

## VR 空間における視線とコントローラを用いた 2D ポインティング手法の検討 A study on 2D pointing method using gaze and a controller device in VR space

柿沼 育<sup>†</sup>      小宮山 摂<sup>‡</sup>  
Ikumu Kakinuma      Setsu Komiya

### 1. はじめに

現実世界において、ブラウザのような 2D 画面による情報表示形式が一般化しているため、VR 空間においても好まれる手法である。入力のインタラクション方法として、VR では一般にコントローラや HMD (Head Mounted Display) から Ray を飛ばす直接制御型ポインティングが用いられるが、VR 空間内の 2D 画面に対して用いる場合はいくつかの問題が生じる。

まず、VR 空間では対象との距離関係が様々である点である。手が届く距離の場合、Ray によるポインティングは、手でタッチするなどの直接的なインタラクションと比べて不自然な行為である。反対に遠い場合は、その距離に比例してポインタの感度が高くなるため、小さな対象をポインティングすることが困難になる。

次に身体への負担である。一般にコントローラの Ray を用いた手法では、対象に向かって腕を空中に伸ばして静止させる動作をする必要があるが、日常生活であまり行わない動作であり負担になる可能性がある。顔の正面すなわち HMD の正面方向に Ray を飛ばす方法では、機器の整備等のシミュレーションに用いる場合など、身体が対象の 2D 画面と正対していない時は、首を大きくひねるなど身体的に無理な操作を強いられる事も考えられる。

また、近年アイトラッキング機能を有する HMD が発表されており、視線のみによるポインティング操作が可能となっているが、注視選択における「対象を見続ける」という動作も日常的ではなく、非常に負担になる。

以上のように、VR 空間内の 2D 画面オブジェクトに対するポインティングではコントローラ単独や視線単独で Ray を飛ばす方法は身体的負担が大きいと考えられ、より負担の少ない手法が望まれる。そこで本研究では、コントローラと視線を併用する手法を実装し、様々な条件でポインティング作業時間と疲労度の評価実験を行い、VR 空間内の 2D 画面に対するユーザフレンドリーなポインティング手法について考察する。

### 2. 先行研究

視線によるインタラクションの研究は VR が登場する前から行われている。Linda E. Sibert 等は、PC の GUI 上のポインタでの選択をパッドによる操作と視線によるものを比較し、後者の方がより早く物体を選択することができることを示した[1]。しかし、注視による物体選択は Midas Touch 問題を引き起こす可能性があることを Robert J. K. Jacob などは主張している[2]。Midas Touch 問題とは、対象の目視が、確認のためであるか選択のためであるかを区別する事ができない事である。例えば、PC のアイコンをクリックしようとするれば、人は一度アイコンの場所を確認するため目視するが、これがシステム上ではどちらの動作区

別できない。これが選択だと判定された場合、意図しない選択が発生し不便である。Midas Touch を避ける試みとして MAGIC という独自手法を用いた研究もされている[3]。これは視線はあくまでポインタの大まかな移動のみを行い、対象物までの移動のような細かい動きは従来のパッドによる手の操作で行うといったものであり、実際に GUI 上でパッド操作より選択までにかかる時間が短いことが確認されている。

最近では VR での事例も多い。Cournia 等は VR 空間において、注視選択と Ray を用いたコントローラでの選択の比較を行い、注視選択の方が選択するまでに時間がかかることを示し、視線を用いる事自体の明確な利点は見つけられなかったとしている[4]。Ken Pfeuffer 等は視線による入力に、両指のジェスチャを併用するシステムを提案した[5]。これは 2D, 3D の物体を、選択だけでなく拡大縮小や移動を直感的に操作することを可能にしたが、指による直接制御は身体的負担を解決できていない。また小さな UI に対しての操作は MAGIC を参考にしており、ポインタを対象の近くまで移動させることにのみ視線は使用されている。

このように視線入力に他デバイスを組み合わせることで、インターフェースの利便性を高められる可能性は大きいですが、ターゲットの大きさの影響や視線から手の操作に切り替わるタイミングなどの詳細な検討がなされていない。そこで本研究では、視線に VR システムで良く用いられるコントローラ操作を組み合わせたシステムを実装し、評価実験によりポインティング操作を詳細に調査する。

### 3. ポインティング手法

前述したように、一般に VR 空間では直接制御型のポインティングが用いられる。今回の実験では後述する「視線」、「コントローラ」の手法が該当する。これはいわゆる指示棒のように対象を直接ポインティングする手法である。一方、間接制御型のポインティングはコンピュータのパッドのような、操作対象との座標系が異なるものごとを指す。以下より今回の実験に使用するポインティング手法について説明する。

#### 3.1 視線

視線の検出には Tobii Pro の搭載された HTC Vive[6]を使用する。視線でのポインティングには Ray を使い、上記の HMD で検出した視線方向に、VR 空間上で Ray を生成、衝突判定の発生した場所にポインタを表示する形式をとる。

<sup>†</sup> 青山学院大学大学院理工学研究科, Department of Integrated Information Technology, College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

<sup>‡</sup> 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科, Course of Information Technology, College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University.

物体の選択には注視選択を用い、選択に必要な注視時間は 1 秒とする。また、フィードバックとして注視時間に比例して状態が変化する円をポインタに付与し、注視時間が 0.5 秒を超えると出現し円が描かれ始め、1 秒になると円が完成する。この手法では実験のはじめに Tobii Pro のキャリブレーションを行い、実験中においても計測のズレが気になった場合、実験データに影響が出ないタイミングで再度キャリブレーションすることを許可する。

### 3.2 コントローラ

コントローラには HTC Vive 付属のコントローラを用い、VR 空間内でコントローラの先端から Ray を発生させ、衝突判定の発生した場所にポインタを表示する形式をとる。コントローラは HTC Vive のベースステーションによってトラッキングされており、操作によって発生した傾きが逐次 VR 空間上に伝達される。物体の選択には、トリガーボタンを使用し、一般的なパッドと同じく、ボタンを離れた瞬間を入力タイミングとした験者は椅子に座わり HMD を装着する。

### 3.3 視線+コントローラ

今回の実験では、MAGIC[3]に VR 空間用の改良を加えたシステムを作成する。具体的にはまず、3.1 の視線手法と同じように、視線によりポインタを直接制御で動かせることを可能にする。その後ユーザに操作の切り替えの入力をさせる事により、手元のコントローラでポインタを動かせるよう切り替える(図 1)。

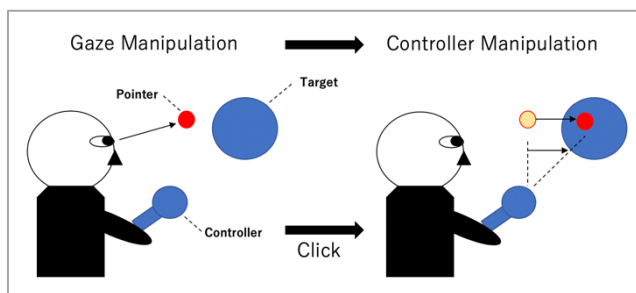


図 1. 視線とデバイスを使用する提案手法

コントローラによる制御方法はコントローラ自体を動かす方法（モーション型）とコントローラに備わるトラックパッドを指でなぞる方法（パッド型）の 2 種類用意する。両方法とも間接制御型に属する。

モーション型はコントローラ自体の縦横の移動をポインタへ反映する方法である。ただし、今回の手法では切り替えの入力が発生した際のコントローラのローカル座標系を操作座標系に用いる。これはコントローラ操作の座標系をワールド座標系とすると、身体負荷の軽減など間接制御の利点が損なわれると感じたためである。切り替え、決定入力にはトリガーボタンを使用し、トリガーを離れた瞬間を入力とする。

パッド型は、HTC Vive のコントローラの背面に装備された指の動きを検知可能なトラックパッドを利用する(図 2)。ユーザは親指でポインタを操作する。切り替え、決定入力にもトラックパッドを用い、トラックパッドに触れた瞬間を切り替え、離れた瞬間を決定入力として扱う。

どちらの手法とも、切り替え後は正しくタスクを完了するまで、視線操作に戻らないように設定し、タスク中に混乱させないようにする。この手法でも実験のはじめに Tobii Pro のキャリブレーションを行い、実験中においても計測のズレが気になった場合、実験データに影響が出ないタイミングで再度キャリブレーションすることを許可する。

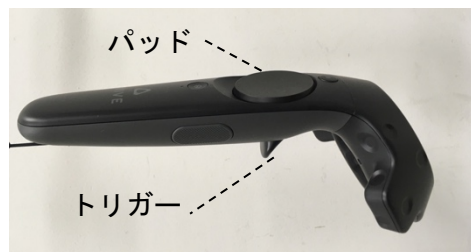


図 2. HTC Vive 付属コントローラ

## 4. (実験 1) 3 手法間の比較

### 4.1 目的

はじめに、VR 空間内での視線、コントローラ、視線+コントローラの 3 手法間においてタスク達成時間や疲労度に違いがあるのかを比較する。視線+コントローラの方法ではコントローラ制御に汎用的であるモーション型を用いる。

### 4.2 実験方法

被験者は椅子に座わり HMD を装着する。コントローラを使用する場合はそれも把持する。被験者の行うタスクは VR 空間内に表示された 2D ディスプレイを模したパネルに表示されるボタンを、それぞれの手法により、ポインティングする事である。本実験中ポインタは常に表示されている。各条件下での操作時間や目の軌跡を計測するために、パネルの中央に毎回スタートボタンを表示し、それをポインティングする事でタスク用のボタンが表示されるようにする。タスクの条件は以下の表の通りである。(表 1)

表 1. 実験 1 の実験条件

条件名	条件
ポインティング手法	①視線, ②コントローラ, ③視線 + コントローラ
中心からの距離(cm)	40,60,80
ボタンサイズ(cm)	4,8,12,16,20
ボタン配置角度(°)	0,45,90,135,180,225,270,315

被験者は各操作手法条件下で 3 距離×5 サイズ×8 方向の計 120 回スタートボタンの押下→タスクボタンの押下を繰り返す。また、タスクは毎回ランダムに決定し、それぞれの実験前に手法ごとに操作感に慣れてもらうための練習時間を設けた。

VR 空間におけるパネルと被験者間の距離は 229(cm)とした。Tobii Pro の正確度(Accuracy)は 0.5° であるため、

原理的には 1 辺 4 cm の大きさのボタンを注視選択できる距離になるが、実際に動作テストをしたところ、視線による注視選択は極めて困難であったため、本実験でのボタンの最小サイズは 8cm からとした。

また、実験開始前に、パネルの中心が被験者の正面に来るように調節し、計測結果に被験者の身体差がなるべく現れないよう配慮した。

実験は 20 代の男子大学生 12 人を用いた。実験後にアンケートを実施し、使用感などに関して 1 から 5 の 5 段階評価をさせた。

### 4.3 結果

中心からの距離、ボタンサイズ条件において、手法ごとにタスク完了時間までにかかった時間をまとめたところ、視線手法と他 2 つに大きな差が見られた。

タスク時間に関して分散分析を行った結果、ボタン配置角度については有意差が認められなかったが、ボタンサイズとボタン距離に関しては交互作用が認められた。多重比較を行った結果、ボタンサイズが 8cm, 12cm, 16cm 条件の時、全ての距離条件において、視線とコントローラ、視線と視線+コントローラ間で有意差がある事がわかった。これは 4cm, 20cm の一部でも認められた。例としてボタンサイズが 12cm のグラフを図 3 に示す。また、中心からの距離が 40cm の時全てのサイズ条件下で、60cm, 80cm の一部の条件下で視線とコントローラ、視線と視線+コントローラ間で有意差がある事がわかった。距離条件が 40cm のグラフを図 4 に示す。

また、実験後の目に疲れを感じたか、体に疲れを感じたか、というアンケート結果を図 5, 図 6 に、実験中のキャリブレーション回数を図 7 のグラフに示す。

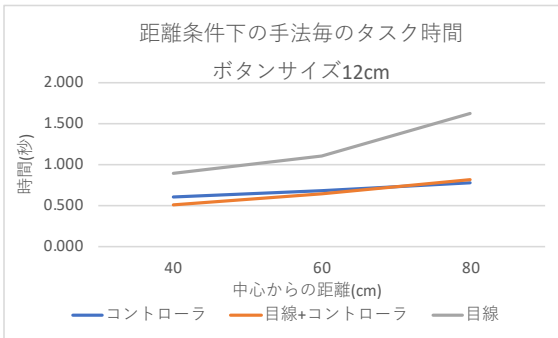


図 3. 中心からボタンまでの距離とタスク完了時間

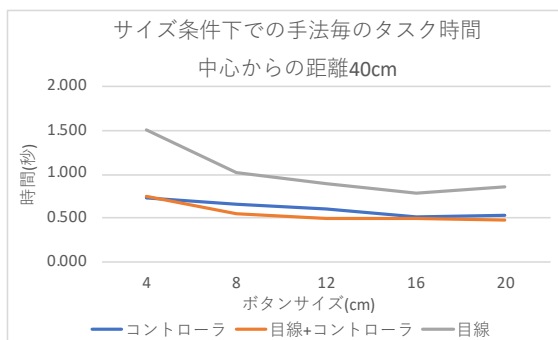


図 4. ボタンサイズとタスク完了時間

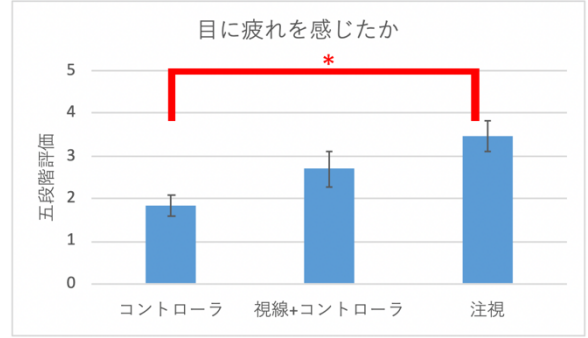


図 5. 「目に疲れを感じたか」アンケート結果

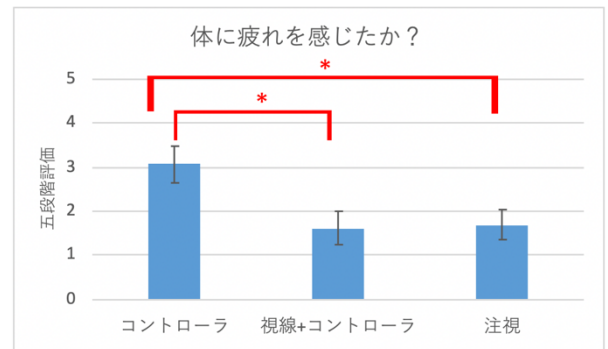


図 6. 「体に疲れを感じたか」アンケート結果

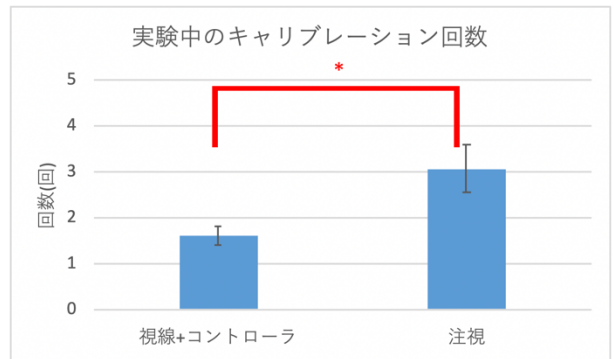


図 7. 実験中のキャリブレーション回数

### 4.4 考察

図 3、図 4 より、視線+コントローラ手法はコントローラのみ手法と比べても遜色がない事が変わる。一方、視線による手法が劣る理由として、注視選択のための時間を 1 秒とった事が原因の 1 つと考えられる。しかし、Midas Touch 問題を解決するためには一定の時間が必要であるため、必要な注視時間を短縮することは現実的ではない。また、図 4 からボタンサイズのタスクへの影響は視線手法に特に影響が出ているように見える。小さなターゲットの場合、注視による選択はコントローラよりも精度が低いと言える。

図 5、図 6 より実験前の予想通り、視線操作は目が疲れやすく、コントロール操作は身体が疲れやすいことが分かる。それに対して視線+コントローラ手法は、眼、身体と

もに疲労度が小さく、バランスの取れた方法であると考えられる。

また、実験中のキャリブレーション回数が少ないことから、視線+コントローラ手法は視線計測の誤差をある程度許容する事がわかる。これにより安価で多少精度の低い視線計測装置においても本手法は有用である事が伺える。

## 5. (実験 2) 注視動作における首の回旋と眼球運動の測定

### 5.1 目的

日常生活では人が物を注視する場合、首と眼球は無意識のうちに連動して動く。HMD を装着し VR 空間のオブジェクトを注視する場合も視線と首は連動すると思われる。ここでは、VR 空間において自然な注視動作を行わせ、首の運動と視線の運動の関係性を明らかにする。一般的な人間の見るという動作を計測する事により、視線が関連するポインティング手法において、より負荷のかからない方法、負荷のかかる手法の理由について考察する。

### 5.2 実験方法

VR 空間内における被験者とパネルの位置関係については、実験 1 を踏襲する。今回は、被験者の自然な動作を測定するためポインタは常に非表示とした。タスクは各条件下で表示されるタスクボタンを被験者に目視させた後、コントローラのトリガーボタンを押させ、その時の視線データを記録した。タスク条件は表 2 の通りになっている。今回は視線停留による注視選択を行わないため、タスクボタンの最小サイズを小さくした。

表 2. 実験 1 の実験条件

条件名	条件
中心からの距離(cm)	20,60,100,140,200
ボタン直径(cm)	2,6,10,14
ボタン配置角度(°)	0,90,180,270

本実験は時間の計測をしないため、実験 1 のようなスタートボタンは用意していない。また、タスクボタンとの距離の関係を明確にするために、ボタンの形を正方形から円へと変更した。

実験は 20 代の男子大学生 10 人を用いた。ボタンは被験者ごとに毎回ランダムな順番で提示した。

### 5.3 結果

中心からの距離、配置角度条件下毎の視線と顔の正面のパネル上の座標点を図 8 に示す。図 8 において、配置条件 90° 以外の条件では首が比較的正面よりも上を向いている事が伺える。一方その上向いた分を視線により補っている事も伺える。また、中心からの距離が増加する毎に視線と顔の正面の間隔も広がっている。それに対し、見る対象のサイズは視線や顔の向きへの影響が少ない。

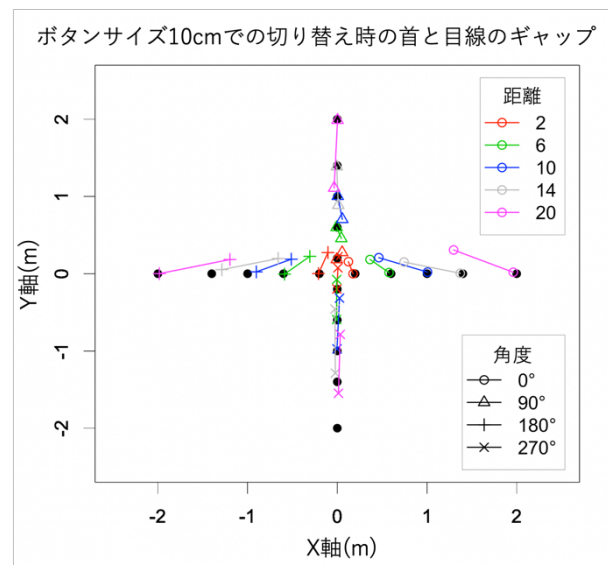


図 8. ボタンサイズ 10cm を注視した時の視線と顔の向きのズレの大きさ

### 5.4 考察

図 8 の結果より、顔と視線の動きに関連性がある事がわかる。特に顕著にわかる事として、見る対象が中心から離れるにつれ、2点間の距離も広がる。これは体の正面から遠いものほど眼球を大きく回転し、首の負荷を軽減しようとしているからと考えられる。また同図より、高さのある物を見る時以外は、首はある程度上に傾き、その分視線を下げて対象を見る傾向があるといえる。これは日常生活では下を見る機会が多く、視線は上よりも下に向けるの方が自然に行えるためであると考えられる。

視線の代用として HMD (顔) の向きを用いることがあるが、この実験の結果から判断すると、その方法を注視選択に用いると不自然な首の動きを強いる恐れがあるといえる。

## 6. (実験 3) 視線+コントローラ手法におけるコントローラの制御手法の比較

### 6.1 目的

実験 1 より、視線+コントローラ手法が十分有効である可能性が示されたため、その手法の中でモーション型とパッド型による操作性の比較を行う。両手法とも既存の操作方法に通ずる部分がある一方で、モーション型は操作を切り替えるごとに操作座標系が変更される点、パッド型は不安定な手持ちコントローラ上での操作という点で、PC でのマウスやパッド操作にはない欠点を持っており、操作に影響する可能性がある。

### 6.2 実験方法

本実験は実験 1 を踏襲した。変更点は、ポインタの表示方法、タスクボタンの形、タスク条件の 3 つである。

まずポインタは、視線操作中は非表示とした。これは視線使用中にポインタに気を取られてしまい、不用意な動作が含まれる可能性があるからである。タスクボタンは実験 1 の変更の通りである。タスク条件は表 3 の通りである。

表 3. 実験 2 の実験条件

条件名	条件
ポインティング手法	視線+コントローラ (モーシオン型), (パッド型)
中心からの距離(cm)	20,40,60,80,100
ボタン直径(cm)	2,4,6,8,10
ボタン配置角度(°)	0,90,180,270

また、本実験では被験者が操作方法を切り替えるタイミングの情報を記録する事で、視線がどのように使用されているのかも考察する。さらに、ポインタの位置が正しくボタンの上でない場合に決定入力を行った場合をエラーとし、その回数を測定する。

実験は 20 代の男子大学生 6 人を用いた。実験後にアンケートを実施し、使用感などに関して 1 から 5 の 5 段階評価をさせた。

### 6.3 実験結果

各手法毎のエラー回数を比較した際に、モーシオン型の方が有意にエラーが少ないという結果が得られた(図 10)。

各手法の操作方法毎の使用時間を図 11,12 に示す。視線操作時間は、ボタンサイズやボタンまでの距離にあまり依存しないが、モーシオン型とパッド型の手法間で有意差が見られ、パッド型の方が短いという結果が得られた。コントローラ操作時間は、サイズ条件が 2,4,6cm の際に手法間で有意差が見られ、パッド型の方が有意に長いという結果が得られた。すなわち、小さいボタンに対してはパッド型の方が時間がかかる結果となった。

視線操作とコントローラ操作が切り替わった時のポインタの場所について散布図にまとめたものの中から、代表的なものを図 13,図 14 に示す。

Fitts の法則に用いられる ID(式(1))と視線およびコントローラそれぞれの操作時間との関係をそれぞれ検討した。回帰分析から算出した回帰式と寄与率を表 4 に示す。

アンケートでは手法間に有意な差は見られなかった。

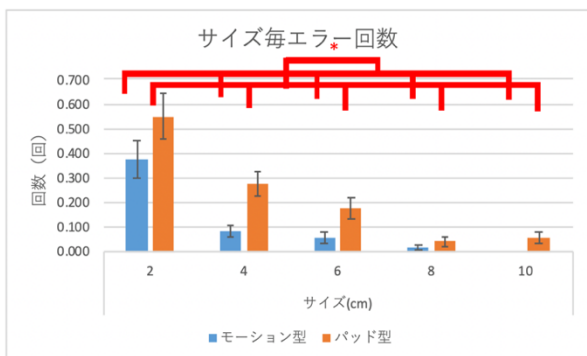


図 10. 手法サイズ毎のエラー回数

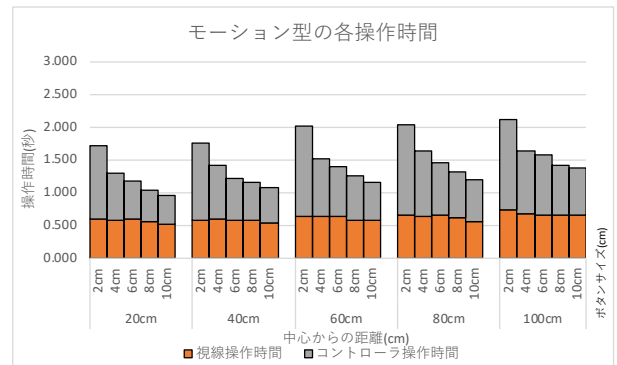


図 11. モーシオン型の各操作時間

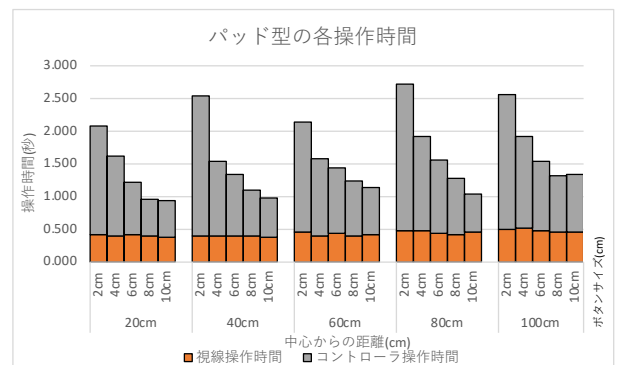


図 12. パッド型の各操作時間

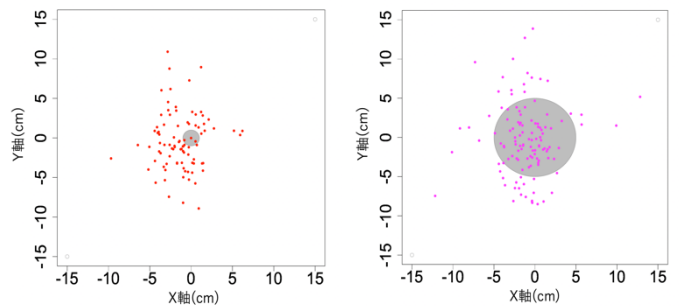


図 13. ボタンサイズ 2cm,10cm におけるモーシオン型の操作切り替え時の①ポインタ座標

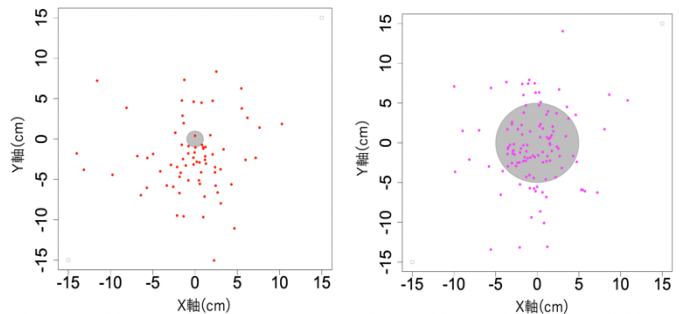


図 14. ボタンサイズ 2cm,10cm におけるパッド型の操作切り替え時のポインタ座標

表 4. 操作手法毎の Fitts の法則への寄与率

	モーショント型		パッド型	
	回帰式	$R^2$	回帰式	$R^2$
視線	$Y = 0.04ID + 0.49$	0.57	$Y = 0.04ID + 0.31$	0.6
ctrl	$Y = 0.42ID + 0.5$	0.74	$Y = 0.78ID + 0.44$	0.84

$$ID = \log_2(1 + D/W) \dots(1)$$

## 6.4 考察

図 10 から図 12 に示した結果より、モーショント型の方が有意に小さいターゲットのポインティング時間が短く、エラー回数も少ないことから、モーショント型の方がより有用性のある操作手法であることがわかる。実験後被験者からは、パッド型の操作感度が高かったことや、モーショント型の方が既知な方法に近く、直感的であったとの意見があった。

図 13, 図 14 より、視線からコントローラへの制御切り替え時のポインタ位置はターゲットボタンの内外で不規則に分布している。すなわち、被験者に視線からコントローラへの制御切り替えタイミングを任せると、被験者は対象に視点を正確に合わせる前に、コントローラに制御を移すことが分かる。特にパッド型の方がより散漫としているように見受けられ、時間で見て図 11, 12 から分かるように、パッド型の方が早く視線からコントローラに制御が移る傾向がある。

Fitts の法則との相関は、パッド型のコントローラ操作時が最も高いが、これは従来のパッドによる操作に似て、操作デバイスが安定しており軌道がぶれにくいからと考える。

全体として、併用システムにおいてポインティング時間に最も影響するパラメータはターゲットの大きさである。小さいターゲットを素早くポイントできるデバイス、もしくはポインタを強制的にターゲットに引き込む仕組みがあれば、ポインティング時間をさらに短縮できる可能性がある。

## 7. 全体の考察

VR 空間においても視線でポインタを移動させ、コントローラで微調整かつ選択を行うポインティング手法はいろいろな面で優れた方法であるといえる。

実験 1 から、疲労に関しては既存手法であるコントローラ単独よりも体に疲れを感じにくく、視線操作よりも目の疲れが小さい事がわかり、使用者への負荷の軽減の点で有用であるといえる。疲労が少ない理由は実験 3 の結果から説明できる。併用手法では制御を視線からコントローラに移行させるタイミングは被験者に任せているが、その時のポインタの位置はターゲット位置に重なっているとは限らない。視線をターゲットに正確に合わせようとはせず、適当なところでコントローラに制御を移してしまうため、目の疲労が少ないと言える。疲労度が低いという要素は、ポインティングという日常的に使い続けるシステムにおいては非常に重要である。

また、最後の選択行為についてもコントローラを使用す

ることで、一定時間注視による選択よりも素早く選択ができ、Midas Touch 問題も回避される。

システム面のメリットとしては、本手法は精度の低い視線計測装置でも実現が可能だと考えられる。これは正確さが必要とされる操作に視線を使用しないためである。ただし、実験 2 の結果より、人が物に視線を向ける際には眼球運動と首の旋回の度合いを適宜配分しており、視線の向きを顔の向き (HMD のトラッキング) で代用することは不自然な動きを必要とし、疲労の観点から適切でないと考えられる。

モーショント型とパッド型を比較すると、主観的には操作性に大差は見られないが、小さなターゲットに対してはモーショント型の方が短時間でポインティング可能である。しかし、Fitts の法則との相関を見るとモーショント型の方が低い。モーショント型はコントローラを自由度 3 で動かせることが、不安定さにつながる恐れがあり、腕の不安定性をいかにして解消するかが今後の課題となっている。一方、パッド型については感度の調整が重要な要素である。

今回の実験はボタンを被験者と正対する平面上に配置したため、コントローラの動きとポインタの動きの関係が現実空間の PC 操作のマウスとマウスカーソルの関係に似ていた。しかし、VR の利点は物理的制約にとらわれない事であり、正対しない配置での操作も要求される。今後は正対しない場合の検討も必要である。

## 8. おわりに

本研究では視線とコントローラを併用するポインティング手法を、VR 空間内にて既存手法と比較し評価した。その結果、併用手法はコントローラのみを用いる既存手法と同等の性能を有し、身体への負担をより軽減可能である事が分かった。コントローラ制御方式の中では、操作性に大差はなかったが、モーショント型の方はポインティング速度がより速い事がわかった。今後は制御方式毎に挙げた問題点の改善や、精度の低いアイトラッキングでの検証をする事で、その利用価値を向上させていくことが必要となる。

### 参考文献

- [1] Linda E. Sibert and Robert J. K. Jacob. "Evaluation of Eye Gaze Interaction." In Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00). ACM, New York, USA, 281-288. (2000)
- [2] Robert J. K. Jacob. "What You Look at is What You Get: Eye Movement based Interaction Techniques." In Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '90). ACM, New York, USA, 11-18. (1990)
- [3] Shumin Zhai, Carlos Morimoto, and Steven Ihde. "Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing." In Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99). ACM, New York, USA, 246-253. (1999)
- [4] Nathan Cournia, John D. Smith, and Andrew T. Duchowski. "Gaze vs. Hand-based Pointing in Virtual Environments." In Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '03). ACM, New York, USA, 772-773. (2003)
- [5] Ken Pfeuffer, Benedikt Mayer, "Gaze + Pinch Interaction in Virtual Reality." Association for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-5486-8/17/10. (2017)
- [6] Tobii pro VR Integration <https://www.tobii.com/siteassets/tobii-pro/product-descriptions/tobii-pro-vr-integration-product-description.pdf?v=1.7>