

UPLIGHT：小型全周囲ディスプレイを搭載した 次世代の携帯型ゲームデバイスの開発

中村 俊勝^{1,†1,a)} 加藤 達也^{1,†1} 伊藤 思音^{†2} 佐藤 俊樹^{1,†3,b)}

概要：本論文では、球や立方体などの高さや側面を持つ構造物の全周囲をその隠れた部分を見に行く行為が持つと仮定したエンタテインメント性を携帯型ゲーム機のプレイスタイルに落とし込むことで生まれた新たな手に持つ立体ディスプレイデバイス「UPLIGHT」を提案する。本研究では内蔵する小型プロジェクタと超広角魚眼レンズを用いた全周囲投影技術に加え、自由に取り換えることができる様々な形状の全周囲スクリーンにより、立体的で連続したゲームコンテンツを実現した。本論文では開発したプロトタイプシステム及び、このインタラクション手法を拡張するために開発した操作可能なゲームコンテンツについて述べ、本デバイスの可能性についての議論を行う。

1. はじめに

人が高さのある側面を持つ立体構造物を眺めたとき、その人に対して手前側の側面を見ることはできるが、反対側の側面は手前側側面の背後に隠れてしまい見えなくなってしまう。立体構造物の全周囲に映像を表示可能な全周囲ディスプレイにおいてこの隠れは重要な要素であり、多くの研究で隠れの活用方法や死角を補う手法などが提案されてきた [1][2]。

しかし従来この「隠れた部分が見えない」という要素は、全周囲ディスプレイにおける制限の一つとしての扱いにとどまっていた。そのため、この動作と対になる「隠れた部分を見に行く」動作の持つエンタテインメント性や、これらの要素をインタラクションデザインの中心に位置付けた新しい全周囲ディスプレイの設計手法についての議論はまだ十分になされていない。

そこで我々は、「ディスプレイに隠れた部分があり、その隠れた部分を見に行く」という一連の動作が高いエンタテインメント性を持つという仮定に基づき、この要素を活かして「人を楽しませる」ことが可能な新しいコンセプトの全周囲ディスプレイを開発する試みを行っている。本論文では、新たに小型の全周囲ディスプレイを「手に持って自由に閲覧する」というシングルユーザのインタラクション



図 1 ティーカップの保持 (左) と UPLIGHT のプレイの様子 (右)

に着目した新しいディスプレイデバイス「UPLIGHT」の提案を行う。

2. 提案と目的

本研究の目的は、手で持つことが可能な小型の全周囲ディスプレイを用いて、ディスプレイの「死角」部分をユーザが自発的に見に行くインタラクションを活かしながら「人を楽しませる」ことができる新しい小型全周囲ディスプレイデバイスを開発することである。これを行ううえで、まず本論文ではデバイスの形状や入力手法、デバイスが持つべき機能などのデバイスの設計についての考えを以下に述べる。

まず提案デバイスの操作スタイルとして着目したのは、全周囲に映像投影された立体構造物を左右から両手で保持し、様々な角度から眺めながら操作を行う閲覧スタイルである (図 1)。このスタイルは、例えるならば中央にティーカップが置かれた小皿を両手で保持し、カップの側面に描かれた絵柄を眺めているようなスタイルであり、閲覧者はお皿を保持する手や頭を前後左右に動かしてお皿を移動さ

¹ 情報処理学会
IPJS, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

^{†1} 現在、電気通信大学

^{†2} 現在、武蔵野美術大学

^{†3} 現在、北陸先端科学技術大学院大学

a) iml@imedia-lab.net

b) tsato@jaist.ac.jp

せたり、傾けたりすることで様々な角度から側面の絵柄を鑑賞することが可能になる。さらに、片手をお皿から放しカップをその手で直接回転させて鑑賞することも可能であると考えられる。

また本研究では、このような閲覧スタイルが「古くから親しまれてきた携帯ゲーム機の操作スタイル」にも類似していることにも着目し、このデバイスの入力手法として、携帯ゲームデバイスと同様の左右に分かれたボタンコントローラを取り入れることにした。また、箱の回転を制御可能なローラ型入力装置もコントローラ部分に取り入れることにした。このように古くから親しまれてきた携帯ゲームデバイスの操作手法を取り入れることで、提案デバイスが新しい携帯ゲームデバイスとしても認知され、特別な操作説明がなくてもだれにでも使用可能になることを期待している。

さらに本研究では、新たな試みとして立体ディスプレイの見えない部分に対するユーザの好奇心をくすぐり、その方向への視点移動を誘導するいくつかのテクニックとして、映像の変化を用いた視覚的な手法に加え、異なる位置に設置した複数の音源を用いた聴覚的な誘導手法と、箱の回転による物理的な動きを利用した手法の実装を行う。

以上のようなコンセプトのもと、本研究では全周囲ディスプレイシステム「UPLIGHT」の設計と開発を行った(図1)。本論文では以下に、実際に開発したプロトタイプの実装と有効なアプリケーション案について述べる。さらに本論文では、提案デバイスにおいて全周囲ディスプレイにおける死角を覗く行為がゲーム体験を高めるために有効であるかを簡単なユーザ実験により調査し分析も行う。

3. 関連研究

これまでにも、複数のディスプレイを各面に配置したキューブ型デバイスの研究がなされてきた。Display blocks[3]は各面にOLEDディスプレイが配置され、一つの情報それぞれ異なる方向から映し出すことができる立方体ディスプレイである。CubeBrowser[4]は手元のキューブ型の入力デバイスを傾ける操作を行うことで、ディスプレイに表示された立体的な形状を有する情報を自由に回転させることが可能である。またその改良版はキューブ型デバイスの各面に異なるディスプレイが配置されている。本研究が提案するUPLIGHTもキューブ型ディスプレイであるが、キューブ型ディスプレイの持つ連続的に繋がった表面上に映像を投影し、ディスプレイの連続性を活かしたキャラクターの行き来に着目している点で異なる点と考える。

次に、キューブ型ディスプレイを用いた立体的な映像の閲覧を可能にする研究もある。視線位置に依存したものの[5]に加え、HaptoBOX[6]のようにHMDを用いた研究、gCubik[7]のように6面に裸眼立体視ディスプレイを配置したものの等がある。これらの研究では、キューブ自体で

はなく、キューブの中に3Dオブジェクトが存在するかのよう立体的な映像を表示させることができる。一方で、UPLIGHTではキューブ内部ではなくキューブの表面に映像投影を行っており、ユーザの目の前に実在する立体的なオブジェクトそのものの立体感・存在感と、その形状による映像の隠れを意識させることを目的としている点が異なる点と考える。また、将来カメラ等を搭載することでユーザの視線位置を計測し、立体的な表示も実現可能になると考える。

次に、立体形状にプロジェクションを行うことで全周囲ディスプレイを実現する研究がなされてきた。Globe4D[8]は手で物理的に転がすことで回転可能な半球型スクリーンである。Pmomo[9]は立体的なオブジェクトにリアルタイムに映像をプロジェクション可能なディスプレイであり、手で自由にオブジェクトを回転させることで、それに追従した映像をオブジェクト上に投影することが可能である。Qoom[10]は複数のプロジェクタを用いて球体の全周囲に映像を投影可能な球体型のタッチスクリーンデバイスであり、ボールのように手の上で回転させたり、投げたりすることが可能である。UPLIGHTでも様々な回転動作を用いてディスプレイを周囲から閲覧することができるが、デバイス上ではディスプレイの回転軸を1軸のみに制限し、従来のアクションゲームや横スクロールシューティングゲームが自然にプレイできるようになっている。これに加え、デバイスを持つ際の手首や肘の角度や、上半身の自由な運動で、見えない部分を楽しく見に行けるようにしている。

次に、手で持って使うことが可能な小型の全周囲ディスプレイも様々な開発がなされてきた。Magicscroll[11]は物理的に巻き取ることができるシート型ディスプレイ搭載の全周囲ディスプレイであり、小型で持ち運びが可能である。MagicWand[12]は魔法の杖のように振って使うことができる円筒形ディスプレイである。PickCells[13]は小型のブロック形状のディスプレイを複数繋ぎ合わせることで可能なディスプレイであり、形状を再構成することが可能である。これらのデバイスのように、UPLIGHTも手で持って使用する全周囲ディスプレイであるが、その使用法は従来のゲーム機の操作手法に沿ってデザインされたものである。

4. 実装

本研究では、提案デバイスのプロトタイプシステムの実装を行った。

4.1 システム概要

図2にプロトタイプシステムのハードウェア構成を示す。提案システムは小型プロジェクタ(Smart Beam Laser)と広角レンズから成る全周囲投影ユニットと、その上部に配置された10cm四方の取り替え可能な回転式立体ス

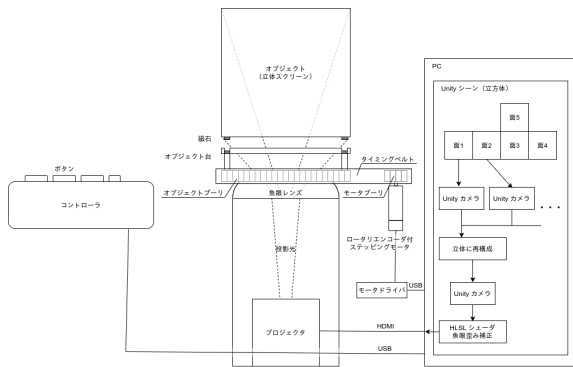


図 2 システム構成図

クリーン、ステッピングモータとロータリエンコーダ (PKP244MU12A)、タイミングベルトおよびプーリから成るスクリーン回転機構、ボタンコントローラ、回転制御用のマイクロコントローラおよび映像投影用の小型計算機から成る。

4.2 広角レンズとプロジェクタを使った全周囲投影

広角レンズとプロジェクタを使った全周囲投影システムの概略を図 2 に示す。小型プロジェクタから照射された映像は直上の広角レンズを通り、立体スクリーンの内部からスクリーン上面および 4 つの側面にリアプロジェクションされる。1 台のプロジェクタを用いることで全周囲投影時のキャリブレーションの手間が省け、また外部に複数台のプロジェクタを設置する必要がないためデバイス自体をコンパクトに設計することが可能になる。

回転する立体スクリーンに追従した歪みのない映像を投影するために、まず Fisheye カメラモデルを用いたプロジェクタキャリブレーションを行いプロジェクタの内部・外部パラメータ、およびレンズの歪みパラメータを求めた。得られたプロジェクタの内部・外部パラメータは、そのまま Unity 内のカメラパラメータとして用いる。

次に、レンズ歪みを考慮した投影用画像を作成するため、Fisheye カメラモデルを実装した頂点シェーダに得られた歪みパラメータを適用し、このシェーダを適用した 3D 空間上の立体モデル (立体スクリーンと同サイズ) を投影用の平面に射影し、プロジェクタを用いて出力する。これにより、立体モデルに適用したテクスチャ画像を、そのまま立体スクリーン上に投影することができる。

立体スクリーンは、今回の実装では立方体形状 (図 3) に加え、直径 10cm のくびれのある球体スクリーン (図 3) も用意した。立方体スクリーンについては板厚 2mm のアクリルキューブの内側からトレーシングペーパーを張り付けることで制作した。また球体スクリーンについては直径 10cm の LED 電球のシェード部分を用いて制作した。

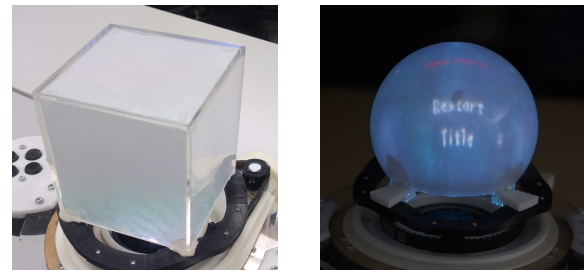


図 3 立方体スクリーン (左) と球体スクリーン (右)

4.3 ゲームコントローラの設計

コントローラは立体スクリーンの左右に分かれて配置している (図 4)。従来の携帯ゲームデバイスのように、ユーザはコントローラを両手で把持し、本体ごと持ち上げて使用することを想定している。左手側のコントローラには、上面に親指で操作する方向入力用の 4 つのボタンと、人差し指で操作する側面ボタン (L ボタン) が配置されており、右手用のコントローラには、上面に親指で操作する 4 つのボタンと、側面に人差し指で操作する R ボタンが配置されている (図 5)。側面ボタンはディスプレイの回転操作に使用することを想定しており、押し込みの強さによって回転の速度を制御できるよう可変抵抗を使って実装した。



図 4 コントローラの位置



図 5 コントローラのボタン配置

4.4 オブジェクト回転機構の設計

オブジェクト回転機構の概略を図 6 に示す。立体スクリーンはモータとタイミングベルトで接続されたタイミングプーリの上に固定され、モータによる回転機構により左右方向になめらかに回転可能になっている。回転は Unity

側で制御可能なモータによる自動回転制御に加え、スクリーンを直接手で持って回転させる (図 6) ことも可能である。

スクリーンの回転角度はロータリエンコーダでリアルタイムに読み取り、Unity 上のメッシュモデルにも同じ回転が適用される。これにより、回転に追従した映像投影が可能になる。

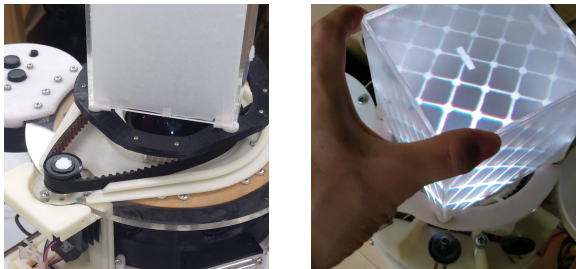


図 6 回転機構部 (左) と手を使った直接回転 (右)

5. アプリケーション

この項では、実際に実装済みのアプリケーションも含め、本デバイスに適していると考えられるゲームアプリケーションの代表的な例について具体的に述べる。

5.1 ディスプレイの立体形状に沿って飛ぶボールで遊ぶブロック崩し

ディスプレイの立体形状に沿って飛ぶボールで遊ぶブロック崩しを実装したものを図 7 に示す。立体ディスプレイに沿ってボールが飛び、形状によって様々な弾道でブロック崩しを楽しめる。バーを回転と同期させるかさせないかで楽しみ方が変わる。形状を変えるごとに違ったボールの軌道になり、これにより体験の新鮮さが得られるだけでなく楽しみ方や難易度を変える手段にもなる。見えないところに飛んで行ったボールがどのように飛んでいるのか、完全に予測することができないため、ユーザは見に行く。そして意外な軌道になっているボールがあり、驚きや発見があり、立体ディスプレイがもたらす面白さを体験することができる。

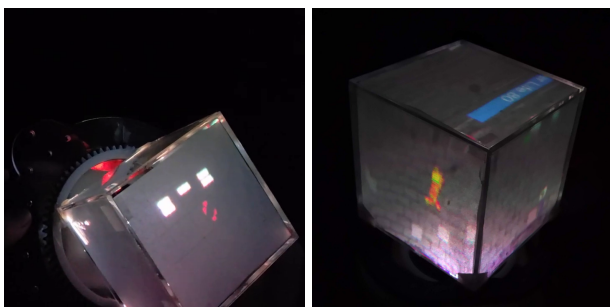


図 7 ブロック崩し (左) とサイドビューアクション (右)

5.2 ディスプレイの側面上に 360 度繋がったステージで遊ぶサイドビューアクション

側面で 360 度繋がったサイドビューアクションを実装したものを図 7 に示す。ユーザが見えないところを含めてキャラクターはディスプレイの全周囲を歩くことができ、見えなくなったキャラクターを姿勢を変えて見に行き、そこに発見があったとき、ユーザに感動や驚きを与えることができる。更に、キャラクターは全周囲を短時間で移動することができるため、上記の体験をプレイしてすぐ実感することができる。キャラクターが移動できない壁が存在するが、キャラクターが発射する弾丸は全周囲どこでも飛び回り、繋がったディスプレイを活かして天面や左右の面を横断させて弾丸を敵に当てることができる。



図 8 トップビューシューティング

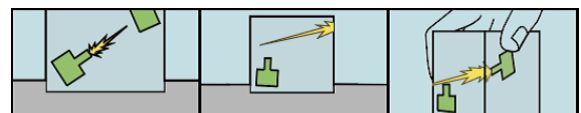


図 9 トップビューシューティングの流れ

5.3 ディスプレイの全周囲が全て繋がったステージとなったトップビューシューティング

トップビューシューティングの例として、主に 2 種類のゲームアプリケーションを考えた。まず 1 つ目は、操作キャラクタを左右に移動させ、上向きに 180 度で弾を発射し、立体形状に沿って弾を飛ばし、全周囲に現れる敵キャラクタを撃墜するものである (図 8)。何度も弾を撃ちなおせるため「様々な形状、位置、角度で弾を撃ったとき、どんな弾道になるのか」ということに対する検証が行いやすいため、ブロック崩しとは違い立体形状に沿って飛ぶキャラクタの面白さを感じとりやすくと考えられる。次に 2 つ目は、移動方向の回転、前進後退により立体形状の側面のみならず天面も含めた全周囲を移動できるようにした戦車といったキャラクタを操作し全周囲に居る敵から逃げたり

敵を追いかけたりしながら移動方向と同じ向きに弾を撃破するものである(図9)。

5.4 全周囲がステージとなった戦場の状況を確認しながら軍に指示して戦うリアルタイムストラテジー

全周囲に攻略対象となる拠点や施設が配置され、それらが近くの地点同士で線が結ばれ、それら線にそって自軍を動かし、AIが操作するディスプレイの向こう側の面から侵略してくる敵軍を撃破することを目指す時間経過で状況が刻々と変化するリアルタイムストラテジーゲームである(図10)。全周囲ディスプレイの様々な地点で同時に戦闘や侵攻状況、軍隊の配備状況などの変化が起きるため、ユーザはより強く見えないところへ興味をそそぐことになり、それにより見えないところを見に行く体験のエンタテインメント性をユーザはより強く感じ取れると考えられる。

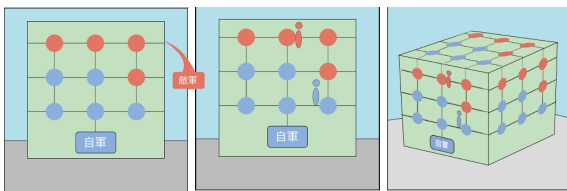


図10 リアルタイムストラテジー

6. 評価実験

次に本論文では、提案デバイスを用いることでの「全周囲ディスプレイの見えない部分を見に行く体験」のエンタテインメント性を調べる実験を行った。今回の実装では、ディスプレイの側面や反対側の見えない部分を、「ディスプレイ自体をボタンで回転させて一視点から見る手法(固定視点操作)」と、「腕や首など上半身を動かして覗き込んで回し見る手法(自由視点操作)」の異なる2種類の手法で見に行くことができるアプリケーションの実装を行った。本実験ではこの2種類の異なる動作を調査対象とし、それぞれのエンタテインメント性を調査した。

6.1 実験概要

実験協力者は3名で、9歳男子1名、17歳と47歳の女性1名ずつである。また、ディスプレイを見やすくするために、常夜灯程度の明るさの部屋にて一人ずつ実験を行った。本実験では、「見えないところを見に行く要素」を含むゲームコンテンツを本デバイス上で体験してもらった。このゲームコンテンツは、アプリケーションの項で述べた本デバイス用に開発したサイドビューアクションゲームを用いた。比較のために条件を変えた実験を1人2回行うこととした。1回目の実験内容はディスプレイをユーザに回転してもらい、姿勢を変えず視点が固定された状態でゲームプレイしてもらった。2回目の実験内容は腕や首など上半

身を使って、視点を自由にした状態でゲームプレイしてもらった。また、固定視点と自由視点のどちらを先にプレイするか、ということによる実験結果への影響を減らすために、被験者が変わる毎に、1回目と2回目の実験内容を入れ替えた。

実験の様子はビデオで記録し、実験後にアンケートを用いて調査を行った。アンケート項目は、Q1-1:“立体ディスプレイの端から向こう側に行ってみえなくなったキャラクターを、ディスプレイを回転させて見えるようにすることに楽しさを感じたか。”、Q1-2:では“立体ディスプレイの端から向こう側に行ってみえなくなったキャラクターを、覗き込みようにして見えるようにすることに楽しさを感じたか。”、Q2-1:“ゲームの操作は行いやすかったか。”、Q2-2:“操作に関して何か違和感や戸惑いを覚えたか。”、Q2-3:“立体ディスプレイの向こう側を覗き込んでいるとき、キャラクターの操作が反転したか。また、一度でも反転した場合、終盤では慣れることが出来たか。”、Q2-4:“見えないところを姿勢を変えて覗き込んだとき、疲れや、やりにくさを感じたか。”と設定し、Q1-1、Q1-2、Q2-1、Q2-4に対しては5段階評価と具体的な理由のインタビュー、Q2-2、Q2-3に対してはyes、noの2択による評価と具体的な理由のインタビューを受けてもらった。各質問内容の5段階評価は、Q1-1、Q1-2では、1:“全く楽しさを感じなかった。”、2:“あまり楽しさを感じなかった。”、3:“楽しさを感じた。”、4:“十分に楽しさを感じた。”、5:“とても強く楽しさを感じた。”と設定し、Q2-1では、1:“とても操作しづらかった。”、2:“少し操作しづらかった。”、3:“特に何も感じなかった。”、4:“十分操作しやすかった。”、5:“とても操作しやすかった。”と設定し、Q2-4では、1:“全く疲れややりにくさを感じなかった。”、2:“あまり疲れや、やりにくさは感じなかった。”、3:“疲れや、やりにくさを感じた。”、4:“かなり疲れや、やりにくさを感じた。”、5:“とても疲れや、やりにくさを感じた。”と設定した。

6.2 結果と考察

本章では、固定視点、自由視点、それぞれの状況における、本デバイスを用いたゲームプレイの様子と、アンケート結果の概要、そして結果から考えられる考察内容について述べる。

6.2.1 固定視点時のゲームプレイの様子

立体ディスプレイを回転しながらゲームプレイしてもらったときの様子について述べる。10代以下の2名は画面を斜め上から見下ろして、ディスプレイを都度回転させてキャラクターを補足しながらプレイしていた。初めは、2名とも見えなくなったキャラクターを手前側までディスプレイを回転させて持ってくる時はキャラクターの操作を中断していた。40代の女性1名はディスプレイを回転させ続けたままプレイしていた。また、3名とも少しだけ頭を左右

に動かして軽く覗き込んでいた。

6.2.2 自由視点時のゲームプレイの様子

立体ディスプレイを回転させずにゲームプレイしてもらったときの様子について述べる。10代以上の2名は、ディスプレイを手前側に傾けて、上から覗き込むようにしてディスプレイの裏側を覗き込んでいた。9歳の1名はデバイスを右側を手前に寄せ、左側を奥に出すことで、ディスプレイの隠れた部分を覗き込んでいた。また、プレイ初期は3名とも見えなくなったキャラクターを探すときは操作を中断していたが、慣れてくると10代以上の2名は上から見下ろして常にキャラクターを見えるようにディスプレイを360度に傾けながらゲームをプレイしていた。

6.2.3 Q1:視点と体験の楽しさの関連についての調査結果と考察

まず、本デバイスに対するユーザの視点状況と見えないところを見に行く楽しさとの関係について調査するためのアンケート項目 Q1-1, Q1-2 の調査結果について述べる。まず5段階評価において、9歳男子、17歳女性、47歳女性それぞれが Q1-1 では4, 3, 4と回答し、Q1-2 では5, 4, 2と回答した。固定視点に対しては Q1-1 への回答で“回す方がキャラクターが楽に見られて良かった。”、“ボタンを浅く押すとゆっくりとしたスピードに出来てよかった。”、“キャラクターの移動速度とディスプレイの回転速度が合っておらず、待つのが億劫で、自然と首が動いて少し先の画面を見てしまっていた。”、“速く回転している最中はディスプレイに何が映っているかよくわからなかった。”といった意見が得られ、自由視点に対しては Q1-2 への回答で“見えないところに映っているものが自分の見たい時に見られて楽しかった。”、“見にくさはあるが、回転と違ってどこを見るにも待つ必要がなかった。”、“上半身を動かすのが面倒。”、“首が疲れる”といった意見が得られた。また、10代以下の若い世代2名は見えない部分にあるキャラクターを見に行く体験に対する楽しさの評価が自由視点の方が固定視点に比べて高く、47歳女性では一転して自由視点より固定視点への評価が高かった。以上の結果より、10代以下の比較的若い2名にとってはすぐ見えないところを見られる方が楽しく感じられ、一定以上の年齢層にとっては固定視点の方が楽しく感じられる可能性があると考えられる。

6.2.4 Q2:本デバイスの操作性についての調査結果

次に、本デバイスの操作や取り回しやすさ等について調査するためのアンケート項目 Q2-1, Q2-2, Q2-3, Q2-4 の調査結果について述べる。まず5段階評価において、10未満男子、10代女性、40代女性それぞれが Q2-1 では、4, 未, 3と回答し、Q2-4 では、3, 未, 3と回答した、yes/noで答えられる評価において、10未満男子、10代女性、40代女性それぞれが Q2-2 では、3名とも yes と回答し、Q2-3 では、no, yes, yes と回答した。デバイスの操作性に対しては Q2-1 への回答で、“操作しやすかった。”、“初回プレ

イ時は手元を見るため、暗い中では確認しづらかった。”、“操作自体はすぐ慣れた。”といった意見が得られた。操作への違和感や戸惑いに対しては Q2-2 への回答で、“気づかず反転してて、キャラクターが思ったとおりのところに居なくて混乱した。”、“ジャンプさせるのに上と下どっちを押せばいいかわからなくなった。”、“特に混乱はしなかった。”といった意見が得られた。操作の違和感への慣れに対しては Q2-3 への回答で、“段々慣れてきて間違えなくなってきていた。”といった意見が得られた。プレイ時の疲労ややりにくさに対しては Q2-4 への回答で、“重いから疲れる。”、“首とか動かすから疲れた。”、“やりにくさはあった。”といった意見が得られた。以上の結果より、考察される内容に関しては考察の章にまとめて述べる。

7. 考察

7.1 操作における制限について

ユーザが反対側の面を覗き込んだ場合や、手首をひねりデバイスを180度ひっくり返して反対側を見ることなどで、キャラクターの左右の移動方向とユーザのコントローラのボタン方向が異なってしまう問題がある。この問題は固定型ゲームコントローラの特長上、慣れることで対応するしかないと考え、実際ある程度プレイを続けると、反転操作にも慣れ、問題なくプレイできる傾向がみられた。また将来的には、例えば画面に表示されたキャラクターを直接指でタッチすることで操作する等のゲームコントローラ以外の入力手法を実現することで、解決できると考える。

次に、立体ディスプレイの回転スピードはアナログボタンによってある程度の調節が可能となっているが、見えない部分にキャラクターがすぐに移動するためか、見えない部分をすぐに見に行きたいユーザにとっては、物足りないスピードであったことが今回の実験でわかった。キャラクターの移動速度などからゲーム毎にディスプレイの回転速度の幅を適切に決定する必要があると考えられる。

また、アプリケーションの項で述べた本デバイス用のブロック崩しゲームやトップビューシューティングゲームでは、立体ディスプレイに沿って飛ぶボール等のキャラクターがゲームの重要な要素となっている。一般的なブロック崩しゲームやトップビューシューティングゲームではフィールドの全体が見えており、かつ、キャラクターが平面上に存在することから、直線的な弾道予測の難易度はそれほど高くない。そして、立体ディスプレイ上においては形状や見えない部分の存在が弾道予測の難易度を高くしているが、これはゲームのやりがいにも繋がるため、我々はこの点を長所と捉えている。しかし、ディスプレイの回転中に弾道を予測することは難しいと考えられるため、回転中はキャラクターの動きを止めるなどの体系的な工夫や、ブロック崩し等のゲームの際は回転速度を予め遅めに設定できるようにするなどのハード的な工夫をする必要があると考え

た。トップビューシューティングゲームの場合は、弾を何発も撃てるため、撃つ瞬間に回転を止めるなどプレイ中の工夫でこの問題は解決できると考えられる。

7.2 全周囲スクリーンへの投影について

今回実装を行ったキューブ形状やドーム形状の立体ディスプレイは、将来的には3Dプリント等を用いてゲームに合わせて手軽に交換できるようにしたいと考えている。スクリーン形状が既知であれば、ゲーム空間内にその形状を読み込むことで、任意のスクリーン形状に沿った投影が可能になる。また、将来的にカメラを内蔵し、アイトラッキングやタッチ操作等を実現するとともに、スクリーン形状を計測可能にすることで動的な形状変化が可能なスクリーン等も実現可能になると考える。

本デバイスでは魚眼レンズを用いることで、スクリーン外側からの投影では2, 3台のプロジェクタを必要とする形状にもプロジェクタ1台で投影することができるようになっている。この特徴から、スクリーン形状を保ったままサイズのみスケールしても、そのままずれ無く投影することが可能である。このため、スクリーンを風船のように空気で膨らませられるようにすることで、サイズ可変の全周囲スクリーンを作ることも可能である。

しかし、投影可能な形状は、レンズの中心から放射状に広がる光の進行方向と投影面の法線が90度以内の面に限られるという制限がある。また、この角度が深くなることで、視認性が低下する問題もあるため、これらの制限を考慮したスクリーン設計が必要である。

7.3 プロトタイプの制限について

使用したプロジェクタの遅延により、低速回転時は気にならないが、高速に回転させるとスクリーンに対して映像がついてこられず、表示がずれてしまう問題が発生した。これを解決するためには、より低遅延の投影が可能かプロジェクタを用いるか、プロジェクタの投影遅延と回転速度を考慮したプロジェクタの予測投影を行う必要があると考える。また、レンズ周辺部の解像度・画質の低下も顕著である。現在実装を行ったゲームでは、背景とキャラクターの色を黒と白のようなコントラストの高い配色にし、キャラクターのグラフィックスもシンプルなものにする事で視認性の向上を図っている。今回用いたプロジェクタは解像度が1280×720と低く、また低輝度であるため、今後の実装ではより高解像度・高輝度のプロジェクタを用いるのが望ましいと考える。

またUPLIGHTは携帯ゲーム機のように、デバイスを目の前まで持ち上げて遊ぶプレイスタイルであり、加えて見えない部分を見に行くために、ユーザは覗き込みなどの手や上半身を動かす運動を頻繁に行う必要がある。そのため、出来るだけ軽量で取り回しやすいデバイスであること

が求められると考える。ただ、プロトタイプ筐体は2.5kgと、市販されている携帯ゲーム機(200g~400g程度)の重量と比べて重く、理想的な体験を実現するためにはさらなる軽量化が求められると考える。この問題を解決するためには、軽量で強度の高い素材への置換や無線化によるコード重量の軽減等に加えて、首からぶら下げられるようなストラップを取り付けることなども有効と考える。

8. まとめと展望

内蔵する小型プロジェクタと超広角魚眼レンズを用いた全周囲投影技術に加え、自由に切り換えることができる様々な形状の全周囲スクリーンにより、立体的で連続したディスプレイを持つ携帯ゲーム機型ディスプレイデバイスを実現した。このインタラクション手法を拡張するために開発した専用のゲームコンテンツを作成し、見えないところを見に行く体験が持つエンタテインメント性を確かめることができた。

今後は1台のデバイスを対面で複数人で共有しながらの使用等の応用要素についても検討を進めていきたい。また被験者数を増やした実験を行い、見えない部分から音を出すことでユーザの興味を高める試みなどについても、その有効性を検証していきたい。

参考文献

- [1] Benko, H., Wilson, A. D. and Balakrishnan, R.: Sphere: Multi-Touch Interactions on a Spherical Display, *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 77–86 (online), DOI: 10.1145/1449715.1449729 (2008).
- [2] Li, Z., Miyafuji, S., Sato, T., Kuzuoka, H. and Koike, H.: OmniEyeball: Spherical Display Equipped With Omnidirectional Camera And Its Application For 360-Degree Video Communication, *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 33–35 (online), DOI: 10.1145/3266037.3266092 (2018).
- [3] Pla, P. and Maes, P.: Display Blocks: A Set of Cubic Displays for Tangible, Multi-Perspective Data Exploration, *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 307–314 (online), DOI: 10.1145/2460625.2460677 (2013).
- [4] Zeller, L. and Scherffig, L.: CubeBrowser: A Cognitive Adapter to Explore Media Databases, CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2619–2622 (online), DOI: 10.1145/1520340.1520366 (2009).
- [5] Harish, P. and Narayanan, P. J.: A View-Dependent, Polyhedral 3D Display, *Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 71–75 (online),

- DOI: 10.1145/1670252.1670269 (2009).
- [6] Kigawa, K. and Ohshima, T.: HaptoBOX:, *SIG-GRAPH Asia 2019 Posters*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3355056.3364560 (2019).
 - [7] Lopez-Gulliver, R., Yoshida, S., Yano, S. and Inoue, N.: GCubik: Real-Time Integral Image Rendering for a Cubic 3D Display, *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/1597956.1597967 (2009).
 - [8] Comanje, R., van Dijk, N., Hogenbirk, H. and Mast, D.: Globe4D: Time-Traveling with an Interactive Four-Dimensional Globe, *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Multimedia*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 959–960 (online), DOI: 10.1145/1180639.1180850 (2006).
 - [9] Zhou, Y., Xiao, S., Tang, N., Wei, Z. and Chen, X.: Pmomo: Projection Mapping on Movable 3D Object, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 781–790 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858329 (2016).
 - [10] Miyafuji, S., Sato, T., Li, Z. and Koike, H.: Qoom: An Interactive Omnidirectional Ball Display, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 599–609 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126607 (2017).
 - [11] Gomes, A., Priyadarshana, L. L., Visser, A., Carrascal, J. P. and Vertegaal, R.: Magicscroll: A Rollable Display Device with Flexible Screen Real Estate and Gestural Input, *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3229434.3229442 (2018).
 - [12] Priyadarshana, L. L., Porter, V., Carrascal, J. P., Visser, A. and Vertegaal, R.: MagicWand: Exploring Physical Affordances with a Handheld Cylindrical Display Object, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 3762–3765 (online), DOI: 10.1145/2851581.2890259 (2016).
 - [13] Goguey, A., Steer, C., Lucero, A., Nigay, L., Sahoo, D. R., Coutrix, C., Roudaut, A., Subramanian, S., Tokuda, Y., Neate, T., Pearson, J., Robinson, S. and Jones, M.: PickCells: A Physically Reconfigurable Cell-Composed Touchscreen, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3290605.3300503 (2019).