



# タンジブルユーザインタフェースを用いた俯瞰的な MR 空間設計

Bird's-Eye MR Spatial Design Using Tangible User Interfaces

今谷真太郎<sup>1)</sup>, 赤羽亨<sup>2)</sup>, 飛谷謙介<sup>2)</sup>

Shintaro IMATANI, Kyo AKABANE, and Kensuke TOBITANI

- 1) 株式会社マーブル（〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 4-8-14, imatani.shintaro@marble-corp.co.jp）  
2) 情報科学芸術大学院大学（〒503-0006 岐阜県大垣市加賀野 4-1-7, akabane, tobitani@iamas.ac.jp）

**概要:** MR（複合現実）は空間設計に有効な技術であり、今後空間設計分野で MR 技術のさらなる浸透や発展が期待される。一方で、既存のアプリケーションは空間設計プロセスにおいて重要な俯瞰視点が欠けていることが多い。また、ハンドレイを用いた既存のオブジェクトとのインタラクション方法は難しく、疲労に繋がりがやすい。これらの問題に対処するため本研究では、実体的なミニチュアモデルを実空間の俯瞰図に設置していくことで、MR 空間の設計を行うことができるインタラクション手法である TangibleWIM を提案する。実験の結果、提案手法はハンドレイでオブジェクトを操作する手法と比べ、操作効率は高かったが作業負荷やユーザビリティに効果は見られなかった。

**キーワード:** 複合現実, タンジブルユーザインタフェース, HMD, 空間設計

## 1. はじめに

従来の空間設計プロセスでは、俯瞰的な図面や物理的なミニチュアモデルを作成してアイデアの検討を行っていた。現在では CAD ソフトウェアを使用して図面やモデルを作成し、3D で見え方を確認することも一般的となっている。また、Extended Reality (XR) 技術の応用も建築や空間設計の分野で盛んになってきており、仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) を設計プロセスに組み込むことで認知負荷の軽減や創造性の向上といった影響が主張されている [1, 2]。近年では Meta Quest 3 や Apple Vision Pro などの高機能な複合現実 (MR) に対応したヘッドマウントディスプレイ (HMD) が登場しており、これらの HMD は環境形状をセンサーで把握できるため、現実空間と連動したインタラクションが可能である。これによってその場の環境に直接実寸大の仮想オブジェクトを設置して確認することができるため、より空間設計とのシナジーが高いと考えられ、この分野で今後 MR を中心として XR 技術のさらなる浸透が予測される。

しかしながら現状多くの XR コンテンツは空間設計に適用する上で、俯瞰視点が欠けており一人称視点のみに限られる、ハンドジェスチャやハンドレイなどのインタラクション手法が難しく腕の曲げ伸ばしに伴う疲労を招くといった課題を抱えている。そのため従来の空間設計プロセスとは異なる思考や手順を挟む必要があり、設計時の創造性を低減させる可能性がある。

そこで我々は、実体的な家具のミニチュアモデル（タンジブルモデル）を実空間の俯瞰的なミニチュアに設置していくことで、その場の環境で実寸大の空間設計を行うことが

できるシステムである TangibleWIM を提案する（図 1）。TangibleWIM はタブレットと HMD を組み合わせて使用する。タブレット上には俯瞰視点の実空間のレプリカが縮小表示され、この上に実体的な家具のタンジブルモデルを設置すると、実空間の対応する場所には実寸大の 3D オブジェクトが出現する。タブレットに設置した後タンジブルモデルを動かすことで実寸大の 3D オブジェクトを連動して動かすこともできる。これにより、ユーザーは俯瞰視点と一人称視点を両立しながら、3D オブジェクトを直感的に操作できる。

提案手法の効果を検証するため、提案手法の仮想オブジェクトの操作効率やユーザビリティを測定することを目的とし、TangibleWIM とハンドレイをそれぞれ使用して、提示されたレイアウトを作成する定型タスクによる実験を行った。本稿では実験から得られた結果をもとに、提案手法の有効性と改善点を明らかにする。

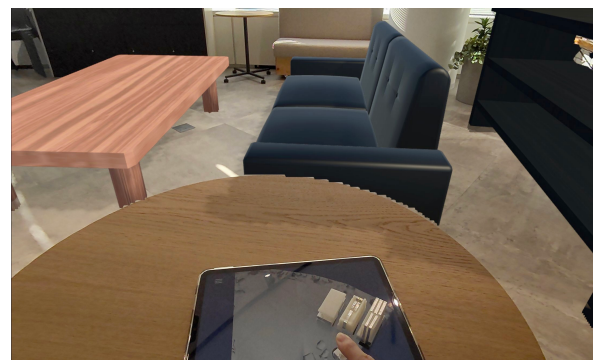


図 1: TangibleWIM のスクリーン画面

2. 関連研究

我々の提案手法は World in Miniature (WIM) と、タンジブルユーザインタフェース (TUI) の考え方に基づいている。WIM は仮想空間のミニチュアを第二の俯瞰的な視点で表示し、ミニチュア空間に対してインタラクションを行うことで空間全体に操作を反映させる手法である [3]。WIM は VR でのインタラクションだけでなく、AR/MR でもオブジェクト操作に応用されている [4, 5]。しかしながら、WIM へのインタラクションは従来のハンドレイやジェスチャを使った手法に限られている。TUI は実体的なオブジェクトを通じてデジタル情報を操作するユーザインタフェースである [6]。TUI と AR を組み合わせ空間設計に応用した研究では、TUI がデザイナーの認知負荷を軽減し創造性を高めることが示唆されている [1]。

本研究では WIM と TUI を統合し、HMD を使用してその場の MR 環境に適応可能なインタラクション手法を提案する。

3. 実装

3.1 システム構成

提案手法では HMD とタブレットを併用し、それぞれのデバイスはローカルネットワークで接続される。今回使用した HMD は Meta Quest3、タブレットは Apple iPad Pro (11 インチ) である。Quest3 には深度センサーが搭載されており、これを用いて空間形状をメッシュとして取得し、タブレットに送信する。タブレットは受信したメッシュを画面上に俯瞰視点で縮小表示する。タブレット上のメッシュと、Quest3 が保持する空間の実寸大のメッシュは座標が結びついており、タブレットの画面に家具のタンジブルモデルを設置すると後述する方法でモデルを識別し、対応する場所に実寸大の 3D オブジェクトが設置される。本研究で使

3.2 3D オブジェクトの設置と移動

TangibleWIM には MR 空間に 3D オブジェクトを設置するモード (以下、設置モード) と、設置した 3D オブジェクトを動かすモード (以下、移動モード) が存在する。設置モードではタブレット画面のミニチュア空間にタンジブルモデルを設置して指を離すと、HMD から見える MR 空間

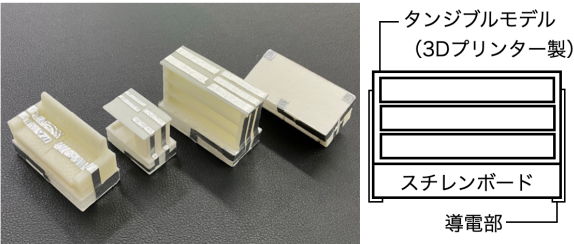


図 2: タンジブルモデルの例と構造

表 1: 導電部パターンと対応 3D オブジェクト

| 導電部のタッチパターン | 対応するオブジェクト |
|-------------|------------|
|             |            |
|             |            |
|             |            |
|             |            |
|             |            |
|             |            |
|             |            |

■:導電部

にタンジブルモデルと同じ角度で実物大の 3D オブジェクトが設置される。移動モードでは、動かしたい 3D オブジェクトに対応するタンジブルモデルに再度触れることで 3D オブジェクトを選択し、タンジブルモデルを画面上で動かしたり回転させることで 3D オブジェクトに動きを反映させることができる。

3.3 タンジブルモデル

3D オブジェクトの操作に用いるタンジブルモデルを図 2 に示す。タンジブルモデル本体は 3D プリンターを使用して作成した。タンジブルモデルの底面には画面接触部を平滑化するためスチレンボードを取り付けた。タンジブルモデルにはアルミテープの導電部が付随しており、モデルの左右をつまむように持ちタブレットに置くことで底面の導電部がタッチされた部分として反応する。これは静電容量方式タッチディスプレイの特性を利用している。表 1 に示すように、導電部配置によるタッチパターンによって 7 種類の 3D オブジェクトを設置することが可能である。底面の各導電部の面積は反応しやすさと配置のバランスから約

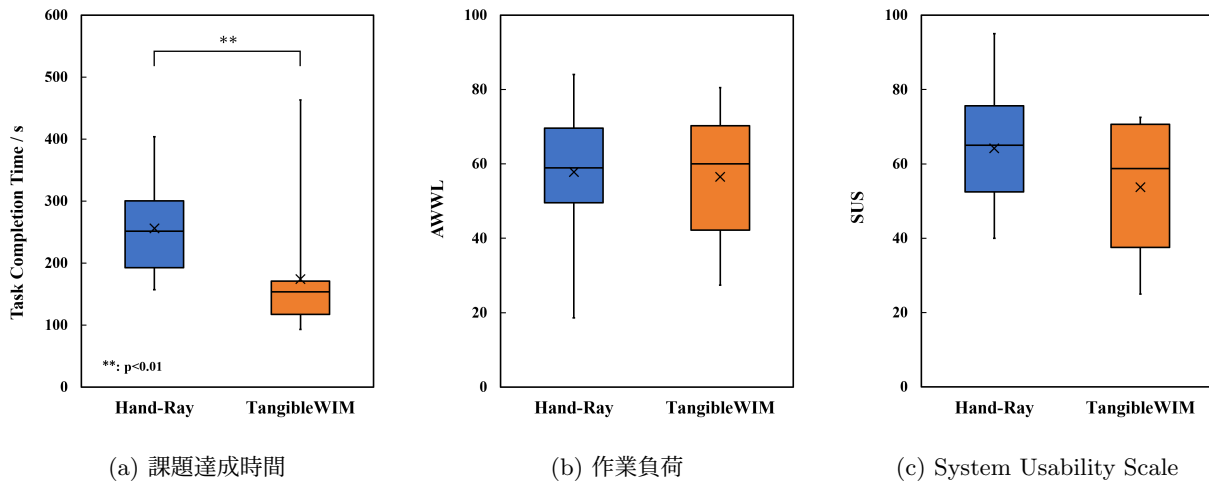


図 3: 実験結果

4mm × 4mm に設定した。設置時の角度は、タッチパターンによってオブジェクトの種類を識別した後、各 3D オブジェクトに合わせて導電部のタッチ座標をもとに算出したベクトルの角度を参照している。また移動モードにおける回転も、同様に算出したベクトルの角度変化を反映させることで実現している。

#### 4. ユーザスタディ

##### 4.1 参加者

実験参加者は 12 名 (男性 9 名, 女性 3 名) で, 平均年齢は 25.3 歳 (SD = 3.94) であった。参加者は全員 VR/AR/MR および空間/建築設計の経験に関するアンケートに 5 段階のリッカートスケールで回答し, それぞれの平均は VR/AR/MR 経験は 3.17 (SD = 1.21), 空間建築設計経験は 2.25 (SD = 1.64) であった。

##### 4.2 評価

実験は, 参加者がベースラインであるハンドレイを用いたインタラクション手法と TangibleWIM の両方で課題に取り組む被験者内デザインで実施した。評価指標としては各手法で課題達成時間, NASA-TLX[7] および System Usability Scale (SUS) [8] を取得した。NASA-TLX は 6 つの項目 (精神的要求, 身体的要求, タイムプレッシャー, 作業成績, 努力, フラストレーション) のアンケートに対するスコアをもとに作業負荷を求める評価方法であり, 本研究では芳賀, 水上の日本語版 [9] を使用した。SUS は 10 項目 5 段階のアンケートよりユーザビリティを評価する方法であり, 本研究では山内による日本語版 [10] を使用した。

##### 4.3 実験手順

参加者にデータの取り扱いや実験概要の説明を行ったのち, 1 つ目のインタラクション手法の説明を実施し, 5 分程度練習時間を設けた。その後, MR 空間に UI で示された空間レイアウトの見本 (部屋の俯瞰図に 6 つの 3D オブジェクトを含む) 通りに 3D オブジェクトを配置する課題を 10 分以内に実施するよう指示した。課題のレイアウトを作り終

えると NASA-TLX と SUS の回答を指示した。2 つ目のインタラクション手法で手法説明から NASA-TLX, SUS の回答までを繰り返した。実験は約 4m × 10m の部屋で実施した。課題および 2 つのインタラクション手法 (提案手法, ベースライン) の体験順はカウンターバランスされている。

#### 5. 実験結果

以下, 有意水準は  $p = 0.05$  と定めた上で結果を記述する。

##### 5.1 課題達成時間

課題達成時間の結果を図 3 (a) に示す。ハンドレイの平均値は 256.1 秒 (SD = 75.6), TangibleWIM の平均値は 174.3 秒 (SD = 94.9) であった。ウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ, TangibleWIM の課題達成時間は有意にハンドレイよりも小さかった ( $p < 0.01$ )。

##### 5.2 作業負荷

NASA-TLX の総合的な結果を図 3 (b) に示す。なお, 実験時のアンケートを簡略化するため, 本実験では一対一比較による重みづけを行わず項目のスコアの大きさ順に重みづけを行う AWWL[11] を算出した。AWWL はスコアが低いほど作業負荷が低いことを示す。ハンドレイの平均値は 57.8 (SD = 17.6), TangibleWIM の平均値は 56.5 (SD = 16.2) であった。ウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ, 有意差は見られなかった。次に NASA-TLX の各項目のスコアを示す。精神的要求では, ハンドレイの平均値は 42.5 (SD = 30.2), TangibleWIM の平均値は 44.2 (SD = 24.8) であった。身体的要求では, ハンドレイの平均値は 62.9 (SD = 21.6), TangibleWIM の平均値は 37.5 (SD = 29.3) であった。タイムプレッシャーでは, ハンドレイの平均値は 48.3 (SD = 29.4), TangibleWIM の平均値は 38.3 (SD = 22.4) であった。作業成績では, ハンドレイの平均値は 27.5 (SD = 22.4), TangibleWIM の平均値は 29.2 (SD = 15.4) であった。努力では, ハンドレイの平均値は 50.8 (SD = 24.2), TangibleWIM の平均値は 62.1 (SD = 26.7) であった。フラストレーションでは, ハンドレイの平

均値は 57.1(SD = 27.3), TangibleWIM の平均値は 69.6(SD = 13.5) であった。このうち, 身体的要求はウィルコクソンの符号順位検定で有意差を示した ( $p < 0.05$ )。

### 5.3 ユーザビリティ

SUS の結果を図 3 (c) に示す。SUS はスコアが高いほどシステムのユーザビリティが高いことを示す。ハンドレイの平均値は 64.2(SD = 15.0), TangibleWIM の平均値は 53.8(SD = 17.2) であった。ウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ, 有意差は見られなかった。

## 6. 考察

提案手法の課題達成時間はハンドレイよりも有意に短かったが, 作業負荷においては差が見られなかった。また SUS は有意差は見られなかったものの, 平均値では提案手法よりハンドレイの方が優れていた。これらのことから, 本研究で用いた課題においてはインタラクション手法の作業効率と作業負荷, ユーザビリティが必ずしも結びついているわけではないことがわかる。TangibleWIM の課題達成時間が短くなった要因としては, 俯瞰で空間全体を見ながら課題の見本で示された位置と角度に 3D オブジェクトを直接設置できるため, 移動や回転の調整が最小限で済んだことが考えられる。また TangibleWIM の利点として腕の曲げ伸ばしや身体の移動を伴わずにインタラクションを行えることが挙げられ, これによって NASA-TLX の身体的要求において TangibleWIM がハンドレイよりも有意に低いスコアを示したことが推測される。この結果から, 今回行った実験よりもさらに広い部屋で動線を意識する必要があるような, より実践的な課題においては TangibleWIM の効果がさらに大きくなる可能性がある。一方で参加者の手の大きさやタンジブルモデルの持ち方の癖によっては導電部が誤反応を起こし, 目的のオブジェクトが出せないという様子が見られた。また一度設置したオブジェクトの移動や回転は提案手法の精度が不足しており, 操作を幾度かやり直す参加者も見られた。こうした理由により提案手法がフラストレーションやユーザビリティという面で支持されなかったと推察する。今後の課題としてタンジブルモデルの識別方法や持ち方, 大きさなどの改善により, 操作精度を向上させる必要がある。

## 7. おわりに

本研究では, HMD とタブレットを組み合わせ, タブレットに表示されたミニチュア空間に実体的なミニチュアモデルを設置して MR 空間の設計を行う TangibleWIM というシステムを提案した。実験の結果, TangibleWIM はハンドレイによるインタラクション手法と比較して, 課題達成時間が短く作業効率が高いことが示された。一方で, 作業負荷やユーザビリティには有意な差が見られなかった。今後はタンジブルオブジェクトの識別や操作精度の改善によって, 作業効率とユーザビリティの両立を目指していく。また, 設計プロセスに着目した定性的な評価も実施する予定である。

## 参考文献

- [1] Mi Jeong Kim and Mary Lou Maher. The impact of tangible user interfaces on designers' spatial cognition. *Human-Computer Interaction*, Vol. 23, No. 2, pp. 101–137, 2008.
- [2] Rawan Alatta and Ahmed Freewan. Investigating the effect of employing immersive virtual environment on enhancing spatial perception within design process. *Archnet-IJAR*, Vol. 11, pp. 219–238, 2017.
- [3] Richard Stoakley, Matthew J. Conway, and Randy Pausch. Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pp. 265–272, USA, 1995.
- [4] Keiichi Ihara and Ikkaku Kawaguchi. AR Object Layout Method Using Miniature Room Generated from Depth Data. In Hideaki Uchiyama and Jean-Marie Normand, editors, *ICAT-EGVE 2022 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*, 2022.
- [5] Hyo Jeong Kang, Jung-hye Shin, and Kevin Ponto. A Comparative Analysis of 3D User Interaction: How to Move Virtual Objects in Mixed Reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 275–284, 2020.
- [6] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, p. 234–241, New York, NY, USA, 1997.
- [7] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [8] Brooke John. SUS: A “quick and dirty” usability scale, usability evaluation in industry. *usability evaluation in industry*, pp. 107–114, 1996.
- [9] 芳賀繁, 水上直樹. 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定. *人間工学*, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79, 1996.
- [10] 山内繁. エンジニアのための研究倫理. <https://s-yamauchi.w.waseda.jp/ResEthics/SUS/SUS.html> [アクセス日: 2025/7/10].
- [11] 三宅晋司, 神代雅晴. メンタルワークロードの主観的評価法 - NASA-TLX と SWAT の紹介および簡便法の提案 -. *人間工学*, Vol. 29, No. 6, pp. 399–408, 1993.