

絵画的奥行き手掛かりと反応位置の設計に基づく 空中像インターフェースの評価

小湊 咲[†] 小泉 直也[†]

[†] 電気通信大学 情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†]kominato@media.lab.uec.ac.jp, [†]koizumi.naoya@uec.ac.jp

あらまし 空中像は、実像を空中に結像させる映像技術であり、非接触操作可能なインターフェースとして注目されている。しかし、触覚フィードバックがないため押下感を知覚しにくく、指が空中像を過剰に貫通する課題がある。本研究では、絵画的奥行き手掛かりによる押下感提示と、押下反応位置の調整による貫通抑制手法を提案する。実験の結果、絵画的奥行き手掛かりの付与は操作の快楽性を向上させる一方、タスク完了時間を延長し、注意を分散させる可能性が示唆された。また、反応位置を結像面より手前に設定することで、押下深度および接触時間が有意に減少し、指の貫通量の抑制に有効であることが示された。

キーワード 空中像インターフェース、絵画的奥行き手掛かり、押下感、反応位置

Evaluation of a Mid-Air Image Interface Based on Pictorial Depth Cues and Response Position Design

Saki KOMINATO[†] and Naoya KOIZUMI[†]

[†] Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1
Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: [†]kominato@media.lab.uec.ac.jp, [†]koizumi.naoya@uec.ac.jp

Abstract Mid-air images are imaging technologies that form real images in the air and have attracted attention as interfaces enabling contactless interaction. However, because they do not provide tactile feedback, it is difficult for users to perceive a pressing sensation, and users' fingers tend to excessively penetrate the mid-air image. In this study, we propose a method for presenting a pressing sensation using pictorial depth cues and suppressing finger penetration by adjusting the press response position. Experimental results suggested that the addition of pictorial depth cues improved the hedonic quality of operation, while increasing task completion time and potentially distracting users. In addition, setting the response position in front of the imaging plane was shown to be effective in reducing finger penetration by significantly reducing press depth and contact time.

Key words mid-air image interface, pictorial depth cues, pressing sensation, response position

1. はじめに

空中像とは、ディスプレイ映像を光学素子によって空間中に結像させる技術であり、裸眼で観察可能な実像である。2次元ディスプレイを用いて生成された空中像は、空中の2次元平面上に結像する。

空中像は、非接触で操作可能なインターフェースとして注目されている。実際に、コンビニエンスストアの決済端末ディスプレイ [1] やエレベータのボタン [2] などに導入されており、感染対策の観点からも有用である。

しかし、空中像インターフェースの設計指針は十分には確

立されていない。空中像は従来のタッチディスプレイとは異なり、空間中に映像を提示するため、物理的な接触による触覚フィードバックを得ることができない。その結果、ユーザーは「押下感」を得にくく、適切な押下奥行き位置や押下タイミングを把握しづらいという課題が生じる。なお、本研究における押下感とは、ボタンを奥に押し込んだ感覚を指し、その定義は先行研究に基づく [3]。さらに、押下感が不十分であることから、指が空中像を過剰に貫通してしまう可能性もある。

そこで本研究では、空中像ボタンにおける視覚的な押下感の付与および押下反応位置の調整が、ユーザビリティに与える影響を評価する。まず、絵画的奥行き手掛かりを用いて、ボタン

が押し込まれるような視覚表現を導入し、視覚的な押下感を付与する。また、空中像ボタンの押下反応位置を変化させ、押下したことを早期に知覚させることで、指の過剰な貫通の抑制を図る。これらの検証を通して、空中像インターフェースにおけるユーザビリティ向上に有効な設計指針について検討する。

2. 関連研究

2.1 VRにおける空中操作

VR環境における空中操作の研究では、立体的な視覚表現が押下感や操作パフォーマンスに与える影響について調査されている。Kimら[4]は、VR環境における空中ボタン操作において、ボタンを立体的に突出させる表現が、触覚錯覚や時空間認知の向上に有効であることを示した。特に、立体視による奥行き手掛かりは、押下タイミングの正確な知覚に寄与することが報告されている。また、参加者の90%がこの機能を支持しており、他の疑似触覚提示と組み合わせることで、物理デバイスを用いずに高い満足度を実現できる可能性が示唆されている。さらに、Kyudongらの研究[5]では、ボタンが沈み込む視覚表現を伴う「プッシュ方式」は、沈み込む表現のない「タッチ方式」と比較して、エラー数が有意に少ないことを明らかにした。加えて、実験参加者からは「実際にボタンを押しているように感じた」という評価が得られており、押下時の視覚的变化が押下感を補完している可能性が示唆されている。Bermejoら[6]は、VR環境におけるボタンの視覚的表現が入力効率に与える影響について調査している。その結果、物理ボタンを模した3D表現は「より現実的」とであると評価された一方で、入力速度や押下時間などの客観的なパフォーマンス指標においては、簡素な2次元表現の方が優れていることを示した。このことは、奥行き手掛かりを多く付与することが、必ずしも入力効率の向上につながるわけではないことを示唆している。

また、視覚表現に加えて、空中操作における触覚フィードバックが入力パフォーマンスに与える影響についても調査されている。Bermejoら[6]は、ユーザーへの振動刺激が、空中操作において、指の過剰な沈み込みを抑制するガイドとして機能することを報告している。この研究では、振動刺激によってボタン押下深度が約35%減少し、より繊細で制御されたインタラクションが可能になることが示されている。

しかし、本研究で対象とする2次元空中像では、VR環境のような立体視に基づく奥行き手掛かりを利用することが難しく、また、触覚提示デバイスの導入には、コストやシステムの複雑化といった課題が存在する。

2.2 空中像における空中操作

空中像を用いた空中操作インターフェースに関する研究では、動的な視覚フィードバックがパフォーマンスやユーザー満足度の向上に寄与する可能性が示されている。Chanら[7]は、空中ディスプレイ操作時に疑似シャドウを提示する手法を提案している。この手法では、疑似シャドウによって、ユーザーは自身の指が表示面へ近づく様子を継続的に把握できるため、操作時の不確かさが軽減され、高い満足度が得られることが報告されている。

また、視覚手掛かりに加えて、聴覚・触覚を組み合わせたマルチモーダルフィードバックによる操作支援についても研究が行われている。Teraoら[8]は、空中像インターフェースにおいて、ボタン押下時に「押された数字の色を反転させる」視覚フィードバックに加え、聴覚（タッチ音）、触覚（足裏への振動）を組み合わせたマルチモーダルフィードバック手法を提案している。その結果、3種類の感覚フィードバックを統合した条件が、最も高いユーザビリティ評価を得ることを示した。

しかし、これらの手法には、リアルタイムな位置推定や映像制御によるシステムの複雑化、触覚提示デバイスの導入が必要になるといった実装上の課題が存在する。

3. 提案

本研究では、空中像インターフェースの設計指針を検討するため、空中像ボタンに対する視覚的な押下感の付与と、押下反応位置の調整がユーザーの知覚や押下操作に与える影響を調査する。本研究では、以下の2つの手法を提案する。

- ・ 手法1：絵画的奥行き手掛かりを用いた視覚表現により、空中像ボタンに押下感を与える手法
- ・ 手法2：押下反応位置の調整により、押下時の過剰な指の貫通を抑制する手法

手法1では、ボタン背面への影の付与および押下時のボタン縮小表現の2種類を採用した。手法2では、押下反応位置を空中像の結像位置およびその手前に設定した。

本手法により、触覚フィードバックを持たない空中像インターフェースにおいても、視覚情報のみを用いて押下感を補完するとともに、押下時の指の過剰な貫通を抑制できると考えられる。手法1の絵画的奥行き手掛かりの付与により、ボタンが奥方向へ押し込まれる様子を提示することで、ユーザーに押下を実感させることを目指す。また、手法2では、押下反応位置を結像位置より手前に設定することで、押下フィードバックを早期に提示し、より早い段階で押下したことを知覚しやすくすることで、指の過剰な貫通の抑制を目指す。加えて、両手法は2次元ディスプレイ上で実現可能な視覚表現のみを用いるため、触覚提示デバイスを必要とせず、簡易なシステム構成で実装可能である。

4. 実験

4.1 光学設計および実装

本システムでは、2次元ディスプレイとMMAPを用いて2次元空中像を提示した。図1に示すように、2次元ディスプレイの光がMMAPを通過し、MMAPに対してディスプレイと面対称な位置に空中像が結像される。結像位置はMMAPの中心から22cm手前に設定し、観察位置はMMAPの中心から72cm手前に設定した。この観察位置は、日本人青年女性の平均腕長67.31cmを参考に[9],[10]、着座姿勢で無理なく到達可能な範囲として設定した。

実験装置は、2次元ディスプレイ、MMAP、および光学式モーションキャプチャシステムで構成されている。2次元ディスプレイには、Intehill 高画質モバイルモニター F13NA (13.3

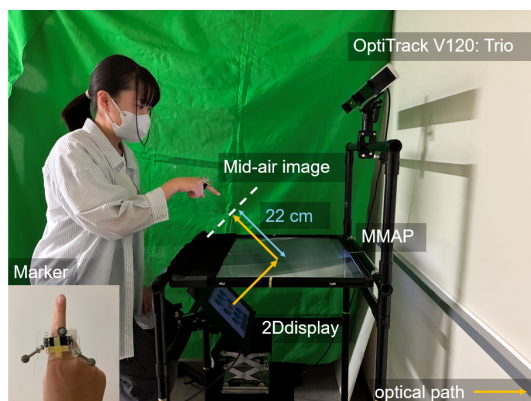


図1 空中像提示装置の構成。

インチ，輝度 400 cd/m^2 ，解像度 1920×1080 ），MMAP には ASKANET 製 ASKA3D プレート（ $488 \text{ mm} \times 488 \text{ mm}$ ）を使用した。また，指さし位置の計測には光学式モーションキャプチャシステムである OptiTrack V120: Trio を使用し，指に装着したマーカーの位置をトラッキングした。映像の作成には，Unity ソフトウェア Ver. 2022.3.42.f1 を使用した。

4.2 実験参加者

実験参加者は，21 歳から 24 歳の男性 11 名，女性 5 名の計 16 名で構成された（平均年齢 22.38 歳， $SD = 0.96$ ）。全参加者は，裸眼または矯正視力において，日常生活に支障のない視力を有していた。

4.3 実験 UI と提示条件

本研究では，先行研究 [6] に基づき，1～9 の数字が記されたボタンを図 2 (a) に示すように配置したボタンインターフェースを用いた。ボタンのサイズは一辺 2.5 cm に設定した。この寸法は，使用したディスプレイの描画領域内にすべての UI 要素を収めつつ，操作時に指先でボタンが完全に隠蔽されないサイズとして決定した。また，隣接するボタン本体同士の間隔は 1.5 cm に設定した。これは，ボタンの影が隣接する他のボタンと重なることを防ぐためである。実験条件は，「絵画的奥行き手掛かりの有無」と「反応位置の違い」の 2 要因 2 水準，合計 4 条件（ 2×2 ）を設定した。

絵画的奥行き手掛かりは，図 2 (b) に示すようなボタンの影および大きさの変化を用いた。押下時には，ボタンの大きさを縮小させることで，ボタンが奥へ押し込まれたような視覚効果を与えている。さらに，影をボタンの背面に配置し，ボタンの縮小に合わせて影の位置やサイズも変化させることで，ボタンが前後方向に移動している印象を強調している。これらの手掛かりは，先行研究 [3] において「押下感」の向上に寄与することが示された組み合わせとして採用しており，影の配置やボタンの縮小率も同研究の仕様に準拠した。本システムでは，一般的なタブレット端末（iPad 等）の UI と比較してボタン本体と影の距離を大きく設定している。これは，押下動作に伴う影の移動量を強調することで，触覚フィードバックのない空中像において「ボタンを押し込んだ」という視覚的变化を明確に知覚させることを目的としている。

反応位置は，空中像の結像位置（ 0 cm ）で反応する条件と，

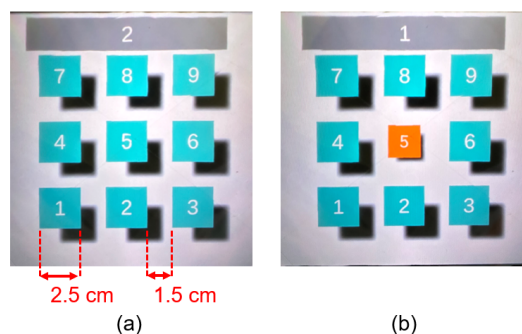


図2 (a) ボタン配置図，(b) ボタン押下前後の見た目。周囲のボタンが押下前，中央のボタンが押下後を表している。

予備実験で最も好まれた結像位置より 2 cm 手前で反応する条件の 2 条件を設定した。予備実験では， $0 \text{ cm} \sim 5 \text{ cm}$ の範囲を 1 cm 刻みで比較し，押下しやすさおよび違和感の少なさの観点から最も評価が高かった 2 cm を採用した。このように反応位置を結像位置よりも手前に設定した理由は，ユーザーがボタンの視覚的变化を認識してから運動を停止するまでに要する時間を考慮したためである。結像位置を反応点とした場合，ユーザーがボタンの変化を目視し，「押下した」と判断して指を止めるまでのわずかな間に，指が結像面を通り越して貫通してしまう。先行研究 [7] において，このような指先位置と映像位置のずれが不快感につながる事が指摘されている。そこで，反応位置を手前にオフセットすることで，視覚フィードバックを早期に提示し，貫通を抑制する設計とした。

4.4 実験手順

参加者 1 名あたりの実験時間は約 30 分であった。条件の提示順序は，順序効果を抑制するため，ラテン方格法に基づいてランダム化した。また，各試行において提示される数字の順序についても，特定の数字に偏りが生じないように調整したうえでランダムに決定した。各条件における個別の手順は以下の通りである。

(1) 練習セット：各条件の開始時に，操作に慣れるため 10 試行からなるタスクを 1 セット実施した。

(2) 本試行セット：同様のタスクを 3 セット（計 30 試行）実施した。

(3) 主観評価：1 つの条件（計 3 セット）が終了するごとに，UEQ 短縮版 [11] によるアンケートを実施した。

各試行では，画面上部にターゲットとなる数字が提示され，参加者はそれと一致する空中像ボタンを押下するよう求められた。本試行の総数は，4 条件 $\times$ 30 試行 = 合計 120 試行である。

4.5 評価指標

本実験では，空中像インターフェースを客観的・主観的の両面から評価するため，以下の指標を取得した。なお，客観的指標の定義は先行研究 [6] に準拠している。

客観的指標

(1) タスク完了時間：1 回目のボタン押下から 10 回目のボタン押下までに要した時間。

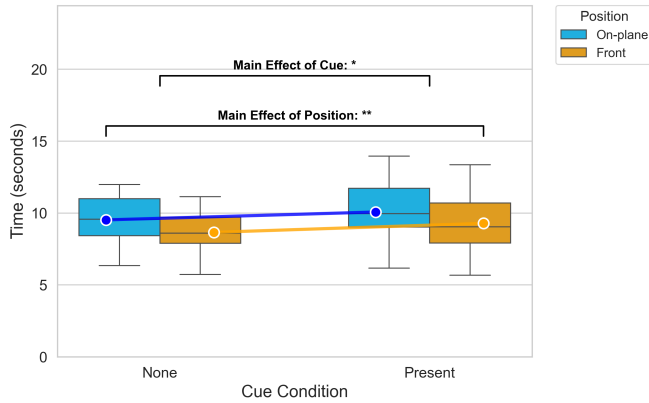


図3 各条件におけるタスク完了時間 (* $p < .05$, ** $p < .01$).

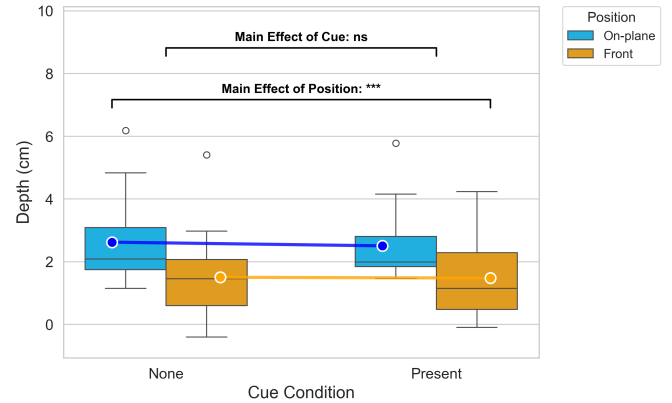


図5 各条件における押下深度 (*** $p < .001$, ns: 有意差なし).

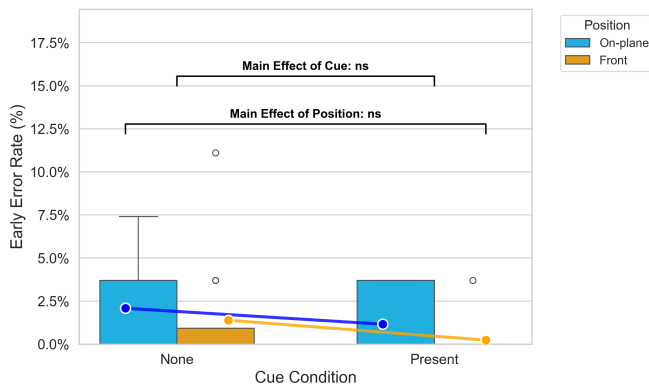


図4 各条件における早戻しエラー率 (ns: 有意差なし).

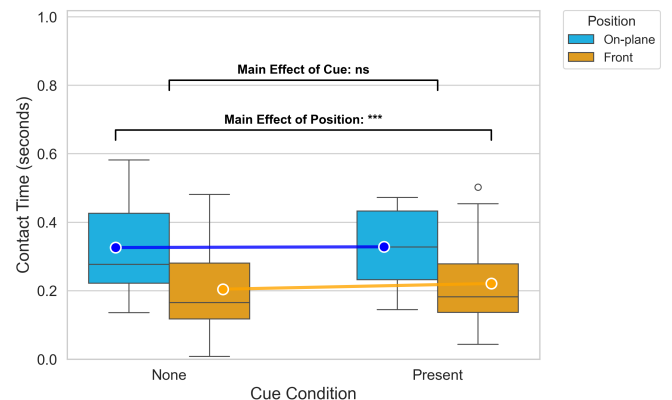


図6 各条件における接触時間 (*** $p < .001$, ns: 有意差なし).

(2) 早戻しエラー：ボタン接触前に指を引き戻した割合 (エラー回数を正解数 10 で除算)。

(3) 押下深度：結像面に対して指がどの程度貫通したかを示す値。

(4) ボタン接触時間：指が空中像の結像面を越えている時間。

早戻しエラー率は、物理的な接触面がない空中像の「位置の過小評価」を評価するために採用した。

主観的指標

UEQ 短縮版 (日本語版 [12])：実用性および快楽性に関する評価。各項目は-3 から 3 までの 7 段階尺度で回答させた。

4.6 実験結果

4.6.1 客観的評価

図 3, 4, 5, 6 に、全参加者における各条件のタスク完了時間 (単位: s), 早戻しエラー率 (単位: %), 押下深度 (単位: cm), 接触時間 (単位: s) の結果を示す。接触時間については、被験者内要因である「手掛かり」と「反応位置」の 2 要因に対して、対応のある 2 要因分散分析 (ANOVA) を実施した。一方、タスク完了時間、早戻しエラー率および押下深度については、Shapiro-Wilk 検定により正規性を検証した結果、いずれも正規性を満たさなかった。そのため、整列ランク変換 (Aligned Rank Transform: ART) [13] を適用した後、2 要因分散分析を実施した。

a) タスク完了時間

手掛かりなし条件および反応位置を手前とした条件において、タスク完了時間が有意に短かった (手掛かり: $F(1, 15) = 6.33, p < .05$, 反応位置: $F(1, 15) = 12.59, p < .01$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 0.32, p = .581$). 図 3 に示される通り、手掛かりについては、なし条件 ($M = 9.09$ s) があり条件 ($M = 9.69$ s) より約 0.60 秒 (6.2%) 短縮した。自由回答では「ボタンの大きさが変化すると、より深く押す必要があると感じた」との声があり、視覚的手掛かりが押下動作に影響した可能性がある。反応位置については、手前条件 ($M = 8.97$ s) が結像位置条件 ($M = 9.81$ s) より約 0.84 秒 (8.6%) 短かった。これは、指の移動距離の短縮が入力のスムーズさや負担軽減に寄与したためと考えられる。

b) 早戻しエラー率

手掛かりの有無による有意差は認められなかったが、反応位置を手前とした条件においてエラー率が低下する傾向が見られた (手掛かり: $F(1, 15) = 1.07, p = .318$, 反応位置: $F(1, 15) = 3.22, p = .093$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 1.23, p = .285$). 図 4 より、反応位置については、手前条件 ($M = 0.81\%$) が結像位置条件 ($M = 1.62\%$) よりエラー率が低く、約 50% (0.81 ポイント減) に抑制された。自由回答では「手前で反応する条件の方が、自分の意図した位置で反応している感覚があった」との意見があり、反応位置の設定が「早戻しエラー」の抑制に寄与した可能性が示唆された。

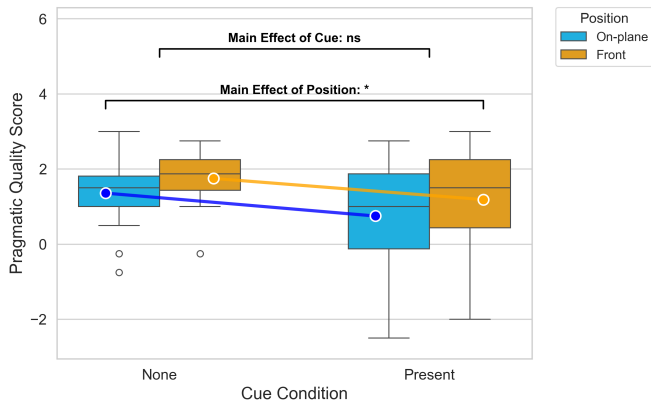


図7 各条件における実用性スコア (* $p < .05$, ns: 有意差なし).

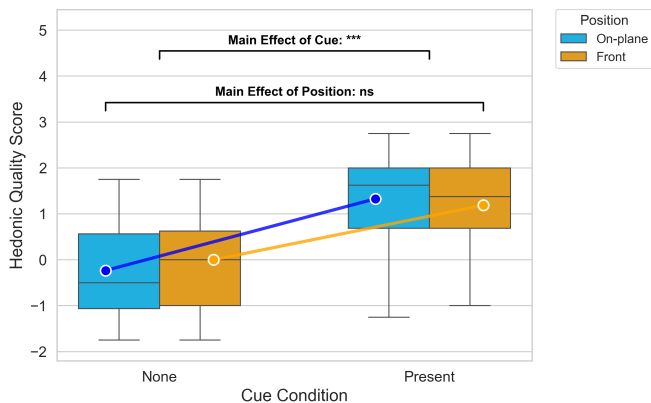


図8 各条件における快楽性スコア (*** $p < .001$, ns: 有意差なし).

c) 押下深度

手掛かりの有無による有意差は認められなかったが、反応位置が手前の条件において押下深度が有意に減少した(手掛かり: $F(1, 15) = 0.05, p = .819$, 反応位置: $F(1, 15) = 28.86, p < .001$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 0.00, p = .984$). 図5より、反応位置については、手前条件 ($M = 1.49$ cm) が結像位置条件 ($M = 2.57$ cm) より約 1.08 cm (42.0%) 浅かった。これにより、反応位置を手前に設定することで物理的な押し込み量が抑制されることが示された。

d) 接触時間

手掛かりの有無による有意差は認められなかったが、反応位置が手前の条件において接触時間が有意に短縮された(手掛かり: $F(1, 15) = 0.27, p = .610$, 反応位置: $F(1, 15) = 16.70, p < .001$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 0.14, p = .712$). 図6より、反応位置については、手前条件 ($M = 0.213$ s) が結像位置条件 ($M = 0.327$ s) より約 0.11 秒 (34.9%) 短かった。これにより、反応位置を手前に設定することで、ボタンへの接触時間が短縮されることが示された。

4.6.2 主観的評価

次に、図7, 8にUEQ短縮版に基づく各条件の実用性および快楽性スコアの結果を示す。実用性スコアおよび快楽性スコアについては、それぞれ対応のある2要因分散分析(ANOVA)を実施した。

a) 実用性スコア

手掛かりの有無による有意差は認められなかったが、反応位置が手前の条件においてスコアが有意に向上した(手掛かり: $F(1, 15) = 2.92, p = .108$, 反応位置: $F(1, 15) = 7.17, p < .05$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 0.03, p = .858$). 図7より、手掛かりについては、なし条件 ($M = 1.56$) があり条件 ($M = 0.97$) より約 0.59 ポイント高かった。自由回答では「影やボタンサイズの変化があると情報量が多く、気が散る」との声があり、視覚的手掛かりが集中を妨げた可能性が考えられる。反応位置については、手前条件 ($M = 1.47$) が結像位置条件 ($M = 1.06$) より約 0.41 ポイント高かった。参加者からは「手前条件の方が手の移動距離が短く、スムーズに押せた」といった意見が得られ、物理的な負担軽減が実用性の向上に寄与したことが示唆された。

b) 快楽性スコア

反応位置による有意差は認められなかったが、手掛かりを付与した条件においてスコアが有意に向上した(手掛かり: $F(1, 15) = 28.75, p < .001$, 反応位置: $F(1, 15) = 0.18, p = .678$). 交互作用は有意ではなかった ($F(1, 15) = 3.25, p = .091$). 図8より、手掛かりについては、あり条件 ($M = 1.26$) がなし条件 ($M = -0.12$) より 1.38 ポイント高かった。自由回答では「見た目の変化が大きく、押下感があって楽しい」といった意見が得られた。このことから、視覚的な手掛かりの付与は、実用面でのノイズとなる可能性はあるものの、操作の面白さといった快楽的な側面の向上に寄与することが示唆された。

5. 考察

5.1 絵画的奥行き手掛かりが押下体験に与える影響

絵画的奥行き手掛かりは、空中像インターフェースにおける押下感や操作の面白さを向上させる可能性が示唆された。実験結果において快楽性スコアが有意に向上したのは、押下時のアニメーションによって押下完了を視覚的に明示することで、押下感を強めたためであると考えられる。空中像インターフェースでは、物理ボタンのような触覚的フィードバックが得られない。そのため、視覚的な手掛かりを付与することが、操作の面白さや手応えといった快楽的な側面を補完したと考えられる。

一方で、視覚的な手掛かりの付与は、押下時の注意配分や認知的負荷にも影響を与える可能性がある。実験において完了時間が長くなった背景には、視覚的な変化がユーザーに対して「より深く押す必要がある」という印象を与え、押下動作を慎重にさせていた可能性が考えられる。

以上より、絵画的奥行き手掛かりの付与は、空中像インターフェースにおける押下感や楽しさを高める一方で、入力時の集中を妨げる可能性があることが示唆された。そのため、空中像インターフェースの設計においては、押下感を強調する演出と、視覚的負荷とのバランスを考慮する必要がある。

5.2 反応位置が押下動作に与える影響

反応位置を手前に設定することは、空中像ボタン押下時の指の過剰な貫通を抑制し、円滑な押下動作を実現するうえで有効

である可能性が示された。実験において、タスク完了時間や押下深度、接触時間が改善した背景には、ユーザーが結像面まで指を到達させる前に押下フィードバックを得られることで、指を深く貫通させる必要がなくなり、動作を素早く完了できたためと考えられる。特に空中像インターフェースでは物理的な接触面が存在せず、押下完了の判断が視覚情報に依存するため、早い段階でフィードバックが提示されることが円滑な動作につながった可能性がある。また、自由回答からも示唆された通り、押下までの動作量の減少による操作負担の軽減が、主観的な実用性の向上に寄与したと考えられる。以上より、反応位置を手前に調整することは、指の貫通量を抑制し、円滑で負担の少ない押下動作の実現に寄与する可能性が示唆された。

また、空中像インターフェースでは、ユーザーが知覚する押下位置とシステムの反応位置を一致させることが操作精度に影響を与える可能性がある。実験において反応位置を手前に設定した条件で早戻しエラーが抑制された背景には、反応位置とユーザーの知覚する押下位置とのずれが小さくなっていた可能性がある。一方、反応位置を結像位置に設定した条件では、ユーザーが「押した」と感じた時点ではまだ反応位置に到達しておらず、その直後に指を戻してしまうことでエラーが発生したと考えられる。以上より、空中像インターフェースの設計においては、物理的な結像位置そのものではなく、ユーザーの知覚特性に基づいた反応位置設計が重要であることが示唆された。

5.3 本研究の限界と今後の展望

本研究の限界としては、検討範囲の制限が挙げられる。まず、実験条件は着座環境に限定されており、実利用環境を十分に再現できているとは言えない。そのため、今後はコンビニエンスストアの決済端末のように、立位で操作する状況を想定した検証が必要である。特に立位環境では、身長差によって空中像の見え方や視認可能範囲が変化することが想定されるため、空中像サイズや光学設計の最適化についても検討する必要がある。また、UI全体の視認性や視覚負荷についても十分に検討できていない。自由回答では「ボタン背面が明るく目が疲れる」といった意見も得られた。このことから、空中像インターフェースでは押下ボタン単体だけでなく、UI全体の配色や輝度設計についても考慮する必要があると考えられる。

今後の展望としては、視覚だけでなく音とのクロスモーダルな影響についても検証したい。実験では、手掛かりの付与による視覚的变化がユーザーの注意を引き、押下動作を慎重にさせていた可能性が示唆された。一方で、ボタン押下時に適切な聴覚フィードバックを提示することで、ユーザーは押下のタイミングを瞬時に知覚でき、過度に慎重な押下動作を抑制できる可能性がある。そこで、今後は視覚と聴覚のマルチモーダルなフィードバックについても検討を進め、空中像インタフェースに適した設計のガイドラインとして視覚情報・聴覚情報の提示方法を整理したい。

6. 結 論

本研究では、空中像インターフェースにおける押下動作支

援を目的として、絵画的奥行き手掛かりの付与および反応位置の調整を用いた設計手法を提案した。実験の結果、絵画的奥行き手掛かりを付与することで、視覚フィードバックのみでも押下感や操作時の楽しさを向上できる可能性が示された。また、反応位置を空中像の結像面より手前に設定することで、指の過剰な貫通を抑制し、円滑な押下動作を促進できる可能性が示された。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR216L および JSPS 科研費 JP26K03052 の支援を受けたものです。

文 献

- [1] 東芝テック株式会社, “世界初, 既存のタッチパネルを非接触化する「空中入力デバイス」の発売について,” 東芝テック公式サイト, Jan. 2022. <https://www.toshibatec.co.jp/news/release/20220128-01.html>, (参照 2026-05-14).
- [2] 株式会社アスカネット, “エレベーターでの活用事例,” ASKA3D 公式サイト. <https://aska3d.com/ja/use-elevator.html>, (参照 2026-05-14).
- [3] S. Kominato and N. Koizumi, “Enhancing the sensation of depth in mid-air image interactions with pictorial depth cues,” Proceedings of the 2025 31st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.1–10, 2025.
- [4] W. Kim and S. Xiong, “Pseudo-haptic button for improving user experience of mid-air interaction in VR,” International Journal of Human-Computer Studies, vol.168, p.102907, Dec. 2022.
- [5] K. Park, D. Kim, and S.H. Han, “Usability of the size, spacing, and operation method of virtual buttons with virtual hand on head-mounted displays,” International Journal of Industrial Ergonomics, vol.76, p.102939, 2020.
- [6] C. Bermejo, L.H. Lee, P. Chojacki, D. Przewozny, and P. Hui, “Exploring button designs for mid-air interaction in virtual reality: A hexa-metric evaluation of key representations and multi-modal cues,” Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., vol.5, no.EICS, pp.1–26, May 2021.
- [7] L.-W. Chan, H.-S. Kao, M.Y. Chen, M.-S. Lee, J. Hsu, and Y.-P. Hung, “Touching the void: direct-touch interaction for intangible displays,” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2625–2634, 2010.
- [8] Y. Terao, H. Mizushima, and K. Yamamoto, “Evaluation of usability improvement of contactless human interface with visual, auditory, and tactile sensation for aerial display,” Optical Review, vol.31, no.1, pp.126–133, 2024.
- [9] 河内まき子・持丸正明, “2006 : AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003、産業技術総合研究所 H18PRO-503,” <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/fbodydb/index.html>. Accessed: 2026-05-14.
- [10] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa, “The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr,” Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.79–80, 1996.
- [11] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski, “Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S),” International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, vol.4, no.6, pp.103–108, Dec. 2017.
- [12] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski, “User experience questionnaire,” <https://www.ueq-online.org/>. Accessed: 2026-05-14.
- [13] J.O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J.J. Higgins, “The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures,” Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.143–146, 2011.