

MR デバイス環境における物理インタラクションを伴う日常タスク処理

津田 裕哉[†] 石橋 健[†] 大島 裕明[†]

[†] 兵庫県立大学 大学院情報科学研究科 〒 651-2197 兵庫県神戸市西区学園西町 8-2-1

E-mail: [†]ad22o041@guh.u-hyogo.ac.jp, ^{††}k_ishibashi@sis.u-hyogo.ac.jp, ^{†††}ohshima@ai.u-hyogo.ac.jp

あらまし 近年、情報への新しいインタラクション方法として、Mixed Reality (MR) 技術を使ったデバイスが注目されている。本研究では、MR デバイスの一つである HoloLens2 と物理的なオブジェクトを利用して、物理オブジェクトによるインタラクションを通じた日常タスク処理手法を提案する。提案手法では、我々が普段から取り組むような日常的なタスク、例えばメールの返信や文書、原稿の作成などのタスクを対象に、それらを MR デバイスを用いて直感的に処理、整理することを目的とする。MR デバイ스에搭載されたカメラを用いて、物理オブジェクトに貼り付けられた AR マーカを認識し、オブジェクトにタスクの情報を重畳して視界に表示することで、物理オブジェクトに情報を視覚的に紐づけることが可能となる。すなわち、本来は実体のない情報に物理的な実体を与えることができる。そうすることで、情報を実際に手に持つことが可能となり、より直感的に情報を操作することができる。また、提案する手法で実際にタスク処理を行ってもらい、有用性について評価した。

キーワード Mixed Reality, Augmented Reality, タスク処理

(AR) などがある。

1 はじめに

現代社会において、日常生活の中で電子メールのやり取りやデジタル文書の作成などに追われることも多く、スケジュールの管理やタスク管理までもデジタルで行うことが増えている。また、そういったタスクを閲覧したり、操作したりする方法としては、従来の平面のディスプレイを通して行われることがほとんどである。しかし、将来さらに進んでいくデジタル化に伴い個人が扱う情報量はさらに増加し、今までのような平面のディスプレイでは情報の処理が追いつかなくなっていくことが想定される。この問題を解決するための方法として、従来の平面のディスプレイに情報を提示するのではなく、現実空間を立体的に使い、情報を提示するというアプローチがある。そこで、昨今情報の新しい提示方法として注目されている Mixed Reality デバイスを用いて情報、特にタスクの情報を空間的に提示する。そして、その空間への情報の提示方法、インタラクション方法として、立方体形状の物理的なオブジェクトを取り入れることを考える。

Mixed Reality (MR) とは、複合現実感とも訳され[16]、現実の世界とコンピュータによる仮想の世界を継ぎ目なく融合させる技術を指す。MR は、Milgram ら [8] が 1994 年に初めて明示的に提唱した。この技術を実現するための方法は以前から活発に研究、開発されており、頭部に装着する HMD を用いた方法が最も一般的である。半透明のレンズで眼前を覆う HMD を用いて、現実の視界にデジタルな仮想オブジェクトを融合、あるいは重畳して表示する光学シースルー方式や、HMD に搭載されたカメラ映像に仮想オブジェクトを融合させ、視界に投影するビデオシースルー方式などがある [15]。本研究ではこの光学シースルー方式を取り入れたデバイスを用いている。関連する技術として、Virtual Reality (VR) や Augmented Reality

本研究では、MR デバイスと物理的なオブジェクトを利用して、情報への直感的なインタラクションを通して日常タスクを整理、処理する手法を提案する。タスク処理手法として、MR デバイスと物理オブジェクトを用いて、タスクへの優先度のタグ付けによる整理を主として行う。優先度タグを付ける過程で、その場でテキスト入力による処理ができそうなタスクについては、物理キーボードを用いての文書の作成等もできるようにする。

提案手法では、外部カメラが搭載された MR デバイスである HoloLens2 と、AR マーカが六面に貼り付けられた立方体形状の物体、平面の AR マーカを用いる。MR デバイスのカメラにより立方体の AR マーカを認識し、立方体の場所にタスクの情報を表示する。そうすることで、AR マーカが貼り付けられた物体を持ち上げるとその物体に情報が追従するような挙動をし、物理的な物体に情報を紐づけることが可能となる。言い換えれば、形のないデジタルな情報に、物理的な実体を与えることができる。この方法を用いれば、タスク情報を空間的に提示、配置することができる。また、本来は形のないデジタルな情報を実際に手に持つことができ、ディスプレイや従来のインタフェースで操作するよりも、直感的に情報にアクセス、または情報の処理を行うことができる。

本論文では、続く 2 節で Mixed Reality 技術を使った研究や MR と物理的なオブジェクトの利用などの先行研究について述べる。次に、3 節で日常タスクにおいて MR デバイスを利用する提案手法の説明や、対象とするタスクの種類、想定する状況について述べる。4 節でアプリケーションの詳しい設計や実際のシステム、物理オブジェクトの詳細について説明したあと、5 節で、評価方法と評価の結果、考察について述べ、6 節で今後の課題について記述し、まとめる。

2 関連研究

2.1 MR デバイスによる情報の提示

MR デバイスの利用は、情報の可視化や情報への新しいインタラクション方法、医療介護分野への応用などが広く研究されている。中には、博物館等の鑑賞体験の向上を目指す研究もなされている。横濱ら [18] や平澤ら [17] は MR デバイスを用いて「本を読む」という行為に焦点を当て、新しいインタラクションを研究していた。横濱ら [18] は、白紙で構成されたダミーの書籍のページに MR デバイスを用いて本文を投影することにより、電子書籍と紙の書籍の双方の利点を取り込んだ読書インタラクションを提案していた。平澤ら [17] は、MR デバイスは外の景色も同時に見る事ができるという利点を利用し、現地で実際の展示物の鑑賞をしつつ、普段は見る事ができない展示品への新たな鑑賞方法として MR デバイスを用いていた。

2.2 より実体感のあるインタフェースの研究

現実世界に存在する物理的な物体を、情報へアクセスするインタフェースとして使用する研究は、以前から様々な方法が提案されている。こうした、現実の物体をインタフェースとして扱い、情報を実際に手で触れられるようにしたインタフェースをタンジブルユーザインタフェース (TUI; Tangible User Interface) といい、Ishii らの研究 [7] が元となっている。Ishii ら [7] は、情報に物理的な実態を与え、現実の空間で情報を掴んで操作する TUI により、現実とデジタルの空間の差異を埋めることを目的としている。この論文では、metaDESK, transBOARD とよばれるプロトタイプを例に挙げている。metaDesk は、Ullmer ら [12] によって開発、提案された TUI の一つである。metaDesk では、地図情報が表示されたディスプレイを机として使い、その机の上に磁気センサー等を搭載した物理オブジェクトを置く。そして物理オブジェクトが搭載した各センサーによって、オブジェクトの机上面での位置を検出し、そのオブジェクトを動かすことによってディスプレイに投影されたデジタルな地図を拡大や縮小、回転をさせたり地図上の点をオブジェクトによって指し示したりすることができる。transBOARD は、metaDesk と同じく Ishii らによって開発、提案されたインタフェースである。transBOARD の構造はごく簡単で、一般的なホワイトボード、タグが取り付けられたペンとホワイトボードクリーナー、マーカが描かれたカード、赤外線レーザーを読み取るスキャナから成る。transBOARD は、ホワイトボードへの描画中、ペンとホワイトボードクリーナーの軌跡が赤外線によって追跡される。そしてその軌跡の情報を、カードに描かれたマーカに紐づけることによって、カードを持ち帰ったり作業場所を変更したとしても、専用のソフトウェアで軌跡を復元すればホワイトボードで作業した工程を再現することができる。このように transBOARD は一般的なホワイトボードの用途からは逸脱せずに、追加のデバイスを用いてホワイトボード上での作業を拡張する技術だといえる。metaDesk と transBOARD の二つのプロトタイプは発想こそ違えど、現実空間とデジタルな空間

間をシームレスに繋ぎ、二つの空間の差異を埋めるようなインタフェースとして設計されている。

Kaj ら [5] は、RFID (Radio Frequency Identifier) を利用した、身の回りの様々なものが情報を持つ空間を提案している。この研究では、机の上に置かれた様々な物体に RFID タグを取り付け、その RFID に文書の情報を割り当てる。そして RFID の情報を読み取るリーダを用いて、物体を物理的に整理するように、デジタルな文書を整理するシステムのプロトタイプを開発、提案している。

2.3 MR 環境における TUI

MR デバイスの大きな利点として、仮想のオブジェクトを現実の空間に自然に融合できるという点がある。言い換えれば、現実空間やそこに存在する物体を仮想的に拡張できるということである。この特徴に注目した研究は活発に行われている。このような複合現実や拡張現実の技術と、実体のあるインタフェースを組み合わせたものは Tangible Augmented Reality [2] とも呼ばれる [1] [2] [4] [6]。Ivan ら [10] はタイル状のオブジェクトを、情報を操作するためのインタフェースとして使用する技術を提案している。この研究では、AR マーカが描かれた 1 辺 15cm の正方形のタイルを複数枚用意し、それらを MR デバイスに搭載されたカメラによってマーカの位置、すなわちタイルの位置を追跡する。そしてタイルに割り当てられた情報を、タイルがある位置に描画することによって、物理的なオブジェクトにデジタルな情報を紐づけることが可能になる。そうすることで、デジタルな情報をまるで現実の物体のように手で扱えるようにした。また、この研究ではゴミ箱やクリップボードなどのツールの類もタイルに割り当てている。ある情報が紐づいたタイルとゴミ箱のタイルを近づけると、タイルに紐づいた情報が消えるといったように、通常ではマウスやキーボードで行う操作もタイルに対する手の操作のみで実現するように設計されている。

Wang ら [13] は、MR デバイスを用いた TUI を利用し、工業製品の設計のリモートレビューを複数人で行う手法を提案し、評価していた。この提案手法ではキューブに描かれたマーカをカメラで認識し、その場所に MR デバイスを通して仮想的に用意した工業製品の 3D モデルを表示する。このシステムを複数人で同時に、同一の 3D モデルに対して使用することで、より直感的に設計レビューを行えるとしていた。

2.4 MR によるリアルとバーチャルの融合

木川ら [14] は、6 面に AR マーカを貼り付けた立方体と光学シースルー型 MR デバイスを用いて、立方体の内部に仮想コンテンツがあるかのように表示する HaptoBOX という手法を提案していた。また、マーカを貼り付けた立方体の内部にソレノイドモジュールと振動子を組み込み、仮想コンテンツの内容に応じて触覚フィードバックを観察者に与え、視覚と触覚の両方で仮想コンテンツのリアリティを向上させていた。こういった手法を木川らは、「フィジカル MR ディスプレイ」と呼称しており、HaptoBOX 以外にも様々なアプローチを開発、検証し

ている [11] [19] [14]. 田中ら [19] はフィジカル MR ディスプレイ研究の一環として, AR マーカと MR デバイスを用いてインタラクティブな水族館体験システムを開発していた. 魚の餌に見立てた AR マーカを手を持ち, MR デバイス越しにマーカを見ると, 仮想的な熱帯魚が手の周りに集まってくる. また, 光源や音源, 複数の振動子を搭載した「サンゴディスプレイ」からは, 仮想の魚の挙動に合わせたエフェクト, 振動を感じ取ることができる. このように, フィジカル MR ディスプレイは, MR の視覚体験と併せて物理的なフィードバックを提示することによって, 仮想と現実の融合という MR 体験をより増強させるアイデアである.

3 日常タスク処理における MR デバイスの利用

3.1 想定する状況やタスク

想定する状況の一つとして, 普段からタスクや業務に追われており, タスクの管理や整理が追い付いていない, または整理を怠っている状況を考える. なお, ここでいうタスクとは, メールの返信や書類, 文書の作成, ミーティングの日程調整など, 大学生や社会人が日常的に直面するような軽作業とする. タスクの整理が追い付いていない状態が続くと, 優先度を決められずタスクの処理が非効率になったり, タスクに取り掛かるのが遅くなってしまうことが考えられる. また, 管理されていないタスクがあると, そのタスクに取り掛かる前にタスクのことを忘れてしまい, 結局取り掛からないままになってしまうことも考えられる. 以上の点を解決するために, 新たなタスク管理, 処理手法が必要なのではないかと考えた. そこで, 本研究では, MR デバイスを用いて物理的なオブジェクトにタスクの情報を紐づける. そしてそのオブジェクトを手で持って動かしたり, 所定の位置に置くという操作をすることによって, タスクの情報に優先度を表すタグを付与し, タスク整理を支援する. 以下に, 本研究においてタスクに対して行う主な操作を挙げる.

- タスクに対する優先度の割り当て
- オブジェクトを動かすことによる情報の整理
- 文書の作成, 編集

今回扱うタスクはそれぞれタスクの名前, タスクの締切日時, 優先度という属性を, メールや文書のタスクにはその本文を入力するコンテンツという属性を持っていると想定する. MR デバイスと物理オブジェクトを用いた操作では, 主に優先度を操作することによってタスクの整理, 及び処理をすることを目指す.

3.2 物理オブジェクトの利用

PC における情報の操作方法として, テキストのみが表示されるディスプレイにコンピュータへの命令をキーボードで打ち込み, PC を操作する方式 (CUI; Character User Interface) と, ディスプレイに表示されたボタンやウィンドウを, キーボードとポインティングデバイスを使って操作する方式 (GUI; Graphical User Interface) の二つに大別される. それらと並

ぶ情報へのアクセス方法として, Ishii ら [7] が 1997 年に発表したタンジブルユーザインタフェース (TUI; Tangible User Interface) は, 情報に物理的な実体を与えることによって, 平面のスクリーン上ではなく, 現実の空間の中で手を使って直接情報を操作できるインタフェースである. Ishii らは現実空間とデジタル空間の差異を埋める試みとして TUI を提唱し, PC を操作するインタフェースとして代表的な GUI と比較検証していた [20]. TUI の利点として, 情報をより身近に, より直感的に操作できる点が挙げられる. また, 物理的なインタラクションを含む体験は, デジタルのみの体験に比べ, ユーザ体験を向上させることがわかっている [6]. しかし従来の TUI の欠点として, 情報を持たせる物体や物体を扱う作業環境の周りにセンサー等を取り付ける必要があったり, 大規模な装置が必要になったりする点がある. そこで, TUI を従来より手軽に実現し, 管理しきれていない情報やタスクの管理, 処理を行うために, 2 節で述べた Tangible Augmented Reality のアイデアを取り入れ, MR デバイスと木製のブロックを物理的なオブジェクトとして用いる新たなタスク処理手法を考える. このタスク処理手法では, MR デバイスの利点を活用し物理的なオブジェクトにデジタルなタスク情報を紐づける. タスク情報を物理オブジェクトに紐づけることの利点として, 以下のことが挙げられる.

- タスクを手で動かすことによる直感的な操作
- タスク情報を空間的に提示可能

最大の利点となるのは, 本来は形のないタスクの情報を実際に手で持って自由に動かすことができるという点である. つまり, 情報を手で動かして置く場所を変えるという作業そのものが, 情報への操作となりうるということである. 本研究では, この「情報が置かれている場所を物理的に変える」という操作でデジタルなタスク情報へタグを付与することを考える.

具体的には, MR デバイスのカメラにより, 立方体のブロックに貼り付けられた AR マーカを認識し, その場所にタスクの情報を紐づける. つまり, 形のないデジタルな情報に物理的な実体を与えることができる. そうすることで, 本来は物理的に触れることができない情報を手に持って整理, 操作することができる. この手法を用いれば, 平面ではなく空間的に情報を配置することができ, より直感的にタスクを処理することができる.

4 アプリケーションの実装

4.1 実装方針

MR デバイスは, 光学シースルー方式を採用してる MR HMD である Microsoft 社製の HoloLens2¹ を用いる. HoloLens2 の特徴として, カメラをはじめとした多種多様なセンサーを搭載しており, ハンドトラッキングなど様々な機能が使えるという点がある. HoloLens2 のアプリケーションの構築やビルドには, ゲームエンジンである「Unity²」を使用し, アプリケーシ

1 : <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>

2 : <https://unity.com>

表 1 ソフトウェアとアセットのバージョン

Unity	2020.3.3.30f1
Visual Studio 2019	16.11.11
Mixed Reality Tool Kit	2.8.5
Vuforia	10.10

表 2 開発に用いた PC のスペック

OS	Windows11 Home 22H2
CPU	AMD Ryzen7 5800HS
RAM	16GB
ROM	256GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1660

ンのデプロイは Visual Studio 2019 を使用した。Unity における HoloLens2 用の開発環境の構築や、アプリケーション内のモジュールには、Microsoft 社がオープンソースの MR 用開発キットとして公開している「Mixed Reality Tool Kit (MRTK)」を用いた。タスクの管理や文書の執筆、保存などは、多機能なノートを提供する Web サービスである「Notion³⁾」を利用する。Unity で構築したアプリケーションと Notion との連携は、Notion から公式に提供されている Notion API を利用し、HoloLens2 のアプリケーションと Notion のサービス間でデータの取得やインタラクションによる編集の結果を相互に送受信する。AR マーカを利用する機能については、Unity 上で提供されている、AR アプリケーション開発プラットフォームである「Vuforia⁴⁾」を利用する。ここで、開発に使用したソフトウェアのバージョンを表 1 に、及び開発に用いた PC のスペックを表 2 にまとめる。

4.2 アプリケーションの概要

作成した HoloLens2 のアプリケーションでは、まず HoloLens2 のカメラでブロックに貼り付けられた AR マーカを認識する。そうすると認識したブロックの場所に、仮想のブロックと仮想ボタンが表示される。表示された仮想ボタンを指で押すと、Notion API 経由でタスクの情報を取得するプログラムが動作し、取得したタスクの名前と締め切り日の情報が白い仮想ブロックの前面に表示される。次に、ブロックを手で動かして優先度を振り分けたり、キーボードによって文書を編集することによってタスクを処理、整理する。そして変更を適用するボタンを押すと、Notion のデータベースの情報が更新される。図 1 に提案手法による実際の作業の様子を示す。

また、平面の AR マーカを併用して、作業している机そのものをインタフェースとして使うことも考える。物理オブジェクトの詳しい機能は次節で説明する。

4.3 物理オブジェクトの機能

光学シースルー方式の MR デバイスである HoloLens2 の大きな利点として、現実の視界とデジタルな仮想の視界を融合できるという点が挙げられる。本アプリケーションではこの特徴



図 1 MR デバイスを用いたタスク処理中の様子



図 2 用意したブロック

を利用して、MR デバイスによるタスクへの操作性を向上させることを考える。物理オブジェクトとして木の板で作られた直方体のブロックを複数個用意し、全てのブロックについて、その 6 面に AR マーカを貼り付ける。そして HoloLens2 の前面についたカメラにより AR マーカを認識、追跡する。一つのブロックに一意に紐づけられたタスクを、認識した AR マーカの場所、すなわちブロックの場所に表示する。こうすることで、木製のブロックに疑似的に情報を紐づけることが可能となる。

机上での操作性や AR マーカの認識精度を検証するために、複数のサイズのブロックを試作したところ、一辺 110~120mm の立方体が認識精度や机上での扱いやすさの点で最も良かったため、120mm の立方体を採用することとした。実際に用いたブロックを図 2 に示す。ブロックに仮想ブロックやタスクの情報、仮想ボタンなどのインタフェースを紐づけている状態を図 3 に示す。仮想ブロックの緑色の部分は、優先度を表すタグを表示するエリアとなっている。

また、作業している机そのものをインタフェースとして使い、ブロックを置く場所や、ブロックを移動させるという動作が情報への操作となるよう実装した。具体的には、机上に 3 枚の平面の AR マーカをある程度の距離を保って置き、それぞれにタスクの優先度 (Priority) を表すタグを紐づける。タグは「HIGH (優先度が高い)」「LOW (優先度が低い)」「MIDDLE

3 : <https://notion.so>

4 : <https://developer.vuforia.com/>

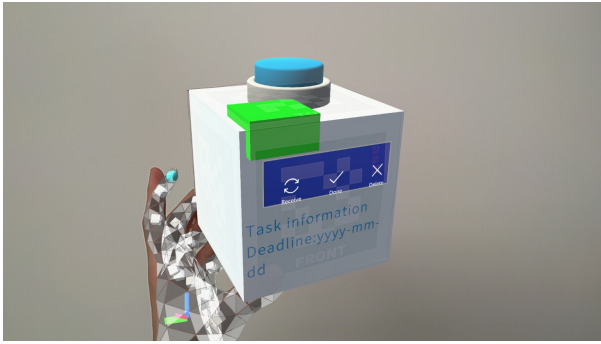


図 3 物理オブジェクトに情報を重畳した様子



図 5 タスクに低い優先度を割り当てたときの様子



図 4 タスク処理をする際に想定される机上の環境

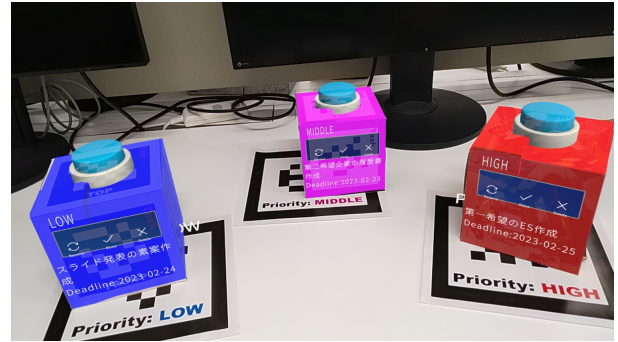


図 6 複数のブロックを用いて優先度を割り当てている様子

(中間の優先度)」とする。ここで優先度タグを表す AR マーカと、本アプリケーションを使ってタスク処理をする時に想定される机上の環境の図を 4 に示す。

タスク情報が紐づいたブロックを机上に置かれた AR マーカに近づけると、その AR マーカのタグがそのブロック、つまりタスク情報に割り振られる。そうすることで、ブロックを机上に置いた場所によって、タスクの情報に直感的に優先度のタグを付与することができる。この機能によって、例えば机の右側や自分の近くにあるブロックのタスクは優先的に処理する、急を要さないタスクのブロックは机の左側や自分から遠い場所に置くなど優先度の割り当てを直感的に行うことができる。また、優先度タグの種類によってブロックそのものの色を変化させる。例えば、図 5 に示すようにタスクの情報を持ったブロックを「LOW (優先度が低い)」のタグを持った AR マーカに近づけると、そのタグが割り当てられると同時に、元々は図 3 のように白色であったブロックの色が青色に変化する。こうすることで、タスクの優先度を視覚的に強く認識することが可能である。また、HoloLens2 を用いての作業が終わり、デバイスを頭から外した後も、タスクの優先度のや進捗の状況をおおよそ把握できるという利点もある。優先度が低いタグを持つマーカにブロックを近づけた時の様子を図 5 に示す。また、複数のブロックを同時に用いて優先度を振り分けている様子を図 6 に示す。

4.4 物理オブジェクトの触覚フィードバック

一般的な MR アプリケーションのインターフェースとして、図 7 のように、デジタルなパネルや仮想ボタンを空中に浮遊させているものが多い。しかしこの形式は、初めて MR デバイ



図 7 宙に浮かぶインターフェースを操作している様子

スに触れる人や、MR や VR の独特なインターフェースに慣れていない人にとってはわかりづらかったり、上手く操作できないこともしばしばある。これは、物理的に存在するボタンを押す場合と違い、触覚フィードバックがないためであると考えられる。触覚フィードバックは、ボタンを押したことを視覚的にのみ感知する場合に比べ、触覚的にも感知することで、押した感覚を強く与える作用がある。そのため、仮想的なボタンでもより確実に押すことができ、押したことをより強く確信することができる。ゆえに、一般的には仮想ボタンのようなものではなく、フィードバックのある有形のインターフェースの方が好まれる [9]。触覚フィードバックを導入することにより、MR デバイスに慣れていない人は MR 空間上における仮想ボタンやスイッチなどのインターフェースを安心して使うことができ、MR デバイスに慣れていない人にとっても、触覚フィードバックによって操作ミスを減らすことができると考える。本研究の提案手法では、前述の情報の提示のために用いた物理オブジェクトのブ

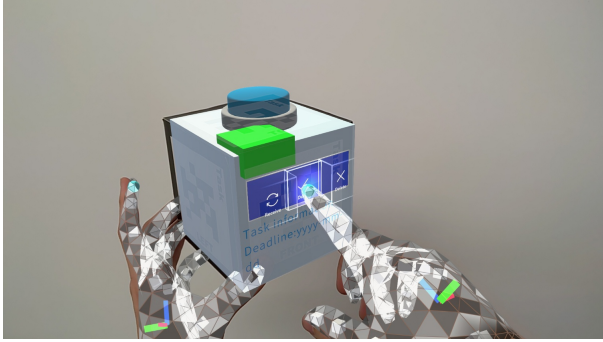


図 8 ブロックの側面に表示されたインタフェースを操作する様子

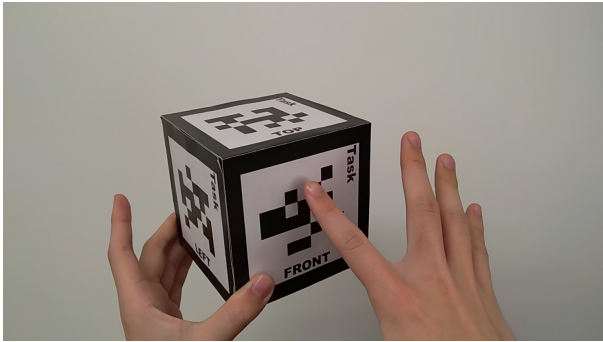


図 9 仮想ボタンを操作するために箱の側面に触れている様子

ブロックに、仮想ボタンなどのアプリ内インタフェースを貼り付けるように表示することとした。ブロックの表面に仮想ボタンを表示することで、仮想ボタンを押しきったと同時にブロックの表面に指が触れるようになる。ブロック表面への接触が簡易的な触覚フィードバックとなり、ボタンを押した感覚を強める。

図 3 に示されたオブジェクトの、上部に表示された青いボタンや側面に表示された 3 つのボタンは、それぞれ役割を持つ仮想ボタンとなっている。上部のボタンはキーボードを呼び出す役割が割り当てられている。下部のボタンは左から順にそれぞれ「タスク情報の受信、表示」「操作の結果を Notion に反映させる」「タスク情報とオブジェクトとの紐づけを削除し、情報の提示をリセットする」という機能が割り当てられている。例として、側面に配置されたボタンを使用する様子を図 8 に示す。この時、図 9 に示すように、実際には箱の側面をつつくような動作になる。

ブロック上部の青く丸いボタンはキーボードとテキスト入力エリアを展開する役割を持っており、押すとテキストを入力できるウィンドウが展開し、テキスト入力や編集が必要なタスクに対して、テキスト入力を行うことができる。丸い仮想ボタンを操作し、テキスト入力エリアを展開した状態を図 10 に示す。

5 実験と評価

5.1 実験の概要

本研究で提案した、MR デバイスと物理オブジェクトを用いたタスク処理手法の有用性を検証するために、著者と同じ研究室に所属している学生 4 人に被験者となってもらい、実験と評価を行った。なお、被験者の 4 人は全員、これまでにほとんど



図 10 テキスト入力エリアを表示した時の様子

MR デバイスに触れたことのない人達であった。処理するタスクは、著者が Notion のデータベース上に作成した仮想的なタスクを対象とした。MR デバイスによる処理と従来の PC とキーボード、マウスによる処理を比較するため、被験者には MR デバイスと PC での処理をそれぞれ一度ずつ行ってもらった。2 種類の手法でタスクの処理を行った後、口頭でのインタビューとアンケートに回答してもらうという形で評価を行う。インタビューとアンケートの回答を受けて、MR デバイスによってタスク情報に実態を与えることで、空間的な情報の提示が実現できているか、情報の操作が PC の場合と比較して直感的になっているか、一般的な平面のディスプレイとマウス、キーボードを用いたタスク処理と比較して有用であるか、といった点を評価する。

5.2 実験の詳細

MR デバイスと PC それぞれでタスクを行う上で、タスク処理を行う順番の影響、またはタスクの内容の影響を軽減するために、仮想のタスク群 A、B の二つ用意し、表 3 に示すように被験者を 4 つのグループにわけ、それぞれの手法とタスク群によるタスク処理を順に試してもらった。仮想のタスクは、被験者である大学生が身近に感じやすいようなタスクを Notion のデータベース上に作成し、それらを利用した。以下に用意した仮想タスクの具体的な例を示す。被験者は、これらのタスクの名前の情報とタスクを持つ締め切りの情報を考慮して優先度を振り分ける。

- メールの送信、返信
- 発表スライドの素案作成
- 第一志望企業に提出する履歴書作成
- 第二志望企業に提出する ES 作成
- 共同研究ミーティングの設定 など

MR デバイスによるタスク処理では、物理オブジェクトとしての木製のブロック 3 個と MR デバイスを用いて、複数のタスクを実際に優先度を振り分けたり、キーボードを用いた文書の編集などを行ってもらった。PC によるタスク処理では、仮想タスクが用意された Notion の Web ページを操作してもらい、優先度の振り分け、文書の編集などを行ってもらった。また、特に MR でのタスク処理実験中は、タスク処理中の思考や感じたことを記録するために、思ったことをその場で実際に声

表 3 評価グループの組み合わせ

	PC で処理した後に MR で処理	MR で処理した後に PC で処理
タスク群 A を MR, タスク群 B を PC	タスク群 B を PC で処理した後に, タスク群 A を MR で処理	タスク群 A を MR で処理した後に, タスク群 B を PC で処理
タスク群 A を PC, タスク群 B を MR	タスク群 A を PC で処理した後に, タスク群 B を MR で処理	タスク群 B を MR で処理した後に, タスク群 A を PC で処理

に出しながら作業するように被験者に依頼した。次に、MR デバイスと PC によるタスク処理手法のユーザビリティを問うアンケートと、MR デバイスと物理オブジェクトがタスク処理に及ぼす影響や効果を問うインタビューを口頭で実施した。

ユーザビリティを問うアンケートでは、System Usability Scale (SUS) [3] という、アプリケーションやウェブページのユーザビリティの評価に用いられる手法を利用した。SUS は、まず肯定的な質問 5 問と否定的な質問 5 問を 1 問ずつ交互に問い、それらに対して同意する度合いを 5 段階で答え、最大で 100 となるスコアを算出するというユーザビリティの測定方法である。スコアが 80 を超えると非常に優れているとされ、過去 500 件のユーザビリティ調査に対するスコアの平均は 68⁵ である。また、スコアが 50 を下回ると、ユーザビリティに問題があり改善が必要であるとされる。口頭でのインタビューでは、表 4 に示すような項目について、詳細に評価するために 1 ～7 の 7 段階でのスコア評価と自由回答を行ってもらい、情報の操作性や情報の提示方法の有用性などを評価した。

5.3 結 果

5.3.1 ユーザビリティの評価

本節では、SUS によるユーザビリティ調査の結果を述べる。PC と MR デバイスのタスク処理の双方について、被験者 4 人からのスコアを集計し、平均値を算出した。まず、PC とキーボード、マウスによるタスク処理のユーザビリティスコアの平均は 95.6 と、非常に高いスコアとなった。これは、マウスやキーボードは日常的に触れるデバイスであり、また Notion の Web ページにおける優先度の振り分けもごく簡単な操作のみで行うことが可能なので、このような高いスコアとなったことが考えられる。

次に、本研究で提案する MR デバイスと物理オブジェクトを用いたタスク処理手法のユーザビリティスコアの平均は 58.1 となった。これは、被験者全員が MR デバイスの扱いに不慣れであった点、タスク処理における最低限の機能のみを実装していた点などが影響していると考えられる。平均スコアは 50 以上となったので、システムとして最低限使用できるだけユーザビリティを持っていると判断した。

5.3.2 MR によるタスク処理手法の評価

表 4 の設問に対する 7 段階の評価の平均を表 5 に示す。一つ目の項目についての自由回答では、「机の上にあるブロックの状態で、タスクの進捗などが可視化される」「大事なものを手前に置く、など実際の物を整理するようにタスクを配置できる」といった声が多かった。

次に二つ目の項目に関しては、スコアの評価はあまり高くなく、自由回答でも「紙の付箋のように、情報を PC のディスプレイの外に配置できるのは便利であった」という意見があったが、「平面の机に置く形式だと、PC のディスプレイと大差はない」「ブロックの大きさや数の影響で、扱える情報が減ってしまった」というような意見が多い結果となった。

三つ目の項目では、7 段階での評価が 4 項目の中で最も高い結果となった。自由回答では、「どこまで押したらよいかわかるので、安心感がある」という声が大半を占めた。別の意見としては、「押した感触を強めるなら、柔らかい素材の方がよい」「空中を押す感覚に慣れてしまえば、大きな差は無い」という声もあった。

最後の項目に関しては、「MR デバイスは外界が見えるので、キーボードの操作は PC と変わらない」という意見が大多数であり、操作性という観点では大きな違いは見られなかった。

以上の意見の他に、「AR マーカの追従性があまり良くなく、スムーズな操作を行うことが難しかった」という意見や、「1 辺 120mm のブロックは机上において片手で扱うには大きく、情報の一覧性や操作性を損ねてしまっていた」といったハードウェアやソフトウェアの制約、影響が顕著にあらわれた意見もあった。評価の結果を見ると、物理オブジェクトを使うことの情報への操作性という観点や、仮想ボタンに対する簡易的な触覚フィードバックの効果に関してはおおよそ前向きな意見が得られたが、情報を空間的に提示する観点では、本研究の方式では良い評価は得られなかった。

6 まとめと今後の課題

本論文では、MR デバイスである HoloLens2 と、物理的なオブジェクトを用いて行う日常的なタスク処理手法の提案とその評価を行った。提案手法では、ブロック状の物理的なオブジェクトに貼り付けられた AR マーカを HoloLens2 のカメラにより認識し、その座標にタスクの情報を重畳して表示することにより、オブジェクトに情報を紐づける。そして現実空間において、情報が紐づいたオブジェクトを手で実際に掴んで移動させる、情報と共に紐づけされた仮想ボタンを指で押す、といった動作をオブジェクトに対し行うことによって、情報を手でそのまま操作できるようにした。提案手法を用いて、実際にタスクの処理を複数人に実際に行ってもらい、アンケートとインタビューを行うという形で提案手法を評価した。アンケート、インタビューの結果から、MR デバイスと物理オブジェクトを用いてのタスク処理は、当初想定していた情報の空間的な提示という観点ではあまりよい結果が得られなかったが、情報の直感

5 : <https://measuringu.com/sus/>

表 4 インタビューの項目

項目 1.	タスクの情報に物理的な実体があることによって、PC と比較して情報の操作が直感的になったと感じましたか。
項目 2.	「物体に情報を紐づけて、空間的に情報を配置する」という提示方法は、効果的でしたか。
項目 3.	仮想ボタンを操作するとき、物理的な面に直接触れる操作は、操作性が向上していたと思いますか。
項目 4.	MR デバイスとキーボードを用いた文書の編集は、効果的でしたか。

表 5 評価項目に対する評価の平均

項目番号	評価の平均
項目 1	5.0
項目 2	4.3
項目 3	5.5
項目 4	4.8

的な操作、あるいは MR による仮想ボタンの操作性の向上という観点では良い評価が得られた。

今後は、別のデバイスや物理オブジェクトを用いて評価実験で得られた課題の解消を試みるとともに、MR デバイスでよりスムーズに、遅延やストレスなく AR マーカをトラッキングする手法や、効果的に情報を空間に提示する方法を取り入れることが今後の課題である。また、日常生活で使用することを考えると HoloLens2 を始めとした MR デバイスは依然として高価であり、普及率も高いとは言えず、プロセッサの処理能力も十分であるとは言い難い。タスク処理のための物理オブジェクトを別途用意するというのも普段の生活では簡単にできるものではない。そこで、物理オブジェクトを別途用意することなく、机上や身の回りにあるもの、例えば文房具等の既に存在するものに情報を紐づけることで、情報の物理的な操作をさらに身近に行えるようにすることが必要である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03775, JP21H03774, JP21H03554, 2022 年度国立情報学研究所公募型共同研究 21S1002 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

文 献

- [1] Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, and Ivan Poupyrev. The magicbook: A transitional AR interface. *Computers and Graphics*, pp. 745–753, 2001.
- [2] Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, and Ivan Poupyrev. Tangible augmented reality. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 1–10, 2008.
- [3] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability and Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [4] Morten Fjeld and Benedikt Voegtli. Augmented chemistry: an interactive educational workbench. In *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 259–321, 2002.
- [5] Kaj Grønbaek, Jannie F Kristensen, Peter Ørbaek, and Mette Agger Eriksen. Physical Hypermedia: Organising collections of mixed physical and digital material. In *Proceedings of the Fourteenth ACM Conference on Hypertext and Hypermedia*, pp. 10–19, 2003.
- [6] Aakar Gupta, Bo Rui Lin, Siyi Ji, Arjav Patel, and Daniel Vogel. Replicate and reuse: Tangible interaction design for digitally-augmented physical media objects. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2020.
- [7] 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*, pp. 234–241, 1997.
- [8] Paul. Milgram and Fumio Kishino. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol. 77, No. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [9] McEwan Mitchell, Blackler Alethea, Johnson Daniel, and Wyeth Peta. Natural mapping and intuitive interaction in videogames. In *Proceedings of the First ACM SIGCHI Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp. 191–200, 2014.
- [10] Ivan Poupyrev, Desney Tan, Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, Holger Regenbrecht, and Nobuji Tetsutani. Tiles: A mixed reality authoring interface. In *Proceedings of the INTERACT 2001 Conference on Human Computer Interaction*, Vol. 2021, pp. 727–728, 2001.
- [11] Ohshima Toshikazu, Satoh Kiyohide, Yamamoto Hiroyuki, and Tamura Hideyuki. AR2Hockey: a case study of collaborative augmented reality. In *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 268–275, 1998.
- [12] Brygg Ullmer and Hiroshi Ishii. The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 223–232, 1997.
- [13] Xiangyu Wang and Phillip S. Dunston. Tangible mixed reality for remote design review: a study understanding user perception and acceptance. *Visualization in Engineering*, pp. 1–15, 2013.
- [14] 木川貴一郎, 大島登志一. HaptoBOX: 複合現実体験を増強する多感覚型インタフェースの研究 (2) インタラクティブ機能の拡張. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, 第 2019 巻, pp. 362–367, 2019.
- [15] 柴田史久. 複合現実感技術の歴史と今後の展望. システム／制御／情報, Vol. 64, No. 9, pp. 343–348, 2020.
- [16] 田村秀行, 大田友一. 複合現実感. 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 266–272, 1998.
- [17] 平澤泰文, 山元聖哉, 杉山正治, 松川節, 何一偉, 小南昌信. 博物館鑑賞支援 MR ブックビューアの開発. 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, 第 2019 巻, pp. 3–4, 2019.
- [18] 横濱拓樹, 光森達希, 中小路久美代, 山本恭裕. 実世界オブジェクトへの投影と仮想空間の提示を組み合わせた読書インタラクション. 情報処理学会第 83 回全国大会講演論文集, 第 2021 巻, pp. 727–728, 2021.
- [19] 田中優麻, 田中千遥, 大島登志一. MR Coral Sea フィジカル MR ディスプレイによる複合現実型アクアリウム. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, pp. 22–25, 2014.
- [20] 石井裕. 仮想と現実の融合: 3. タンジブル・ビット, 情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン. 情報処理, Vol. 43, No. 3, pp. 222–229, 2002.