

# AR入力デバイスとしての身体装着型トラックボールの検討

岩井 望<sup>†1</sup> 崔 明根<sup>†1</sup> 坂本 大介<sup>†1</sup> 小野 哲雄<sup>†1</sup>

**概要：**拡張現実感（Augmented Reality; AR）におけるインタラクションを実現するインターフェースとして小型のトラックボールを中指に装着するインターフェースを提案する。我々はトラックボールは  $x, y$  の 2 軸だけでなく、回転操作のような 3 次元的操作も可能であるため AR での利用に適しているのではないかと考えた。本稿では身体装着型トラックボールを使用することの有用性と実用性について調査するため、身体装着型トラックボールを含む 3 種類の入力手法の比較実験を行った。その結果、身体装着型トラックボールは既存手法に対し補完的な入力を提供し、球を転がす触覚フィードバックやユーザの指の大きさに依存しないデバイスの特性が AR でのインタラクションにおいて有用な操作方法である可能性が示唆された。

## 1. はじめに

拡張現実感（Augmented Reality; AR）技術の実社会での利用が広まっている。これまではスマートフォンやタブレットを利用した AR が広く普及していたが、現在は様々な頭部装着型ディスプレイ（Head Mounted Display; HMD）が各社から発表され、実世界での HMD による AR インタラクションが広く普及の兆しがある。近年登場してきている次世代の AR インタラクションのための HMD はその高性能化と高機能化によって訓練 [1]、博物館 [2]、メンテナンス [3] などの幅広い現場での利用が模索されてきている。

AR インタラクションを実現するための入力手法としてはハンドジェスチャによる入力が主流である。ハンドジェスチャは直感的で仮想 3D オブジェクトの操作に優れるが長時間の使用は腕の疲労に繋がるため [4]、視線 [5] やウェアラブルデバイス [6] などの入力手法が研究されてきた。このような AR インタラクションの入力手法の開発では速度だけでなく社会的受容性も評価の基準となる。そしてウェアラブルデバイスのように入りに接触を伴う手法は正確に入力を検知でき、デザイン次第では社会的にも受け入れられやすい [7]。そのデザインは様々な入力に使用する面積が小さいほど、僅かな動きによる入力が可能なため、社会的受容性の面で有利な傾向がある [4]、[7]。このような背景のもと、我々は AR インタラクションでは小さい面積で十分な速度の入力ができるウェアラブルデバイスの開発が望ましいと考えた。

そこで本研究では AR インタラクションの入力デバイスとして身体装着型、特にユーザの指にトラックボールを装

着して使用することを提案する。トラックボールは球形のインターフェースであり、球を転がすことで入力を行う。トラックボールは主にマウスの代替インターフェースとして使用されることが多いが、我々はこれを AR におけるウェアラブルデバイスとして扱うことを提案する。AR の分野では入力のためのセンサにタッチパッドなどを用いたタッチインターフェースが用いられることが多いが、小面積になるほどスワイプなどの二次元的な入力が難しくなる。一方でトラックボールはタッチインターフェースとは異なり球を転がす操作方法であるため、小型であっても十分な入力精度を達成できると考えた。また、トラックボールの球を転がす感覚が 3D オブジェクトの回転操作において適切であり、AR や VR においてはトラックボールの触覚フィードバックが有利に働くことが示唆されている [8]。このため小型トラックボールは非常に小さな動き（指で球を転がす動作）で触覚フィードバックを感じながら入力を行うことができると考えられる。

本稿の目的は十分な速度で、かつ社会的受容性にも優れた AR インタラクションのための入力手法を検討することである。そこで本稿では身体装着型トラックボールの一般的な AR タスクにおける性能について調査する。我々はトラックボールを搭載した片手で操作できるプロトタイプを作成し、1D スクロール操作、2D ポインティング操作、3D 回転操作を実施する 3 つのタスクを通じてそのパフォーマンスやユーザビリティ、社会的受容性などについて検討する。実験では比較手法としてタッチパッドを搭載した同様のプロトタイプによる入力と、HMD で主流の入力手法であるハンドジェスチャによる入力の 2 つを用意し比較することで、小さな領域で使用することができる身体装着型ト

<sup>†1</sup> 北海道大学

トラックボールの入力の有用性とその実用性について検討した。本研究の貢献を以下に要約する。

- AR で想定され得るタスクにおいて、HMD の既存の入力手法であるハンドジェスチャと、小面積な身体装着型タッチインターフェースによる入力と、身体装着型トラックボールによる入力のパフォーマンスとユーザビリティを比較する実験を行った。
- 身体装着型トラックボールが身体装着型の小面積タッチインターフェースよりも高速に入力が実行可能であり、またユーザビリティにも優れていることを確認した。
- 身体装着型トラックボールによる入力が人目がある状況における入力手法として他手法よりも評価が高く、社会的受容性の高い手法であることを確認した。

## 2. 関連研究

### 2.1 AR インタラクションにおける入力手法

AR の HMD では主にハンドジェスチャによる入力が提供され、主流のインタラクションと言える [4]。ハンドジェスチャでは空中での静的または動的な手のジェスチャをカメラやグローブで検知することでインタラクションを行う。これらのジェスチャは Pointing や Manipulation など 8 つに分類されることが知られている [9]。ハンドジェスチャは迅速かつ正確な 3D インタラクションを提供できる一方、長時間の使用は腕の疲労に繋がり、社会的受容性にも優れない [7]。ゆえに、少ない腕の動きで間接的にカーソルを制御する手法 [10]、少ない手首の動きでスクロール操作をする手法 [11] が提案されている。

また入力デバイスを用いる手法では、HMD の表面に配置されたセンサ、または HMD 以外のデバイス（例：コントローラ）の表面のセンサに直接触れることで入力が行われる [4]。特にウェアラブルデバイスは日常生活において AR 入力を行うデバイスとして適切である可能性が高いと考えられる。ウェアラブルデバイスとは、身体の一部に直接装着することを想定した入力デバイスや、スマートテキスタイルとして衣服に埋め込まれた [12] デバイスなどが該当する。装着する部位としては指 [13] や手首 [14] などが提案されてきた。ハンドジェスチャに対してセンサ上での接触を伴う入力手法はウェブブラウザでのサーフィン、ウィジェットメニューでのアイテム選択などの 2D インタラクションに適しており [4]、特に指や手首に装着するウェアラブルデバイスはサイズがコンパクトで入力動作が小さく社会的受容性に優れることが示されている [7]。本研究においてはウェアラブルデバイスのような、指に装着して利用できる程度に小型のトラックボールを利用し身体装着型のトラックボールによる AR インタラクションの可能性について検討する。

### 2.2 小型のトラックボールの利用

非タッチインターフェースであるトラックボールとジョイスティックは、どちらも 15mm × 15mm 程度の片手の親指で操作できる大きさの小さなモジュールが市販されている。これらはコンパクトなサイズでの 2 自由度 (2-DOF) の操作を容易に実装できる。スマートウォッチを操作する場合の、指によるオクルージョンの課題を解決する目的でこのようなモジュールが利用される事例が紹介されており [16], [17]、文字入力や地図アプリケーションなどのインタラクションをサポートできることが示されている。また、市販のスマートウォッチと同等のサイズを保ちつつジョイスティックを組み込んだプロトタイプも提案されており [18]、小規模なインタラクション領域の拡張で多様な入力を可能としている。

バーチャルリアリティ (VR) 環境においては、3D オブジェクトを回転させるインタフェースの例として親指に装着するトラックボールを利用したウェアラブル入力デバイスが提案されている [8]。この研究では 3D オブジェクトを回転させる際に、手の回転とデバイスを組み合わせて回転させる手法を提案しており、タッチパッド、ジョイスティック、トラックボールをそれぞれ比較した。その結果、触覚フィードバックがあることなどからトラックボールが最も好まれた。トラックボールがユーザが受け入れやすいコンパクトなサイズで十分な性能の 2-DOF の入力を行えること、またその球を転がす触覚フィードバックは VR や AR における 3D オブジェクトの回転操作においては有利に働くことが示唆されている。

このようにトラックボールやジョイスティックなどの非タッチインターフェースはコンパクトなサイズで 2-DOF の入力を提供すると共に、AR や VR ではその触覚フィードバックが有利に働く可能性がある。しかし AR や VR というシナリオでの非タッチインターフェースの検討は進んでおらず、非タッチインターフェースの触覚フィードバックについての調査の重要性が主張されている [18]。本研究では VR での使用が既に検討されているトラックボールの操作性について AR 環境で調査し、その使用の知見を提供することを目的とする。スクロール、ポインティング、3D オブジェクトの回転という AR で想定され得る 3 つのタスクで検討を行う。身体装着型トラックボールを搭載したプロトタイプによる入力と、身体装着型デバイスとして一般的なタッチパッドを搭載したプロトタイプによる入力、そして HMD の入力として最も一般的なハンドジェスチャによる入力の 3 つ手法でそのパフォーマンスとユーザビリティを評価・比較し、身体装着型トラックボールの使用の有用性と実用性について検討する。

## 3. 実験

本実験では AR で想定され得る 3 つのタスクのもと、身

体装着型トラックボールのパフォーマンスとユーザビリティをタッチパッドとハンドジェスチャという2つの手法と比較することでARインタラクションの入力手法としての身体装着型トラックボールの実用性、小さな面積での入力にトラックボールを使うことの有用性を検討する。実験は参加者内実験計画を用いて行われた。

### 3.1 実験参加者

実験参加者として12名(女性1名, 平均年齢21.9歳, 標準偏差1.8歳)が実験に参加した。全員が右利きであり, 実験中も右手を使用した。11人がVRまたはARの経験があると回答し, その中で娯楽や開発目的で日常的に使用していると答えたのは2人, 過去に数回使用経験があると答えたのは10人だった。実験全体に掛かった時間は約2時間程度で, 実験終了後に2,000円分のQuoカードを渡した。

### 3.2 実験条件

本実験ではARのHMDとしてMicrosoft HoloLens2を使用する。本実験ではAR環境での入力手法としてトラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの3つの入力手法について, 1Dスクロール(縦方向のスクロール操作を行うタスク), 2Dポインティング(二次元平面のオブジェクトのポインティングを行うタスク), 3D回転(3Dオブジェクトを3-DOFで回転させるタスク)の3つのタスクを行う。この際のそれぞれの入力手法の詳細について以下に示す。

#### 3.2.1 トラックボール条件

トラックボールは球を転がすことで入力を行う手法であり, 右中指の腹に装着したトラックボールを親指で転がすことで操作を行う。トラックボールは2-DOFの入力が可能であり, トラックボールを装着している右中指の付け根から先端の向きがユーザから見て左, 右中指の付け根から先端を真左に向けた時の上方向がユーザから見て上に対応している。1Dスクロールタスクでは上下方向にトラックボールを転がすと, 転がした方向にスクロールが行われた。2Dポインティングタスクではトラックボールを転がした方向に応じてカーソルが二次元平面上を移動した。3D回転タスクでは転がした方向に応じて, 左右のベクトルの大きさに応じてy軸を中心に, 上下のベクトルの大きさに応じてx軸を中心に対応オブジェクトが回転した。

開発するプロトタイプ of the トラックボールモジュールにはTrackball Breakout PIM447を使用した。このモジュールは図1aに示すように約15mm×15mmの大きさであった。このモジュールを3Dプリンターで作成した外装によって覆い, マジックテープを付けることで指への装着を可能とした。図1aのようにモジュールには小さな球が含まれ, この球の回転を内蔵のホールセンサで検知することで上下左右方向の相対的な動きを検知することができる。モ

ジュールに繋がれたM5StickC Plusが約30fpsの周期でその検知したデータを受信すると同時にUDP通信によってMicrosoft HoloLens2に送信した。装着時のイメージを図2aに示す。

#### 3.2.2 タッチパッド条件

タッチパッドはタッチ操作によって入力を行う手法であり, 右中指の腹に装着したタッチパッドを親指でタッチすることで操作を行う。上下左右の対応はトラックボールと同じであった。1Dスクロールタスクでは上下方向にスワイプすると, スワイプした方向にスクロールが行われた。2Dポインティングタスクではスワイプした方向に応じてカーソルが二次元平面上を移動した。3D回転タスクではスワイプした方向に応じて, 左右のベクトルの大きさに応じてy軸を中心に, 上下のベクトルの大きさに応じてx軸を中心に対応オブジェクトが回転した。

開発するプロトタイプ of the タッチパッドモジュールには一般的な静電容量方式であるIQS525搭載タッチパッド基板を使用した。そして3Dプリンターで外装を作成し, マジックテープを付けることで指への装着を可能とした。このモジュールは30mm×30mmであったが, 図1bのようにタッチパッドは部分的にアルミホイルによって被覆することで操作領域が15mm×15mmに制限された。これはトラックボール条件と操作領域を合わせるためである。また, この被覆は指に装着するウェアラブルデバイスとして妥当なサイズのタッチパッドモジュールを実現する意図でも行われた。よってタッチパッドは図1bに示される15mm×15mmの操作領域においてのみ上下左右方向の相対的なスワイプの動きを検知することができた。モジュールに繋がれたM5StickC Plusが約30fpsの周期でその検知したデータを受信すると同時にUDP通信によってHoloLens2に送信した。装着時のイメージを図2bに示す。

#### 3.2.3 ハンドジェスチャ条件

ハンドジェスチャは右手で特定のジェスチャを行うことで入力を行う手法である。上下左右の対応は現実と同じである。1Dスクロールタスクでは, スクロールを行いたい対象に右人差し指で触れ, その指を上下方向に移動させることでスクロールが行われた。2Dポインティングタスクでは右人差し指の方向にレイ(光線)が発射され, そのレイと二次元平面との交点にカーソルが表示された。このカーソルは右人差し指の向きを変えるとそれに応じて移動した。3D回転タスクでは, オブジェクトに触れた後にピンチジェスチャを行うとオブジェクトを把持することができ, 手の向きを変えることで自由にオブジェクトを回転させることができた。ピンチジェスチャを解除するとオブジェクトは把持から解放され, 空間にオブジェクトが固定される。これを繰り返すことで回転動作を行った。

ハンドジェスチャはMixed Reality Toolkit v2.8.3(MRTK)にて提供されているものを使用した。ユーザ

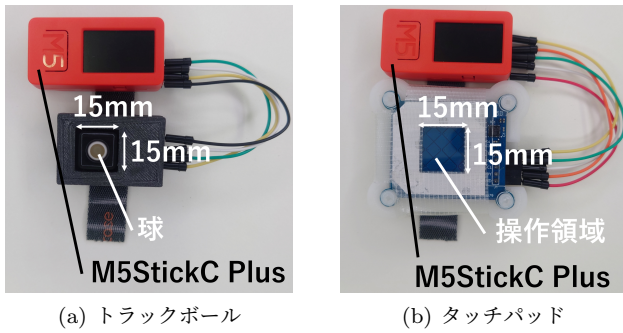


図 1 作成したプロトタイプ.

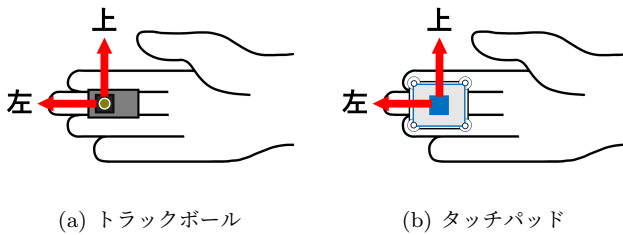


図 2 装着時の様子. 上下左右それぞれの方向の操作に対し, 各タスクで表示されるオブジェクトの動きが定められた.

は Hololens2 のカメラの認識範囲でジェスチャを行うことにより, 入力を行うことができた.

### 3.3 実験デザイン

実験は参加者内実験計画を用いて行った. 入力手法はトラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの3つである. タスクは1D スクロールタスク, 2D ポインティング, 3D 回転タスクの3つがあり, 実験参加者はこの順番でタスクを実施した. タスクを実施する順番は固定である一方で, 入力手法についてはラテン方格法を考慮した順番で試行を行った. 以下, 3つのタスクデザインについて説明する. なお, 3つのタスクは Unity ver. 2020.3.38f1 を用いて実装した.

#### 3.3.1 タスク 1: 1D スクロールタスク

1D スクロールタスクはターゲットを縦方向のスクロール操作によって選択するタスクである (図 3). 1D スクロールタスクでは3つの独立変数が存在し, それぞれ以下のように設定した.

- 入力手法 (*Method*): トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャ
  - ターゲット距離 (*Distance*):  $8.58^\circ$  (Short),  $68.04^\circ$  (Medium),  $134.80^\circ$  (Long)
  - ターゲット高 (*Size*):  $4.30^\circ$  (Small),  $8.58^\circ$  (Large)
- 本タスクは先行研究 [10] のスクロールタスクを参考に設計しており, *Distance* と *Size* は同様の値を採用した.

タスクは *Method* ごとに *Size* によって2つのブロックに分けられ, 各ブロックでは  $3 \text{ Distance} \times 6 \text{ 試行} = 18$  回ターゲットが提示された. ブロックの順番はラテン方格法

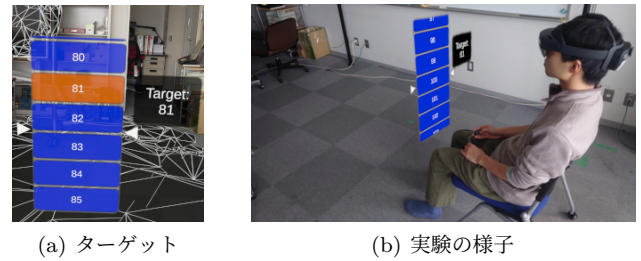


図 3 ターゲットと実験の様子 (1D スクロールタスク).

を考慮した順番で, ターゲットはそれぞれランダムな順番で提示された. したがって実験参加者は全体で  $3 \text{ Method} \times 2 \text{ Size} \times 3 \text{ Distance} \times 6 \text{ 試行} = 108$  回のスクロール操作を行った. 実験参加者は12名であったため, 1つの欠損値を除いて合計 1,295 データが収集された.

従属変数は試行時間である. また, 実験参加者は *Method* ごとに精神的負荷とユーザビリティを計測することを目的とした NASA Raw Task Load Index (NASA-RTLX) [19] に基づくアンケートと, System Usability Scale (SUS) [20] に基づくアンケートの2つに回答した. さらに3つの *Method* での試行が完了した後, 実験参加者は単純な手法の好みと, 人目がある場所での使用を想定した場合の手法の好みの順位, そしてそれぞれの理由について記述式のアンケートに回答した.

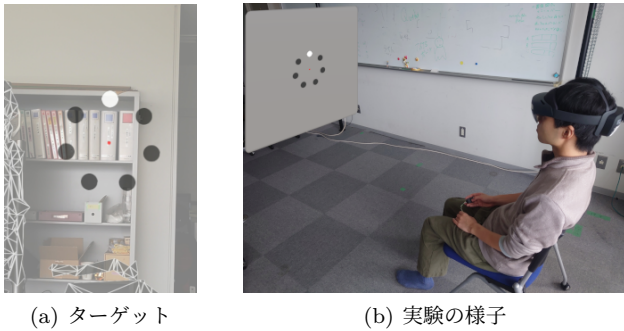
#### 3.3.2 タスク 2: 2D ポインティングタスク

2D ポインティングタスクは二次元平面に配置されたオブジェクトを選択するタスクである (図 4). 2D ポインティングタスクでは3つの独立変数が存在し, それぞれ以下のように設定された.

- 入力手法 (*Method*): トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャ
- ターゲット距離 (*Distance*):  $7^\circ$  (Short),  $21^\circ$  (Long)
- ターゲット幅 (*Width*):  $0.59^\circ$  (Small),  $1.18^\circ$  (Medium),  $2.36^\circ$  (Large)

タスクは  $2 \text{ Distance} \times 3 \text{ Width} = 6$  セッションから成り, 各セッションは6試行で構成された. 実験参加者は1D スクロールタスクと同様の順で提示される *Method* ごとに6セッション行った. 6セッションの順番はランダムであった. したがって実験参加者は全体で  $3 \text{ Method} \times 2 \text{ Distance} \times 3 \text{ Width} \times 6 \text{ 試行} = 108$  回のポインティング操作を行った. そして実験参加者は12名であるため, 合計 1,296 データが収集された.

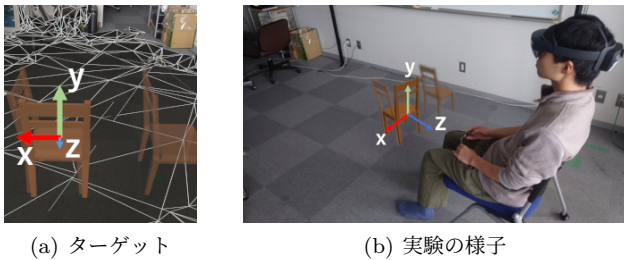
従属変数は試行時間である. そして実験参加者は手法ごとに NASA-RTLX と SUS に基づく2つのアンケートに回答し, 3つの *Method* での試行が完了した後, 実験参加者は単純な手法の好みと, 人目がある場所での使用を想定した場合の手法の好みの順位, そしてそれぞれの理由について記述式のアンケートに回答した.



(a) ターゲット

(b) 実験の様子

図 4 ターゲットと実験の様子 (2D ポインティングタスク).



(a) ターゲット

(b) 実験の様子

図 5 ターゲットと実験の様子 (3D 回転タスク). x, y, z 軸は実験中には表示されない.

### 3.3.3 タスク 3：3D 回転タスク

3D 回転タスクはオブジェクトを手本のオブジェクトと同様の回転角度に回転させるタスクである (図 5). 3D 回転タスクでは 2 つの独立変数が存在し、それぞれ以下のよう設定された.

- 入力手法 (*Method*): トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャ
- 回転角度 (*Degree*): 30°, 150° (時計回り)

実験参加者は 2 *Degree* × 6 試行 = 12 試行で構成されるセッションを *Method* ごとに行った. 12 試行の順はランダムであり, *Method* は 1D スクロールタスクと同様の順で提示された. したがって実験参加者は全体で 3 *Method* × 2 *Degree* × 6 試行 = 36 回の回転操作を行った. 本タスクにおいては 1 回の試行に 40 秒の制限時間が設けられ, それ以上の試行はデータから排除した. そして実験参加者は 12 名であるため, 10 回の制限時間超過によるエラーを除き合計 422 データが収集された.

従属変数は試行時間と総回転角度 [21] である. 総回転角度は 1 回の試行において実験参加者がオブジェクトを何度回転させたかを表す. 回転操作を行えば行うほど総回転角度は大きくなるため, 総回転角度は手法ごとの目的の角度への回転の容易さを測る指標として扱うことができる. そして実験参加者は手法ごとに NASA-RTLX と SUS に基づく 2 つのアンケートに回答し, さらに 3 つの *Method* の試行が完了した後, 実験参加者は単純な手法の好みと, 人目がある場所での使用を想定した場合の手法の好みの順位, そしてそれぞれの理由について記述式のアンケートに回答した.

## 3.4 実験手順

実験参加者が実験室に到着後, 椅子に座らせ事前アンケートへの回答を要求した後, 実験の概要を説明した. 実験は 1D スクロールタスク, 2D ポインティングタスク, 3D 回転タスクの順で構成されており, 実験参加者はタスクごとに *Method* を同じ順で体験した.

初めにタスクの内容についての説明を実施した. 説明が終了した後, 実験参加者は HMD を装着し 1 つ目の *Method* でタスクを遂行した. 各 *Method* ではタスク開始前に練習時間が設けられ, 実験タスクからパラメータが変更されたタスクを, 実験参加者から操作に慣れたという回答が得られるまで行った. これはスクロールタスクに限らず, 全てのタスクで共通した手順であった.

以下, 3 つのタスクそれぞれの手順について説明する.

### 3.4.1 タスク 1：1D スクロールタスク

1 つ目のタスクとして先行研究 [10] に基づいた 1D スクロールタスクを実施した. 実験参加者は HMD を被ると, 前方に 1 から 200 までの番号が付けられた縦にスクロール可能なボックスのリストと中央に 2 つの白い矢印が描かれた仮想のビューポートが提示された (図 3a). ビューポートは HMD の 20cm 下, 前方 45cm の位置に表示され, 縦の長さは 38.58° であった (図 3b). リストの右横にはターゲットの番号が表示され, ターゲットのボックスはオレンジ色で表示された. 実験参加者はターゲットのボックスを中央の矢印の間にくるまで運び, 500ms の滞留によって選択することができた. 選択のためにはスクロールの速さを閾値 (8.58°/sec) 以下にする必要があり, また実験参加者はターゲットを正しく選択するまで次の試行には進めなかった.

タスク開始時はリストの中央, つまり 100 と書かれたボックスの中央の位置から開始され, 3 秒のカウントダウンの後, 18 回の試行が実施された. この 18 回の試行において要求される上方向のスクロール距離と下方向のスクロール距離は実験参加者間で同一とした. 1 つ目の *Size* の値に対して 18 試行を行った後, 次の *Size* の値に対しても同様の手順で 18 試行が行われた. この手順を 3 つの *Method* に対して繰り返した.

タッチパッドとトラックボールはそれぞれ中指に装着され, 親指によって操作が実行された. トラックボールは上下に球を転がすことで, タッチパッドは上下にスワイプすることでスクロールを行うことができた. ハンドジェスチャでは表示されるパネルに手で直接触れ, 手首または腕を上下に動かすことでスクロールを行うことができた. トラックボールとタッチパッドは 1 回の指の上下方向のスライド動作によってパネルが約 17.18° (Small のボックス 4 個分) スクロールされるように調整された.

### 3.4.2 タスク 2：2D ポインティングタスク

2 つ目のタスクとして先行研究 [11] に基づき, 同一円周

上に配置された7個のターゲットをカーソルを制御することで選択する、ISO9241-9に従った典型的な2Dポインティングタスクを実施した。

HMDを被った実験参加者の前方に仮想的なウィンドウが表示され、そのウィンドウにカーソル、そして7個の円形のターゲットが表示された(図4a)。ウィンドウはHMDの20cm上、前方2mの位置に表示され、ウィンドウの大きさは1m×1mだった(図4b)。選択すべきターゲットは白色で示され、カーソルが入ると緑色に変化する。実験参加者はカーソルをターゲット内部まで運び、500msの滞留によって選択することができ、正しく選択されるまで実験参加者は次の試行に進めなかった。

各セッションの7個のターゲットは直径7°または21°の円周上に等間隔で配置された。各セッションの最初には3秒間のカウントダウンが存在し、そのカウントダウンの後に実験参加者はカーソルを操作することができた。6回の試行が終了すると再び3秒のカウントダウンの後、次のセッションが開始された。同様の手順でセッションを繰り返し、実験参加者は計6つのセッションを3つのMethodで行った。

タッチパッドとトラックボールはそれぞれ中指に装着され、親指によって操作が実行された。トラックボールとタッチパッドでは上下左右の指の動きでカーソルを間接的に制御することができた。ハンドジェスチャでは手から出るレイによってカーソルを直接制御できた。トラックボールとタッチパッドは1回の指の上下方向のスライド動作でカーソルが約7°動くように調整した。また、全てのMethodにおいて制御するカーソルの直径は約1°であった。

### 3.4.3 タスク3: 3D回転タスク

3つ目のタスクとして先行研究[21],[22]に基づき、3D回転タスクを実施した。ドッキングの対象となる3Dオブジェクトとして、本タスクでは椅子を選択した。椅子は立方体のような対称性のあるオブジェクトと比べ、その向きを容易に特定することができた[21]。椅子の大きさは約10cm×10cm×20cmであった。

HMDの30cm下、前方45cmの位置に椅子のオブジェクト(Chair)が表示され、各手法で回転させることができた。目標の向きを表す半透明のターゲットはChairと同じ位置に配置された。また、Chairの右20cmの位置にもターゲットと同じ方向を向いた半透明のオブジェクトが配置され、実験参加者はChairと重なってターゲットが見つらなくなった場合にはそのオブジェクトを見ることによってターゲットの向きを確認することができた。Chairとターゲットの向きの差が誤差より小さくなると赤いアウトラインが表示され、アウトラインが表示された状態で500msの滞留より試行を完了できた。向きの誤差閾値は15°であり、位置に関しては考慮しなかった。また最初のChairの向きは各試行で同一だった。

ターゲットの回転姿勢は予め定義されており、最初の椅子の姿勢から以下の軸ベクトルの周りに30°または150°時計回りに回転された6姿勢だった:x, y, z, x-y, x-z, y-z軸(図5)。従って合計12個(6姿勢×2Degree)のターゲットが用意され、ランダムな順番で提示された。

タッチパッドとトラックボールはそれぞれ中指に装着され、親指によって操作が実行された。トラックボールとタッチパッドでは上下方向と左右方向の指の動きが、それぞれx軸とy軸を中心とした回転に変換された。ハンドジェスチャは親指と人差し指で椅子を掴んで回転させることができ、これはMRTKで提供されているものだった。トラックボールとタッチパッドは1回の指の上下方向のスライド動作でChairが約90°回転するように調整された。

### 3.4.4 各タスクの共通事項

1つの手法でのタスクが完了するごとに実験参加者はNASA-RTLXとSUSに基づくアンケートの2つに回答した。さらに3つの手法でのタスクが完了した後、実験参加者は好みの手法についてのアンケートに回答し、そのアンケートの完了をもって1つのタスクを終了とした。全てのタスクにおいて実験参加者は作業をできるだけ速く正確に行うことを要求された。

1つの入力手法でタスクが終了するごとに実験参加者は自由に休憩を取ることができた。3つのタスク全てが完了した後、実験参加者は本実験を通しての各手法に対する意見についての自由記述をアンケートに回答し、そのアンケートの完了をもって実験を終了とした。

## 4. 実験結果

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)[23]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法による補正を用いた。NASA-RTLXとSUSによって得られた値についてはフリードマン検定と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。手法の好みの順位については加重平均を算出した。

### 4.1 1Dスクロールタスク

#### 4.1.1 試行時間

手法(Method)、ターゲット距離(Distance)、ターゲット高(Size)を独立変数とし、試行時間を従属変数として分析を行った。試行時間に対してMethod( $F_{2,1266}=285.77, p<.01$ )、Distance( $F_{2,1266}=1122.75, p<.01$ )に有意な差が確認された。さらに1次の交互作用としてMethod×Distance( $F_{4,1266}=117.99, p<.01$ )とMethod×Size( $F_{2,1266}=21.97, p<.01$ )、Distance×Size( $F_{2,1266}=11.22, p<.01$ )が確認された(図6a, 図6b)。

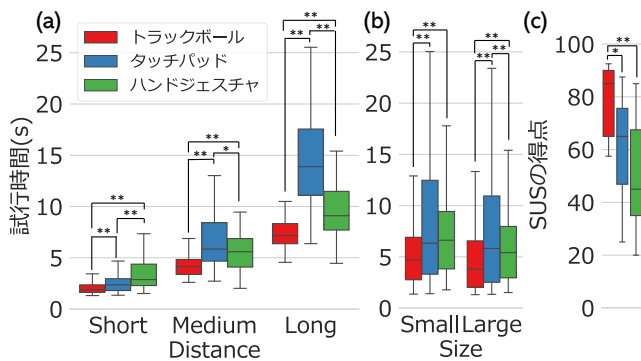


図 6 1D スクロールタスクにおける (a) *Method* × *Distance* の試行時間, (b) *Method* × *Size* の試行時間, (c) *Method* ごとの SUS の得点. 有意差は \* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ .

#### 4.1.2 NASA-RTLX & SUS

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの総合的ワークロードはそれぞれ 22.08, 43.13, 52.64 であった (低い方が良い). NASA-RTLX によって得られた 6 つの項目に対するスコアと総合的ワークロードスコアに対してフリードマン検定を用いて分析した結果, *Method* に対して精神 ( $\chi^2_{2,N=12}=8.52, p < .05$ ), 肉体的要求 ( $\chi^2_{2,N=12}=17.52, p < .01$ ), 時間的切迫感 ( $\chi^2_{2,N=12}=9.48, p < .01$ ), 努力 ( $\chi^2_{2,N=12}=11.62, p < .01$ ), 不満 ( $\chi^2_{2,N=12}=7.61, p < .05$ ), 総合的ワークロード ( $\chi^2_{2,N=12}=18.67, p < .01$ ) に有意な差が確認された.

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの平均 SUS スコアはそれぞれ 78.96, 61.46, 49.36 であった (高いほど良い). フリードマン検定により, *Method* ( $\chi^2_{2,N=12}=11.26, p < .01$ ) に有意差が確認された (図 6c).

#### 4.1.3 手法の好み

実験参加者 12 名中 10 名がトラックボール, 2 名がハンドジェスチャを最も好んだ. 人目がある場合を考慮すると 10 名がトラックボール, 2 名がタッチパッドを最も好んだ. トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの手法の好みの順位の加重平均はそれぞれ 1.17, 2.33, 2.50 であり, 人目があることを想定した場合は 1.17, 1.92, 2.92 となった.

### 4.2 2D ポインティングタスク

#### 4.2.1 試行時間

手法 (*Method*), ターゲット距離 (*Distance*), ターゲット幅 (*Width*) を独立変数とし, 試行時間を従属変数として分析を行った. 試行時間に対して *Method* ( $F_{2,1267}=779.72, p < .01$ ) と *Distance* ( $F_{1,1267}=711.39, p < .01$ ), *Width* ( $F_{2,1267}=142.82, p < .01$ ) に有意な差が確認された. さらに 1 次の交互作用として *Method* × *Distance* ( $F_{2,1267}=190.03, p < .01$ ) と *Method* × *Width* ( $F_{4,1267}=5.50, p < .01$ ) が確認された (図 7a, 図 7b).

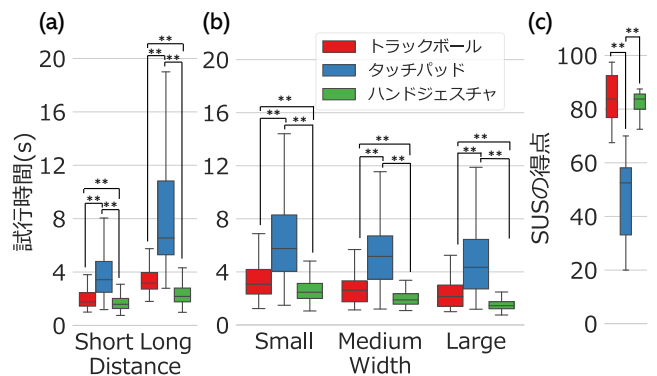


図 7 2D ポインティングタスクにおける (a) *Method* × *Distance* の試行時間, (b) *Method* × *Width* の試行時間, (c) *Method* ごとの SUS の得点. 有意差は \*\* $p < .01$ .

#### 4.2.2 NASA-RTLX & SUS

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの総合的ワークロードはそれぞれ 21.81, 56.11, 24.65 であった (低い方が良い). NASA-RTLX によって得られた 6 つの項目に対するスコアと総合的ワークロードスコアに対してフリードマン検定を用いて分析した結果, *Method* に対して精神的要求 ( $\chi^2_{2,N=12}=20.76, p < .01$ ), 肉体的要求 ( $\chi^2_{2,N=12}=14.34, p < .01$ ), 作業達成度 ( $\chi^2_{2,N=12}=9.65, p < .01$ ), 努力 ( $\chi^2_{2,N=12}=17.74, p < .01$ ), 不満 ( $\chi^2_{2,N=12}=12.13, p < .01$ ), 総合的ワークロード ( $\chi^2_{2,N=12}=18.67, p < .01$ ) に有意な差が確認された.

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの平均 SUS スコアはそれぞれ 84.17, 47.08, 81.67 であった (高いほど良い). フリードマン検定により, *Method* ( $\chi^2_{2,N=12}=18.17, p < .01$ ) に有意差が確認された (図 7c).

#### 4.2.3 手法の好み

実験参加者 12 名中 5 名がトラックボール, 7 名がハンドジェスチャを最も好んだ. 人目が場合を考慮すると 9 名がトラックボール, 1 名がタッチパッド, 2 名がハンドジェスチャを最も好んだ. トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの手法の好みの順位の加重平均はそれぞれ 1.58, 3.00, 1.42 であり, 人目があることを想定した場合は 1.25, 2.58, 2.17 となった.

### 4.3 3D 回転タスク

#### 4.3.1 試行時間

手法 (*Method*) と回転角度 (*Degree*) を独立変数とし, 試行時間を従属変数として分析を行った. 試行時間に対して *Method* ( $F_{2,405.46}=10.65, p < .01$ ) と *Degree* ( $F_{1,405.32}=62.14, p < .01$ ) に有意な差が確認された. 1 次の交互作用は確認されなかった (図 8a).

#### 4.3.2 総回転角度

手法 (*Method*) と回転角度 (*Degree*) を独立変数とし, 総回転角度を従属変数として分析を行った (低い方が良い).

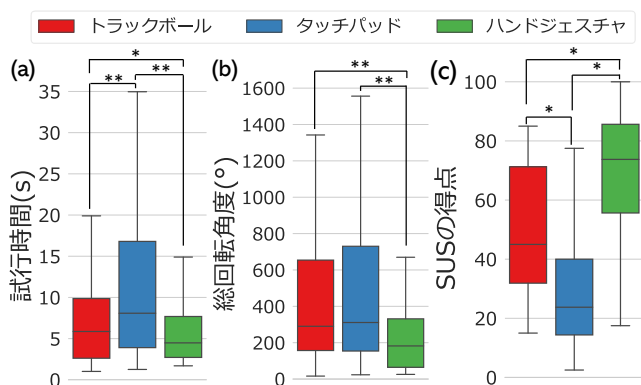


図 8 3D 回転タスクにおける Method ごとの (a) 試行時間, (b) 総回転角度, (c) SUS の得点. 有意差は\*p<.05, \*\*p<.01.

総回転角度に対して Method ( $F_{2,405.61}=19.70, p<.01$ ) と Degree ( $F_{1,405.55}=126.78, p<.01$ ) に有意差が確認された. 1 次の交互作用は確認されなかった (図 8b).

#### 4.3.3 NASA-RTLX & SUS

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの総合的ワークロードはそれぞれ 38.82, 54.38, 34.44 であった (低い方がよい). NASA-RTLX によって得られた 6 つの項目に対するスコアと総合的ワークロードスコアに対してフリードマン検定を用いて分析した結果, Method に対して精神的要求 ( $\chi^2_{2,N=12}=12.31, p<.01$ ), 肉体的要求 ( $\chi^2_{2,N=12}=6.62, p<.05$ ), 時間的切迫感 ( $\chi^2_{2,N=12}=11.56, p<.01$ ), 作業達成度 ( $\chi^2_{2,N=12}=11.29, p<.01$ ), 努力 ( $\chi^2_{2,N=12}=7.48, p<.05$ ), 総合的ワークロード ( $\chi^2_{2,N=12}=8.00, p<.05$ ) に有意な差が確認された.

トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの平均 SUS スコアはそれぞれ 50.00, 30.00, 68.33 であった (高いほどよい). フリードマン検定により, Method ( $\chi^2_{2,N=12}=11.17, p<.01$ ) に有意差が確認された (図 8c).

#### 4.3.4 手法の好み

実験参加者 12 名中 1 名がトラックボール, 1 名がタッチパッド, 10 名がハンドジェスチャを最も好んだ. 人目がある場合を考慮すると 5 名がトラックボール, 1 名がタッチパッド, 6 名がハンドジェスチャを最も好んだ. トラックボール, タッチパッド, ハンドジェスチャの手法の好みの順位の加重平均はそれぞれ 1.92, 2.75, 1.33 であり, 人目があることを想定した場合は 1.67, 2.58, 1.75 となった.

### 4.4 実験のまとめ

本実験で得られた結果をタスク毎に簡単にまとめる.

#### 4.4.1 1D スクロールタスク

トラックボールは全体を通して高速でユーザビリティのスコアも最も良く, 実験参加者に最も好まれ, 人目がある場合を想定しても最も好まれた. タッチパッドはスクロール距離が大きい場合に他 2 つの手法と比べパフォーマンス

が悪く, ユーザビリティのスコアはトラックボールより悪かった. ハンドジェスチャはスクロール距離が小さい場合に他 2 つの手法と比べパフォーマンスが悪く, ユーザビリティのスコアはトラックボールより悪かった. また, 肉体的要求が他 2 つの手法よりも高く, 疲労が溜まる手法であった. そして人目があることを想定すると実験参加者からは最も好まれなかった.

#### 4.4.2 2D ポインティングタスク

トラックボールは全体を通して速度はタッチパッドよりも優れ, ハンドジェスチャより劣ったが, ユーザビリティのスコアについてはハンドジェスチャとの間に有意差は無かった. また, 人目がある場合を想定すると実験参加者から最も好まれた. タッチパッドは全体を通して最もパフォーマンスが悪く, ユーザビリティのスコアはトラックボールより悪かった. また, 精神的負荷が最も高く, 単純な手法の好みでは最も好まれなかった. ハンドジェスチャは全体を通して最も高速な手法だったが, 肉体的要求がトラックボールよりも高かった.

#### 4.4.3 3D 回転タスク

トラックボールは速度はタッチパッドよりも優れ, ハンドジェスチャには劣り, 総回転角度はハンドジェスチャよりも大きかった. ユーザビリティのスコアもタッチパッドより良く, ハンドジェスチャより悪かった. 単純な好みではタッチパッドより優れた. タッチパッドは最もパフォーマンスが悪い手法だった. ハンドジェスチャよりも総回転角度が大きく, ユーザビリティのスコアは最も悪かった. また, 精神的負荷が最も高く, 単純な手法の好みでは最も好まれなかった. ハンドジェスチャは最も高速で, 総回転角度が最小であり, ユーザビリティのスコアも最も良い手法であった. 単純な好みではほとんどの実験参加者に好まれたが, 人目がある場合を考慮するとその人数は減少した.

## 5. 議論

本稿では AR インタラクションにおいて小型トラックボールを使用することの有用性と実用性について検討するために 3 つのタスクを行った. その結果, 以下の点が明らかになった.

- トラックボールは 1D スクロールタスクと 2D ポインティングタスクにおいて, 他手法よりも優れていた. 一方で 3D 回転操作においてはハンドジェスチャの方が優れているため, トラックボールは 1D および 2D インタラクションに優れた手法だと言える.
- スクロール操作とポインティング操作についてトラックボールはタッチパッドよりもパフォーマンスとユーザビリティ, 精神的負荷の面で優れており, トラックボールの方が小さな面積での入力に適した手法だと言える.
- トラックボールは他手法と比較して好まれた手法で



あったが、人目を気にした場合、さらにトラックボールが好まれることが確認された。したがってトラックボールは社会的受容性の高い手法だと言える。

### 5.1 トラックボール vs タッチパッド

実験結果よりトラックボールはパフォーマンス、ユーザビリティ共にタッチパッドよりも優れており、タッチパッドよりも小さな面積での入力に適した手法だと言える。この要因としては、タッチパッドについては実験参加者から「指の動きに反応しないことがあった (P4, P7, P11)」という意見があったことから、面積が小さいことによるタッチパッドの操作性の悪さが影響したことが考えられる。実際、タッチパッドはターゲット距離が遠い場合など、操作回数が多くなったときのパフォーマンスの悪化率が他の手法よりも大きかった。一方、「タッチパッドはトラックボールよりも細かい操作がしやすかった (P3, P5)」という意見もあり、タッチパッドを好んだ実験参加者もいた。これはタッチパッドがトラックボールよりも検知できる指の動きの分解能が高く、細かい指の動きを表現できたことが挙げられる。よって操作回数が少なく、高い精度が求められるタスクではタッチパッドが優れている可能性がある。

また、3D 回転タスクにおいて「トラックボールは球を転がす感覚があってやりやすかった可能性がある (P3)」という意見があり、先行研究 [8] で示された知見と一致した。一方、タッチパッドについては全体を通して「タッチパッドは手汗のせいで滑りにくいときがあった (P3)」、「タッチパッドは滑りにくかった (P1)」、「ユーザの指の大きさに評価が変わる可能性がある (P1)」といった意見があり、トラックボールの触覚フィードバックがタスクに対し有利に働くことがあることに対し、タッチパッドのデバイスの特性はタスクに対し不利に働く可能性が示された。しかし P10 は人目がある場合を想定したときにトラックボールよりもタッチパッドの使用を好み、タッチパッドではユーザが慣れ親しんでいることが社会的受容性の面で有利に働く可能性が示唆された。

### 5.2 トラックボールの使用のガイドライン

トラックボールはスクロールタスクではパフォーマンスとユーザビリティ共に AR の主流の入力手法であるハンドジェスチャより優れ、ポインティングタスクではパフォーマンスは劣ったがユーザビリティでは有意差は存在しなかった。そして両方のタスクにおいてトラックボールはハンドジェスチャよりも社会的受容性に優れており、2D インタラクションにおいてトラックボールは実用に耐え得る手法だと言える。一方、3D 回転タスクでは速度と直感性、ユーザビリティ全ての面でハンドジェスチャがトラックボールより優れており、トラックボールが実用性に耐え得るとは言い難い結果であった。しかしハンドジェスチャ

は直感的だったが y 軸の回転が難しかったというコメントが得られており、これに対しトラックボールについては直感的ではなかったが x 軸周りの回転のみの試行や y 軸周り回転の試行はやりやすかったというコメントが得られた。これらの結果から我々はトラックボールによる入力をハンドジェスチャの補完的な入力として用い、人目があるかどうかやタスクの内容によって手法を切り替えるようなマルチモーダルな入力をユーザに提供することが望ましいと考える。

### 5.3 本研究の限界と今後の展望

本研究で用いたタッチパッドは小型トラックボールのサイズに合わせるためにアルミホイルで被覆してあった。デバイス本体の大きさとしては 30mm × 30mm 程度であるため、被覆がない状態で 15mm × 15mm 程度の大きさで作成されたタッチパッドにおいて同様の結果となるとは限らない。加えてタッチパッドは静電容量方式であったが、先行研究では磁気 [24]、圧力 [25] を利用したタッチインターフェースが開発されており、本研究だけではトラックボールの方がタッチインターフェースに全面的に優れていると言うことはできない。加えて、本研究においては中指に装着したモジュールを親指で操作するような手法を検討したが、モジュールの位置や操作する指によってパフォーマンスは変化すると考えられる。我々は小型トラックボールによって歩行時や公共の場での利用なども考慮した日常生活における AR インタラクションを実現することを最終的な目的としている。よって今後は本実験の結果に従い小型トラックボールでの入力様式を定めた上で、日常生活における様々な条件に適したデザインの調査をすることが必要だと言える。また本実験の結果は VR インタラクションにも適用できるものであり、VR 環境での小型トラックボールの使用の検討、そして AR 環境での使用との違いについての調査が必要だとも言える。

## 6. まとめ

我々は小さい操作領域で実施する AR インタラクションの実現のために身体装着型トラックボールを提案し、その有用性と実用性を検討した。検討にあたってはスクロールタスク、ポインティングタスク、3D 回転タスクの 3 つのタスクで構成される実験を行い、2 つの入力手法と比較した。その結果、2D インタラクションについては身体装着型トラックボールのパフォーマンスは十分であり、非タッチインターフェースのトラックボールが持つ独自のデバイスの特性が有利に働くことが明らかになった。実用化するにはさらなる調査が必要だが、本研究はタッチインターフェースの代替としてトラックボールが有する可能性を示し、非タッチインターフェースの積極的な使用を検討することの意義を示すことができたと考えている。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業、JPMJFR226S の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Huang, G., Qian, X., Wang, T., Patel, F., Sreeram, M., Cao, Y., Ramani, K. and Quinn, J.A.: AdapTutAR: An Adaptive Tutoring System for Machine Tasks in Augmented Reality, Proc. *CHI '21*, Article 417, pp. 1–15, ACM (2021).
- [2] Pedersen, I., Gale, N., Mirza-Babaei, P. and Reid, S.: More than Meets the Eye: The Benefits of Augmented Reality and Holographic Displays for Digital Cultural Heritage, *J. Comput. Cult. Herit.*, vol. 10, issue 2, Article 11, pp. 1–15 (2017).
- [3] Zheng, S.X., Foucault, C., Matos da Silva, P., Dasari, S., Yang T. and Goose, S.: Eye-Wearable Technology for Machine Maintenance: Effects of Display Position and Hands-Free Operation, Proc. *CHI '15*, pp. 2125–2134, ACM (2015).
- [4] Lee, L.-H. and Hui, P.: Interaction Methods for Smart Glasses: A Survey, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28712–28732 (2018).
- [5] Bâce, M., Leppänen, T., De Gomez, D.G. and Gomez, R.A.: UbiGaze: Ubiquitous Augmented Reality Messaging Using Gaze Gestures, Proc. *SA '16*, Article 11, pp. 1–5, ACM (2016).
- [6] Dobbstein, D., Winkler, C., Haas, G. and Rukzio, E.: PocketThumb: A Wearable Dual-Sided Touch Interface for Cursor-Based Control of Smart-Eyewear, *ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 1, issue 2, Article 9, pp. 1–17 (2017).
- [7] Medeiros, D., Dubus, R., Williamson, J., Wilson, G., Pöhlmann, K., and McGill, M.: Surveying the Social Comfort of Body, Device, and Environment-Based Augmented Reality Interactions in Confined Passenger Spaces Using Mixed Reality Composite Videos, *ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 7, issue 3, Article 113, pp. 1–25 (2023).
- [8] Lim, C., Kim, J., and Kim, M.J.: Thumble: One-Handed 3D Object Manipulation Using a Thimble-Shaped Wearable Device in Virtual Reality, Proc. *UIST '22 Adjunct*, Article 17, pp. 1–3, ACM (2022).
- [9] Aigner, R., Wigdor, D., Benko, H., Haller, M., Lindlbauer, D., Ion, A., Zhao, S., Koh, JTKV.: Understanding Mid-Air Hand Gestures: A Study of Human Preferences in Usage of Gesture Types for HCI, *Technical Report MSR-TR-2012-111* (2012).
- [10] Fashimpaur, J., Karlson, A., Jonker, R.T., Benko, H. and Gupta, A.: Investigating Wrist Deflection Scrolling Techniques for Extended Reality, Proc. *CHI '23*, Article 386, pp. 1–16, ACM (2023).
- [11] Brasier, E., Chapuis, O., Ferey, N., Vezien, J. and Apert, C.: ARPads: Mid-air Indirect Input for Augmented Reality, Proc. *ISMAR '20*, pp. 332–343, IEEE (2020).
- [12] Paredes, L., Ipsita, A., Mesa, C.J., Martinez Garrido, V.R. and Ramani, K.: StretchAR: Exploiting Touch and Stretch as a Method of Interaction for Smart Glasses Using Wearable Straps, *ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 6, issue 3, Article 134, pp. 1–26 (2022).
- [13] Ens, B., Byagowi, A., Han, T., Hincapié-Ramos, J.D. and Irani, P.: Combining Ring Input with Hand Tracking for Precise, Natural Interaction with Spatial Analytic Interfaces, Proc. *SUI '16*, pp. 99–102, ACM (2016).
- [14] Ham, J., Hong, J., Jang, Y., Ko, S.H. and Woo, W.: Smart Wristband: Touch-and-Motion-Tracking Wearable 3D Input Device for Smart Glasses, *Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*, pp. 109–118 (2014).
- [15] Dobbstein, D., Hock, P. and Rukzio, E.: Belt: An Unobtrusive Touch Input Device for Head-Worn Displays, Proc. *CHI '15*, pp. 2135–2138, ACM (2015).
- [16] Stanke, D., Schroth, P. and Rohs, M.: TrackballWatch: Trackball and Rotary Knob as a Non-Occluding Input Method for Smartwatches in Map Navigation Scenarios, *ACM Hum.-Comput. Interact.*, vol. 6, issue MHCI, Article 199, pp. 1–14 (2022).
- [17] Lee, J.-E., Ahn, J.-E., Park, K., Choi, G.-E. and Moon, I.-Y.: Design and Implementation of Trackball Based UI for Efficient Text Entry on Smartwatch, *The Journal of Korea Navigation Institute*, vol. 19, issue 5, pp. 452–457 (2015).
- [18] Yoon, H. and Park, S.-H.: A Non-Touchscreen Tactile Wearable Interface as an Alternative to Touchscreen-Based Wearable Devices, *Sensors*, vol. 20, issue 5, Article 1275 (2020).
- [19] Byers, C.J., Bittner, C.A. and Hill, G.S.: Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary?, *Advances in industrial ergonomics and safety I*, pp. 481–485 (1989).
- [20] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, *Usability Eval. Ind.*, vol. 189 (1995).
- [21] Kim, S. and Lee, G.: Virtual Trackball on VR Controller: Evaluation of 3D Rotation Methods in Virtual Reality, Proc. *CHI EA '23*, Article 310, pp. 1–6, ACM (2023).
- [22] Vuibert, V., Stuerzlinger, W. and Cooperstock, R.J.: Evaluation of Docking Task Performance Using Mid-Air Interaction Techniques, Proc. *SUI '15*, pp. 44–52, ACM (2015).
- [23] Wobbrock, O.J., 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, ACM (2011).
- [24] Ashbrook, D., Baudisch, P. and White, S.: Nanya: Subtle and Eyes-Free Mobile Input with a Magnetically-Tracked Finger Ring, Proc. *CHI '11*, pp. 2043–2046, ACM (2011).
- [25] Kubo, Y.: Ring-Type Indirect Pointing Device for Large Displays Using Three-Axis Pressure Sensor, Proc. *SUI '22*, Article 33, pp. 1–2, ACM (2022).