大される．しかし EW = 20 における拡大レンズが起動したときのエラー率は EW = 78 のときのエラー率よりも高い値が記録されている（表 2）．これは潜時による拡大レンズ起動時の視線の固定が原因であると考えられる．拡大レンズが起動すると，視線座標の直近のターゲットがバブルカーソルの最大幅より近い場合，直近のターゲットが選ばれている状態で潜時が発生する．ここで選択されているターゲットが目標ターゲット以外のターゲットだとすると，200 ms 程度，間違ったターゲットに視線を固定した状態から視線の移動が始まる．そして，4 倍に拡大されたターゲット領域から視線を外そうとする途中で，間違ったターゲットが選択されることが起こりうる．この現象がレンズ起動時のエラー率の高さにつながっていると考えられる．したがって，拡大レンズが起動してから 200 ms 程度の時間は滞留時間に含めないことでエラー率を減らすことができると考えられる．

また表 3 より，D に対するエラー率は Bubble Gaze Cursor と Bubble Gaze Lens で異なる様相を示した．前者では D が増加するほどエラー率が増加し，後者では D が増加するほどエラー率が減少した．まず，Bubble Gaze Cursor において D が増加するほどエラー率が増加した理由は，離心率の増加にともなう Saccadic Error（ターゲット座標とサッケード着陸地点間の距離）の増加 [60] が原因だと考えられる．本稿で行った実験は非常に高密度なターゲット群へのポインティングであったため，この Saccadic Error が大きく影響したと考えられる．ゆえに，サッケードの離心率に応じた滞留時間調整などを行うことによって，より快適なポインティングにつながる可能性がある．次に Bubble Gaze Lens において D が大きくなるほどエラー率が減少した理由は，D が大きくなるほどキネマティックトリガが失敗した割合が小さくなる（表 3）ためだと考えられる．ただし，拡大レンズ起動時におけるエラー率から，Bubble Gaze Lens においても Bubble Gaze Cursor のように D の増大によるエラー率増加の影響は存在していると考えられるため，Bubble Gaze Cursor と同様にサッケードの離心率に応じた対応を行うことでユーザビリティをより高めることができると考えられる．

5.1.3　キネマティックトリガが失敗した割合

実験結果より，EW ごとのキネマティックトリガが失敗した割合の誤差は最大 5%程度であり，データの傾向は確認できなかった．そして，D に対するその割合は最大で 26%異なり，D が大きくなるほどキネマティックトリ

© 2021 Information Processing Society of Japan

ガが失敗した割合は小さくなった．本実装におけるキネマティックトリガは，2 次サッケードの検出を行うアルゴリズムである．2 次サッケードは視線とターゲット中心間の距離が大きくなればなるほど発生する割合が大きくなることが以前の研究で明らかになっており [61]，本実験の結果とも一致する（表 5）．しかし，すべてのサッケードに 2 次サッケードが含まれることはない．これは 2 次サッケードをトリガとすることの限界が表れている．特に近距離に対するトリガとしては，キネマティックトリガは不十分だといえる．また，キネマティックトリガのアルゴリズムの改善が必要だと考えられる．現在のアルゴリズムの 2 次サッケード検出は速度閾値を用いる手法 [62] であり，検出精度は低い．2 次サッケードの検出手法は様々提案されているが，基本的にオフラインにおけるデータ分析を前提とした手法である [63]．ゆえに動的な 2 次サッケードの検出手法を検討していく必要がある．

5.1.4 SUS，NASA-TLX

SUS, NASA-TLX のアンケートの結果より, Bubble Gaze Lens は Bubble Gaze Cursor はユーザビリティとメンタルワークロードの両方において優れていた．まず，SUS においては Q1，Q3，Q5，Q8，Q9 で有意差が確認された．これらの設問は手法の使いやすさに関するものである．ゆえに，Bubble Gaze Lens は Bubble Gaze Cursor よりも操作しやすい手法だと実験参加者が評価したといえる．これは提案手法のエラー率の低さが高評価につながったと考えられる．また，Bubble Gaze Lens の SUS スコアは 70.13 であり，SUS の平均スコア 68 [64] を超えている．したがって，視線操作に適していないタスクにおいて，Bubble Gaze Lens は平均よりも高いユーザビリティを記録した手法だといえる．

次に，NASA-TLX においては Mental Demand，Physical Demand において有意差が存在した．つまり，Bubble Gaze Lens は Bubble Gaze Cursor よりも精神的・肉体的な要求が低い手法だといえる．このような結果が得られた要因として，SUS スコアと同様，Bubble Gaze Lens の低いエラー率が影響したと考えられる．

5.2 制限

本研究で用いたアイトラッカーは非常に安価（約 2 万円）であり，サンプリングレートは 90 Hz である．このサンプリングレートはマイクロサッケード（短いサッケード）を取得するには非常に小さい値である [65], [66] ため，2 次サッケードの検出に適していない．2 次サッケードのピーク速度を正確に検出するためには 240 Hz 以上のサンプリングレートを有したアイトラッカーを用いる必要がある [65] が，そういったアイトラッカーは非常に高価である．

また，サンプリングレートを補う手法として視線データにアップサンプリングを行う手法が提案されている [66]．この手法によって低いサンプリングレートであっても 2 次サッケードの検出精度を向上させることができるが，この手法はオフラインを前提とした手法であり，リアルタイムでの適用は難しい．ゆえに本研究では用いなかった．

5.3 今後の課題

今後の課題として，まずキネマティックトリガのアルゴリズムの改善があげられる．確実に 2 次サッケードが検出できるようになった場合における提案手法の有用性を調べることによって，2 次サッケードを利用した視線インタラクションの可能性がより明らかになると考えられる．次に，2 次サッケード以外のトリガの検討があげられる．2 次サッケードをトリガとすることに限界がある以上，別の入力などを組み合わせることによって，拡大レンズ起動の頻度や精度を向上させることを目指す必要がある．トリガとして考えられるものとして，ターゲット選択時における瞳孔情報 [67] などが 1 つの候補である．最後に，私たちはエリアカーソル法の一種であるバブルレンズを視線操作インタフェースに適用したが，ほかにも検討すべきエリアカーソル法は存在する [68], [69]．ゆえに，それらが視線入力に適しているかどうか検討が必要だといえる．

6. おわりに

本稿では視線操作インタフェースにおける，密集した小さなターゲットに対するポインティングを容易にすることを目的として，バブルレンズを視線操作インタフェースに用いる手法 Bubble Gaze Lens を提案した．既存手法である Bubble Gaze Cursor と Bubble Gaze Lens を比較するポインティングタスクを行ったところ，Bubble Gaze Lens は既存手法である Bubble Gaze Cursor よりも動作時間，エラー率，ユーザビリティ，メンタルワークロードの点において優れていた．一方でエラー率はいまだに高く，現状の提案手法は実用に適してはいない．したがって，高いサンプリングレートのアイトラッカーを用いることや，キネマティックトリガのアルゴリズムの改善などによって，改善を試みていく必要がある．

謝辞 本研究はノーステック財団「研究開発助成事業」の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Bolt, R.A.: Eyes at the interface, *Proc. CHI '82*, pp.360–362 (1982).
[2] Tanriverdi, V. and Jacob, R.J.K.: Interacting with eye movements in virtual environments, *Proc. CHI '00*, pp.265–272 (2000).
[3] Pfeuffer, K., Mayer, B., Mardanbegi, D. and Gellersen, H.: Gaze + pinch interaction in virtual reality, *Proc. SUI '17*, pp.99–108 (2017).
[4] Sibert, L.E. and Jacob, R.J.K.: Evaluation of eye gaze interaction, *Proc. CHI '00*, pp.281–288 (2000).

© 2021 Information Processing Society of Japan

[5] Mateo, J.C., Agustin, J.S. and Hansen, J.P.: Gaze beats mouse: Hands-free selection by combining gaze and emg, *Proc. CHI EA '08*, pp.3039–3044 (2008).

[6] MacKenzie, I.S.: An eye on input: Research challenges in using the eye for computer input control, *Proc. ETRA '10*, pp.11–12 (2010).

[7] Lankford, C.: Effective eye-gaze input into Windows, *Proc. ETRA '00*, pp.23–27 (2000).

[8] Ashmore, M., Duchowski, A.T. and Shoemaker, G.: Efficient eye pointing with a fisheye lens, *Proc. GI '05*, pp.203–210 (2005).

[9] Hansen, D.W., Skovsgaard, H.H.T., Hansen, J.P. and Møllenbach, E.: Noise tolerant selection by gaze-controlled pan and zoom in 3D, *Proc. ETRA '08*, pp.205–212 (2008).

[10] Menges, R., Kumar, C., Müller, D. and Sengupta, K.: GazeTheWeb: A Gaze-Controlled Web Browser, *Proc. W4A '17*, Article 25, 2 pages (2017).

[11] Skovsgaard, H., Mateo, J.C., Flach, J.M. and Hansen, J.P.: Small-target selection with gaze alone, *Proc. ETRA '10*, pp.145–148 (2010).

[12] Raudsandmoen, H. and Rødsjø, B.: Empirically Based Design Guidelines for Gaze Interaction in Windows 7, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology (2012).

[13] Kabbash, P. and Buxton, W.A.S.: The "prince" technique: Fitts' law and selection using area cursors, *Proc. CHI '95*, Katz, I.R., Mack, R., Marks, L., Rosson, M.B. and Nielsen, J. (Eds.), pp.273–279 (1995).

[14] Worden, A., Walker, N., Bharat, K. and Hudson, S.: Making computers easier for older adults to use: Area cursors and sticky icons, *Proc. CHI '97*, pp.266–271 (1997).

[15] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: The bubble cursor: enhancing target acquisition by dynamic resizing of the cursor's activation area, *Proc. CHI '05*, pp.281–290 (2005).

[16] 崔　明根，坂本大介，小野哲雄：Bubble Gaze Cursor：バブルカーソル法の視線操作への適用，情報処理学会論文誌，Vol.61, No.2, pp.221–232 (2020).

[17] Mott, M.E. and Wobbrock, J.O.: Beating the bubble: Using kinematic triggering in the bubble lens for acquiring small, dense targets, *Proc. CHI '14*, pp.733–742 (2014).

[18] Feit, A.M., Williams, S., Toledo, A., Paradiso, A., Kulkarni, H., Kane, S. and Morris, M.R.: Toward Everyday Gaze Input: Accuracy and Precision of Eye Tracking and Implications for Design, *Proc. CHI '17*, pp.1118–1130 (2017).

[19] Schuetz, I., Murdison, T.S., MacKenzie, K.J. and Zannoli, M.: An Explanation of Fitts' Law-like Performance in Gaze-Based Selection Tasks Using a Psychophysics Approach, *Proc. CHI '19*, pp.535–547 (2019).

[20] Orquin, J.L. and Holmqvist, K.: Threats to the validity of eye-movement research in psychology, Behavior Research Methods, Vol.50, pp.1645–1656 (2018).

[21] Špakov, O.: Comparison of eye movement filters used in HCI, *Proc. ETRA '12*, Spencer, S.N. (Ed.), pp.281–284 (2012).

[22] Hornof, A.J. and Cavender, A.: EyeDraw: Enabling children with severe motor impairments to draw with their eyes, *Proc. CHI '05*, pp.161–170 (2005).

[23] Jacob, R.J.K.: Eye movement-based human-computer interaction techniques: Toward non-command interfaces, *Advances in Human-Computer Interaction*, Vol.4, p.151–190 (1993).

[24] Kumar, M., Klingner, J., Puranik, R., Winograd, T. and Paepcke, A.: Improving the accuracy of gaze input for interaction, *Proc. ETRA '08*, pp.65–68, ACM (2008).

[25] Jimenez, J., Gutiérrez, D. and Latorre, P.: Gaze-based Interaction for Virtual Environments, *Journal of Universal Computer Science*, Vol.14, No.19, pp.3085–3098 (2008).

[26] Wood, E. and Bulling, A.: EyeTab: Model-based gaze estimation on unmodified tablet computers, *Proc. ETRA '14*, pp.207–210 (2014).

[27] Zhang, X., Feng, W. and Zha, H.: Effects of Different Visual Feedback Forms on Eye Cursor's Stabilities, *IDGD '11*, Vol.6775, pp.273–282 (2011).

[28] Fitts, P.M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, No.6, pp.381–391 (1954).

[29] MacKenzie, I.S.: Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction, *Human Computer Interaction*, Vol.7, No.1, pp.91–139 (1992).

[30] Zhai, S., Conversy, S., Beaudouin-Lafon, M. and Guiard, Y.: Human on-line response to target expansion, *Proc. CHI '03*, pp.177–184 (2003).

[31] McGuffin, M. and Balakrishnan, R.: Acquisition of expanding targets, *Proc. CHI '02*, pp.57–64 (2002).

[32] Kumar, M., Paepcke, A., and Winograd, T., Winograd, T.: EyePoint: Practical pointing and selection using gaze and keyboard, *Proc. CHI '07*, pp.421–430 (2007).

[33] Bates, R. and Istance, H.: Zooming interfaces!: Enhancing the performance of eye controlled pointing devices, *Proc. Assets '02*, pp.119–126 (2002).

[34] Pfeuffer, K. and Gellersen, H.: Gaze and Touch Interaction on Tablets, *Proc. UIST '16*, pp.301–311 (2016).

[35] Klamka, K., Siegel, A., Vogt, S., Göbel, F., Stellmach, S. and Dachselt, R.: Look & Pedal: Hands-free Navigation in Zoomable Information Spaces through Gaze-supported Foot Input, *Proc. ICMI '15*, pp.123–130 (2015).

[36] Skovsgaard Hegner Jensen, H.T., Hansen, J.P. and Mateo, J.C.: How Can Tiny Buttons Be Hit Using Gaze Only?, *Proc. COGAIN '08*, pp.38–42 (2008).

[37] Špakov, O. and Miniotas, D.: Gaze-based selection of standard-size menu items, *Proc. ICMI '05*, pp.124–128 (2005).

[38] Morimoto, C.H., Leyva, J.A.T. and Diaz-Tula, A.: Context switching eye typing using dynamic expanding targets, *Proc. COGAIN '18*, Article 6, 9 pages (2018).

[39] Miniotas, D., Špakov, O. and MacKenzie, I.S.: Eye gaze interaction with expanding targets, *Proc. CHI EA '04*, pp.1255–1258 (2004).

[40] Barz, M., Daiber, F., Sonntag, D. and Bulling, A.: Error-aware gaze-based interfaces for robust mobile gaze interaction, *Proc. ETRA '18*, Article 24, 10 pages (2018).

[41] Fortune, S.: A sweepline algorithm for Voronoi diagrams, *Algorithmica*, Vol.2, No.1, pp.153–174 (1987).

[42] Meyer, D.E., Keith-Smith, J.E., Kornblum. S., Abrams, R.A. and Wright, C.E.: Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action, *Attention and Performance 13: Motor representation and control*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Hillsdale, pp.73–226 (1990).

[43] Henson, D.B.: Corrective saccades: Effects of altering visual feedback, *Vision Research*, Vol.18, No.1, pp.63–67 (1978).

© 2021 Information Processing Society of Japan

[44] Prablanc, C., Massé, D. and Echallier, J.F.: Error-correcting mechanisms in large saccades, *Vision Research*, Vol.18, No.5, pp.557–560 (1978).
[45] Becker, W. and Fuchs, A.F.: Further properties of the human saccadic system: Eye movements and correction saccades with and without visual fixation points, *Vision Research*, Vol.9, No.10, pp.1247–1258 (1969).
[46] Weber, R.B. and Daroff, R.B.: Corrective movements following refixation saccades: Type and control system analysis, *Vision Research*, Vol.12, No.3, pp.467–475 (1972).
[47] Sen, T. and Megaw, T.: The Effects of Task Variables and Prolonged Performance on Saccadic Eye Movement Parameters, *Advances in Psychology*, Vol.22, pp.103–111 (1984).
[48] Olsen, A. and Matos, R.: Identifying parameter values for an I-VT fixation filter suitable for handling data sampled with various sampling frequencies, *Proc. ETRA '12*, pp.317–320 (2012).
[49] Fang, Y., Nakashima, R., Matsumiya, K., Kuriki, I. and Shioiri, S.: Eye-head coordination for visual cognitive processing, *PLoS One*, Vol.10, No.3, 17 pages (2015).
[50] Hu, Z., Li, S., Zhang, C., Yi, K., Wang, G. and Manocha, D.: DGaze: CNN-Based Gaze Prediction in Dynamic Scenes, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.26, No.5, pp.1902–1911 (2020).
[51] Becker, W. and Jürgens, R.: An analysis of the saccadic system by means of double step stimuli, *Vision Research*, Vol.19, No.9, pp.967–983 (1979).
[52] Bahill, A.T. and Stark, L.: Overlapping saccades and glissades are produced by fatigue in the saccadic eye movement system, *Experimental Neurology*, Vol.48, No.1, pp.95–106 (1975).
[53] Bahill, A.T., Clark, M.R. and Stark, L.: Dynamic overshoot in saccadic eye movements is caused by neurological control signal reversals, *Experimental Neurology*, Vol.48, No.1, pp.107–122 (1975).
[54] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, *Usability evaluation in industry*, pp.189–194 (1996).
[55] Hart, S.G. and Staveland, L.E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, Human Mental Workload, *Advances in Psychology*, Vol.52, pp.139–183 (1988).
[56] Higgins, J.J. and Tashtoush, S.: An aligned rank transform test for interaction, *Nonlinear World*, Vol.1, No.2, pp.201–211 (1994).
[57] Salter, K.C. and Fawcett, R.F.: The art test of interaction: A robust and powerful rank test of interaction in factorial models, *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, Vol.22, No.1, pp.137–153 (1993).
[58] Wobbrock, J.O., Findlater, L., Gergle, D. and Higgins, J.J.: The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures, *Proc. CHI '11*, pp.143–146 (2011).
[59] Holm, S.: A simple sequentially rejective Bonferroni test procedure, *Scandinavian Journal of Statistics*, Vol.6, pp.65–70 (1979).
[60] Yao, L. and Peck. C.K.: Saccadic eye movements to visual and auditory targets, *Experimental Brain Research*, No.115, pp.25–34 (1997).
[61] Weber, R.B. and Daroff, R.B.: The metrics of horizontal saccadic eye movements in normal humans, *Vision Research*, Vol.11, No.9, pp.921–928 (1971).
[62] Salvucci, D.D. and Goldberg, J.H.: Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols, *Proc. ETRA '00*, pp.71–78 (2000).
[63] Nyström, M. and Holmqvist, K.: An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data, *Behavior Research Methods*, Vol.42, pp.188–204 (2010).
[64] Brooke, J.: SUS: A Retrospective, *Journal of Usability Studies*, Vol.8, No.2, pp.29–40 (2013).
[65] Wierts, R., Janssen. M.J.A. and Kingma. H.: Measuring Saccade Peak Velocity Using a Low-Frequency Sampling Rate of 50 Hz, *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, Vol.55, No.12, pp.2840–2842 (2008).
[66] Mack, D.J., Belfanti, S. and Schwarz, U.: The effect of sampling rate and lowpass filters on saccades – A modeling approach, *Behavior Research Methods*, Vol.49, No.6, pp.2146–2162 (2017).
[67] Strauch, C., Ehlers, J. and Huckauf, A.: Pupil-Assisted Target Selection (PATS), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2017*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.10515, pp.297–312 (2017).
[68] Chapuis, O., Labrune, J.-B. and Pietriga, E.: DynaSpot: Speed-dependent area cursor, *Proc. CHI '09*, pp.1391–1400 (2009).
[69] Cheung, J.K., Cheung, J.K. and Zhu, K.: Additive Voronoi Cursor: Dynamic Effective Areas Using Additively Weighted Voronoi Diagrams, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2019*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.11748, pp.273–292 (2019).

付　　録

A.1 SUS の質問項目

1. この操作手法をしばしば利用したいと思う．
2. この操作手法を利用するには説明が必要となるほど複雑であると感じた．
3. この操作手法を容易に使いこなすことができると思った．
4. この操作手法を利用するのに専門家のサポートが必要だと感じる．
5. この操作手法では様々な機能がよくまとまっていると感じた．
6. この操作手法には一貫性のないところが多々あったと感じた．
7. たいていの人は，この操作手法の利用方法をすぐに理解すると思う．
8. この操作手法はとても操作しづらいと感じた．
9. この操作手法を利用できる自信がある．
10. この操作手法を利用し始める前に知っておくべきことが多くあると思う．

© 2021 Information Processing Society of Japan

崔 明根　（正会員）

北海道大学大学院情報科学院．

坂本 大介　（正会員）

2008 年公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科博士（後期）課程修了．博士（システム情報科学）．国際電気通信基礎技術研究所（ATR）でインターン，東京大学で日本学術振興会特別研究員 PD，JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト研究員，東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻助教，特任講師を経て現在，北海道大学大学院情報科学研究科准教授．人とロボットを含む情報環境とのインタラクション設計に関する研究に従事．

小野 哲雄　（正会員）

1997 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了．同年（株）ATR 知能映像通信研究所客員研究員．2001 年公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科助教授，2005 年同学科教授．2009 年北海道大学大学院情報科学研究科教授，現在に至る．博士（情報科学）．ヒューマンエージェント/ロボットインタラクション（HAI/HRI），インタラクティブシステムに関する研究に従事．電子情報通信学会，ヒューマンインタフェース学会，認知科学会，ACM 各会員．

© 2021 Information Processing Society of Japan