



AR 拡張ディスプレイが重さ知覚に与える影響 － 把持端末の重量の効果 －

田辺隼人¹⁾, 橋口哲志²⁾, 片岡佑太³⁾, 森尚平⁴⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

2) 立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

3) 立命館大学 OIC 総合研究機構 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

4) VISUS, University of Stuttgart (Universitätsstraße 38, 70569 Stuttgart)

概要: AR 技術を活用して現実空間に情報を重ねることで, 新しいインタラクションの実現が試みられている. その一例として, 携帯端末に仮想的な表示領域を追従させ, 表示空間を拡張する AR 拡張ディスプレイ (AREDs) がある. 先行研究では, AREDs の視覚的要因が把持端末の重さ知覚に影響を与えることが示されているが, 異なる実験環境で現象が再現するかは不明確であった. そこで本研究では, 軽量の HMD を用いて同様の実験を実施し, 結果の再現性を検証した. また, 端末の重量を変えて実験を行うことで端末自体の重量が AREDs に与える影響を確認した. 実験の結果, HMD や端末自体の重量が AREDs の重さ知覚に影響を与えることが確認された.

キーワード: 重さ知覚, AR, Pseudo-haptics

1. はじめに

拡張現実 (Augmented Reality; AR) 技術の進展により, 物理的制約を超えた新たなインタラクション手法が各種提案されている [1, 2, 3]. その一つに, AR 拡張ディスプレイ (Augmented Reality Extended Displays; AREDs) がある. AREDs は, AR 技術を用いてユーザの身体やデバイスの周囲に仮想ディスプレイを拡張し, 空間内に新たな表示領域を提供するものである. これらの仮想ディスプレイは, ユーザのヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通じて視認できるため, デバイスの物理的な制約を超えた, より広域な情報の提示を可能とする [4].

Mori ら [4] は, ユーザが把持する携帯端末の周囲に仮想ディスプレイを配置し, その配置方向・距離・視覚的遅延の各要因が重さ知覚に与える影響を検討した. この研究では, 仮想ディスプレイの配置や表現方法によって, 重さ知覚に影響を与えることが示された. 一方で, 同研究は比較的重量のある HMD, および外部センサを使用しており, ユーザに身体的な負担を課していた.

近年の HMD は高解像度化・軽量化が進み, トラッキング用センサも小型化している. これらの技術的進歩は AREDs の利用環境に大きな変化をもたらし, 従来のように大きく重いデバイスを装着していた場合と比べ, より自然な動作での操作が可能となった. 一方で, ユーザが把持する端末の大きさに応じて重量や慣性といった物理的特性が変化し, この変化が仮想ディスプレイの特性 (配置・遅延など) と相互作用して, 重さの錯覚にどのように影響するかは明らかにされていない.

以上を踏まえ, 本研究は HMD およびトラッカーの軽量

化による新たなシステム環境で Mori ら [4] の効果の再現性を検証する. さらに, 実物体の重量は重さ知覚に影響することが報告されており, 端末の重量自体が AREDs の重さ知覚に与える影響も明らかにする. これにより, AREDs の設計指針に貢献する新たな知見の獲得を目指す.

2. 実験 1: 再現性確認実験

実験 1 では, Mori らが行った先行研究の再現性を検証するため, 軽量の HMD を用いて AREDs の配置方向および追従遅延時間が重さ知覚に与える影響を分析した.

実験設計: 本実験は, Mori ら [4] の実験設計を踏襲し, 参加者内デザインによる反復測定形式で実施した. 独立変数は「配置方向」および「距離」に加えて, 「遅延時間」とした.

実験 1-1 では, 配置方向として水平方向, 垂直方向, および対角方向の 3 種類を設定した. 具体的には, 3×3 マトリクス内の位置のうち, 最下段 ($L(0,0)$, $L(1,0)$, $L(2,0)$) を水平方向, 右列 ($L(0,0)$, $L(0,1)$, $L(0,2)$) を垂直方向, 右下から左上への対角線 ($L(0,0)$, $L(1,1)$, $L(2,2)$) を対角方向と定義した (図 1(a)). 距離は, 近距離, 中距離, 遠距離の 3 水準に分類した. 近距離は参加者に最も近い $L(0,0)$, 中距離は $L(0,1)$ および $L(1,1)$, 遠距離は $L(0,2)$ および $L(2,2)$ のディスプレイ位置に対応する. これらの組み合わせにより, 3 (配置方向) $\times$ 3 (距離) の計 9 条件が設定された.

実験 1-2 では, 独立変数として遅延時間を追加し, 6 水準 (0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75s) を設定した. 配置位置は 3 つの方向の中で最も参加者に近い位置 (水平方向

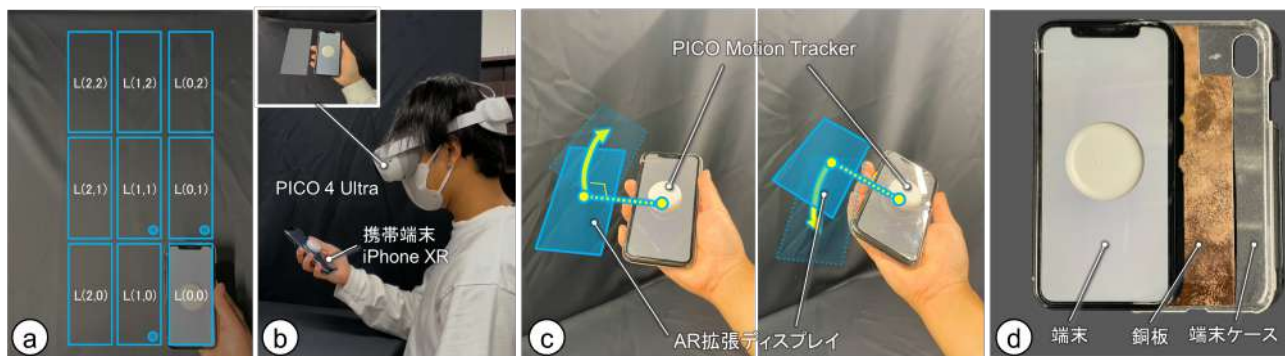


図 1: 実験のセットアップ a) 拡張ディスプレイの配置位置 b) デバイス構成 c) 端末の動かし方 d) 重さの調整方法

$L(1,0)$, 垂直方向 $L(0,1)$, 対角方向 $L(1,1)$) に限定し, 各遅延時間との組み合わせによって計 18 条件を構成した。

従属変数は, 提示された比較刺激に対する相対的な重さの評価値である。実験 1-1 では, 基準刺激として「ARED なし」の状態を提示し, これを 100 と仮定して比較刺激の重さを評価させた。一方, 実験 1-2 では, 基準刺激として「ARED あり, 遅延なし」の状態を提示し, 同様に 100 と仮定して比較刺激(遅延あり)の重さを評価させた。いずれの実験も, 参加者は提示後に感じた重さをマグニチュード推定法に基づいて相対値として数値で報告した。

使用機材: 本研究では, 軽量かつ高解像度の HMD として PICO 4 Ultra を使用した(図 1(b))。端末の位置取得には, PICO Motion Tracker (重量 15g) を端末前面に装着した(図 1(c))。これは先行研究 [4] で使用された HTC VIVE Pro (両眼解像度 2880×1600 ピクセル) および VIVE トラッカー (重量 89g) と比較して, 解像度・重量の両面で異なる。

実験手順: 参加者には胸の高さで肘を 90 度に曲げ, 体側に固定したまま, 手首を用いて前後に端末を振る動作を行わせた(図 1(c))。動作はメトロノーム (80 bpm) に同期させ, HMD の視野内で端末が一貫して認識されるよう, 手首をひねる角度を制限した。

各試行では, まず基準刺激を提示した後, 比較刺激を提示した。比較刺激は ARED が提示される条件で, 3×3 の配置の中からランダムに選択された位置にディスプレイが表示された。実験 1-2 では, 選択される位置は水平方向 $L(1,0)$, 垂直方向 $L(0,1)$, 対角方向 $L(1,1)$ の 3 箇所限定され, 遅延時間の条件と組み合わせた刺激が提示された。参加者はそれぞれの設定で 5 秒間動作を行い, 提示後に感じた重さを数値で報告した。

実験参加者: 22 名の大学生 (女性 5 名) が参加した。全員が情報工学を専攻し, AR 関連の実験に参加経験があった。重さの評価値に外れ値が含まれる可能性を考慮し, z スコアに基づいて各条件における重さの評価値の分布を確認した。その結果, z スコアが ± 2.5 を超える値を外れ値と判定し, 該当する重さの評価値を含む参加者のデータ全体を分析から除外した。

実験 1-1 (配置) の結果: ARED の配置方向 (水平: $L(0,0)$,

$L(1,0)$, $L(2,0)$, 垂直: $L(0,0)$, $L(0,1)$, $L(0,2)$, 対角: $L(0,0)$, $L(1,1)$, $L(2,2)$) と距離 (近距離: $L(0,0)$, 中距離: $L(0,1)$, $L(1,1)$, 遠距離: $L(0,2)$, $L(2,2)$) を要因とし, 3 (配置方向) $\times 3$ (距離) の計 9 条件を設定した (図 1(a))。

Shapiro-Wilk 検定で一部条件が正規性の仮定を満たさなかったため, Aligned Rank Test (ART) を用いた繰り返し測定分散分析を実施した。結果, 距離の主効果は有意 ($F(2, 144) = 18.71$, $p < 0.001$, $\epsilon^2 = 0.206$) で, 距離が増加するにつれて重さの評価値が低下する傾向が確認された。一方, 配置方向の主効果 ($F(2, 144) = 1.57$, $p = 0.211$, $\epsilon^2 = 0.021$) および交互作用 ($F(4, 144) = 0.55$, $p = 0.702$, $\epsilon^2 = 0.015$) は有意ではなかった。距離の主効果について Holm 補正後の事後比較では, 「遠距離」は「中距離」および「近距離」より有意に低い重さの評価値を示した ($p < 0.001$) が, 「中距離」と「近距離」間に有意な差は見られなかった ($p = 0.341$)。

さらに, 位置ごとの重さの評価値を端末からの距離に基づいて解析した結果, Friedman 検定で有意差が認められた ($\chi^2(8) = 44.71$, $p < 0.001$, $W = 0.294$: 中程度の効果)。Holm 補正による Wilcoxon 符号付順位検定では, $L(0,0)$ と $L(2,2)$ 間のみ有意差が確認された ($p = 0.047$, $r = 0.746$: 大)。最後に, 重さの評価値と端末からの距離を線形回帰で近似した結果, 回帰式は $y = -0.0423x + 112$, 決定係数は $R^2 = 0.7056$ であり, 距離が増加するにつれて重さの評価値が減少する傾向が示された。

実験 1-2 (遅延時間) の結果: ARED の配置方向 (水平: $L(1,0)$, 垂直: $L(0,1)$, 対角: $L(1,1)$) と遅延時間 (0~0.75s, 6 水準) を要因として分析を行った (図 1(a))。

Shapiro-Wilk 検定で一部条件が正規性を満たさなかったため, ART を用いた 2 要因繰り返し測定分散分析を実施した。その結果, 配置方向の主効果は有意 ($F(2, 289) = 5.22$, $p = 0.006$, $\epsilon^2 = 0.035$), 遅延時間も有意 ($F(5, 289) = 42.20$, $p < 0.001$, $\epsilon^2 = 0.422$) であり, 遅延時間の延長が重さの評価値に影響を与えた。一方, 交互作用は有意でなかった ($F(10, 289) = 0.97$, $p = 0.466$)。Holm 補正による事後比較では, 対角 $L(1,1)$ は垂直 $L(0,1)$ より有意に低い重さの評価値を示した ($p = 0.0058$)。対角と水平間には

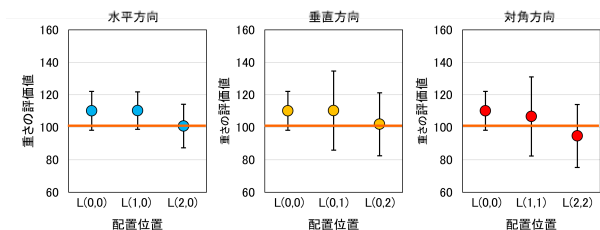


図 2: 実験 1-1 の結果 (配置方向)

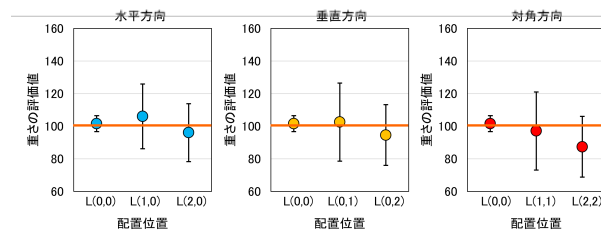


図 6: 実験 2-1 の結果 (配置方向)

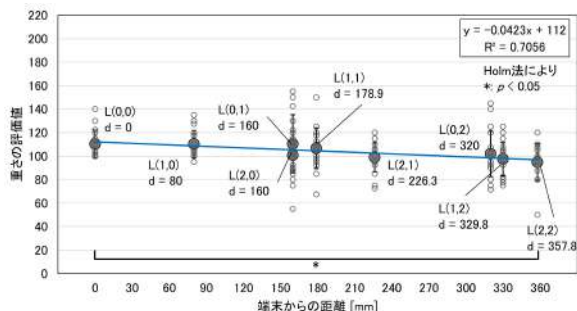


図 3: 実験 1-1 の結果 (配置距離)

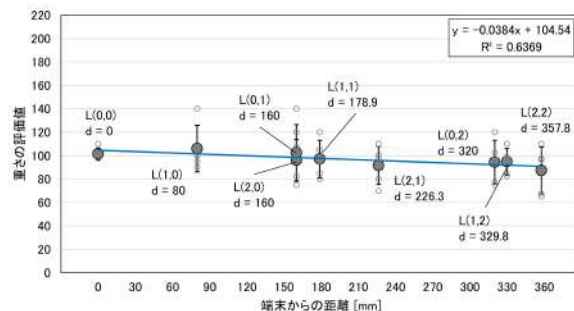


図 7: 実験 2-1 の結果 (配置距離)

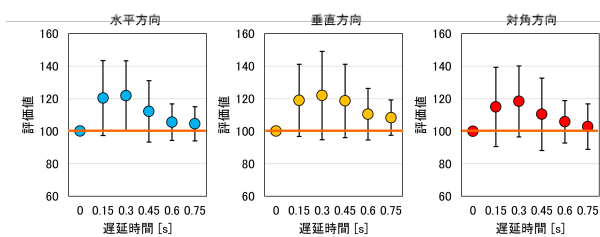


図 4: 実験 1-2 の結果 (配置方向)

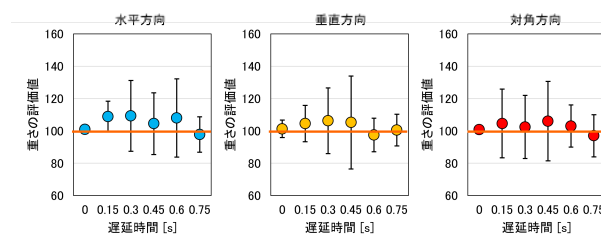


図 8: 実験 2-2 の結果 (配置方向)

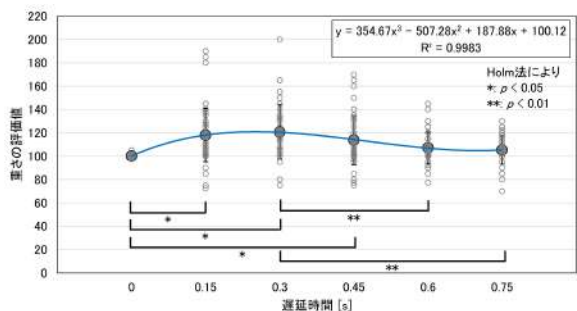


図 5: 実験 1-2 の結果 (遅延時間)

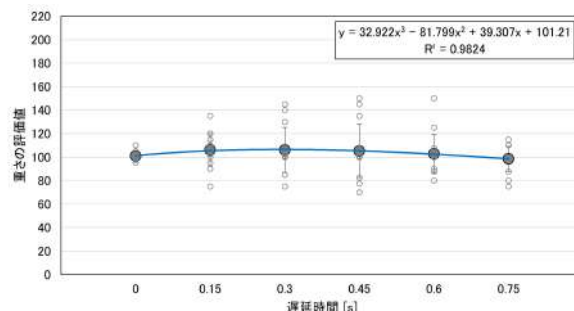


図 9: 実験 2-2 の結果 (遅延時間)

有意傾向が見られ ($p = 0.0501$), 水平と垂直間に有意差はなかった ($p = 0.380$).

遅延時間の分析として Friedman 検定を行った結果, 有意差が確認された ($\chi^2(5) = 43.94, p < 0.001, W = 0.293$). Holm 補正後の Wilcoxon 符号付順位検定では, 0s は 0.15~0.45s と比較して有意に低い重さの評価値を示し ($p_{\text{adj}} = 0.022 \sim 0.020, r = 0.734 \sim 0.755$), 0.60s・0.75s とは有意差がなかった ($p_{\text{adj}} = 0.098, 0.148$). また, 短い遅延時間や 0.30s と 0.60s の間でも有意差が確認された ($p_{\text{adj}} < 0.01$, 大きい効果量). 最後に, 遅延時間と重さの評価値の関係を 3 次多項式で近似した結果, 回帰式 $y = 354.67x^3 - 507.28x^2 + 187.88x + 100.12$ 決定係数 $R^2 = 0.9983$ で, 特に短い遅延時間において評価値の上昇が見られた.

総括: 実験 1 の結果, 配置では端末からの距離が重さの評価値に有意な影響を与え, 距離が増加するにつれて重さの評価値が減少する傾向が確認された. この結果は, 先行研究 [4] とは同様の傾向を示している. 一方, 遅延時間では, 短い遅延時間で重さの評価値が上昇し, その後緩やかに変化する非線形な関係が見られた. この点で先行研究 [4] と完全には一致しなかった.

3. 実験 2: 端末の重量に関する追実験

実験 2 では, 重さ知覚に影響を与える 1 つの要因である, 端末自体の物理的重量がどのように AREDS の重さ知覚に影響を与えるか分析した.

実験設計: 先行研究と同等の端末重量条件を再現するた

め、使用する携帯端末に 75g の銅板を装着し重量を調整した (図 1(d))。銅板は端末本体とケースの間に挿入し、日常の把持方法と乖離しないよう配慮した。端末重量以外は実験 1 と同様の条件で、ディスプレイの配置方向および追従遅延時間が重さの評価値に与える影響を検証した。実験手順は実験 1 と同様である。

実験参加者：5 名の大学生 (女性 1 名) が参加した。全員が情報工学を専攻し、AR 関連の実験経験があった。

実験結果：実験 2 でも、AREDs の配置と時間遅延が重さ知覚に与える影響を評価した。配置については、実験 1 と同様に配置方向 (水平方向・垂直方向・対角方向) による顕著な差は見られなかった。しかし、端末との距離に関しては、距離の増加に伴い重さの評価値が低下する傾向が見られた。時間遅延については、遅延時間の増加に伴う重さ知覚の特徴的な変化は見られなかった。回帰分析の結果、以下の三次関数が得られた。 $y = 32.922x^3 - 81.799x^2 + 39.307x + 101.21$, ($R^2 = 0.9824$) なお、実験 2 の参加者数は 5 名であるため、本結果は探索的な傾向の把握に留まるが、AREDs の配置による重さ知覚への影響に関しては、端末の重量を変更しても実験 1 と同様の傾向が確認された。しかし、遅延時間による影響は実験 1 と比較して異なる傾向が見られた。

4. 考察

本研究では、AREDs の端末からの距離、配置方向、および追従遅延時間が重さ知覚に与える影響を評価し、先行研究 [4] との比較を行った。

端末からの距離の影響：先行研究 [4] では、ディスプレイの距離が約 200mm まで増加すると重さの評価値が軽減し、それ以降は飽和する二次的な関係が示された。本研究では、距離の増加に伴い重さの評価値が直線的に減少する傾向が確認され、回帰式は $y = -0.0423x + 112$ (実験 1), $y = -0.0384x + 104.54$ (実験 2) となった。これらの結果は、一定距離内での軽量化が先行研究と一致していることを示唆する。

遅延時間の影響：先行研究 [4] では、追従遅延時間が 0.3 ~ 0.6s の場合に重さ知覚が顕著に増加し、0.6s を超えると効果が飽和することが報告されている。一方、本研究の実験 2 では、0.3 秒付近で最大値を示したが、全体的に重さの

評価値の変動は小さく、実験 1 で確認された傾向とは異なる結果となった。この差異は、HMD の特性、端末重量および重心の違いなどが要因として影響した可能性がある。

5. むすび

本研究では、軽量デバイス環境における AREDs の効果の再現性を検証し、配置位置および時間遅延が重さの知覚に与える影響を分析した。実験の結果、配置方向による顕著な差は見られなかったが、端末との距離については近距離で重く知覚する傾向が確認された。時間遅延の影響は全体として小さく、先行研究で報告された評価値がピークとなる遅延時間や評価値の飽和は再現されなかった。これは、本研究で用いた端末が先行研究よりも軽量であったことが、時間遅延による重さの知覚の変化を弱める要因となった可能性がある。今後は参加者数を増やし、より詳細な統計解析を行うことで、重さの知覚への影響をさらに明確化する予定である。

参考文献

- [1] Barrett Ens, Rory Finnegan, and Pourang Irani. The personal cockpit: a spatial interface for effective task switching on head-worn displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3171–3180, 2014.
- [2] Jens Grubert, Matthias Heinisch, Aaron Quigley, and Dieter Schmalstieg. Multifit: Multi fidelity interaction with displays on and around the body. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3933–3942, 2015.
- [3] Erwan Normand and Michael J. McGuffin. Enlarging a smartphone with ar to create a handheld vesad (virtually extended screen-aligned display). In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 123–133. IEEE, 2018.
- [4] Shohei Mori, Yuta Kataoka, and Satoshi Hashiguchi. Exploring pseudo-weight in augmented reality extended displays. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 703–710. IEEE, 2022.