

# 紙の本のような触覚インタラクションを提供する VR 読書環境の構築

王 蕊<sup>†1, a</sup> 小林 絵莉<sup>†1</sup> 武川 昂暉<sup>†2</sup> 矢野 浩二郎<sup>†3</sup> 柴田 博仁<sup>†2</sup>

**概要:** 本研究の狙いは、VR 空間内での快適な読書環境を提供することである。従来の VR 読書環境では、書籍の移動やページアクセスに恣意的なボタン操作が必要であり、読書に没入できないという問題がある。本研究では紙の本のような触覚インタラクションを提供することを狙いとして、書籍の移動や配置を制御するためのシート型のコントローラと書籍内のページアクセスを制御するための紙を束ねた書籍型のコントローラを提供する。本稿では、そのコンセプトと実装を紹介する。また、提案システムの初期評価として、4 名の被験者を対象に、従来システムと提案システムの比較実験を行った。タスクは書籍の移動、指定したページへのアクセス、異なるページ間の行き来の 3 種類である。総じて、評価結果は提案システムの有用性を示唆するものであり、いくつかの今後の改善が必要な点も明らかになった。

## 1. はじめに

近年、ヴァーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、HMD を用いた文書閲覧や教育環境の構築が進められている[1]。仮想的な場で、体を動かして訓練したり、他者とのコミュニケーションや社会性を通じて学びを得ることが期待されている。

一方、小林ら[2]は、物語や物語に登場するキャラクターの印象が、読む場所の背景イメージによって変化することを示している。これは、書籍を読む際、書籍のコンテンツだけでなく、書籍を読む場所にこだわる新たな読書の楽しみ方を示唆する。また、書籍のコンテンツに応じて、背景イメージを適切に制御することの重要性も示唆する。

このような読み方をするとき、現実空間では適切な場所を選んで、そこに移動する必要がある。また、その場所に移動したとしても、その日の天候までは自分の好みに変えられない。しかし、VR 環境内であれば、VR 空間を変えることで、背景イメージを瞬時に変えられるメリットがある。さらには、江戸時代の城下町で歴史小説を読むなど、現実世界では不可能な読書も可能になる。

本研究では、場所を選んで読書を楽しむことを狙いとして、その最初のステップとして VR 空間での読書環境の提供を目指す。しかし、現状の VR での読書環境では、書籍の移動やページ移動に恣意的なボタン操作方法や、コマンド選択や位置指定のために光の線を使った煩雑なレイ操作が必要になる。これは紙の本に対して人が行う直観的操作とは大きく異なり、複雑な操作に気を取られて読書に没入できないという問題が生じる。

そこで、書籍の取り扱いに特化した VR コントローラを独自に開発して、紙の本のように直観的に操作可能な読書環境の構築を目指す。提案する枠組みでは、書籍の移動や

配置を可能にするシートコントローラと書籍のページ操作を可能にするページコントローラを提供し、紙の本のような触覚フィードバックを得ながら読書できる。被験者 4 名の初期実験を通して、提案手法の有用性を示唆する結果を得た。

## 2. 関連研究

電子環境での文書や書籍の閲覧に際して、紙の書籍のような柔軟なページめくりでできない問題は古くから認識されてきた。

Schilit ら[3]は、電子環境での読みの支援に際して、ページめくりを物理的なボタンで行うようにして、ページめくりの操作に触覚フィードバックを与えた。Chen ら[4]は、連結した 2 枚のスレート型端末に 2 ページ分を連続表示させたり、2 枚のスレートを開け閉めするジェスチャでページをめくれる方式を提案した。また、曲げを検知可能なデバイスを利用して電子文書のページめくりを制御したり[5]、デバイスを用いてフレキシブルにして、デバイスを湾曲させてページをめくる方式も提案されている[6]。

これらはいずれも、電子環境でのページめくりに触覚フィードバックを与えて、紙の書籍での操作感を模倣することを目指している。これに対して Masunaga ら[7]は、紙の書籍そのものを電子文書端末のページめくりのコントローラとして利用する方式を提案した。紙の書籍でのページめくりの模倣ではなく、紙の書籍そのものをページめくりの入力デバイスとして利用するため、複数ページをばらばらめくったり、ページに指を挟んで異なるページ間を行き来するなど、紙の書籍と全く同じインタラクションを提供できる。

電子環境のページめくりを支援する方式はいくつも提案されているが、これらはいずれも VR 環境での利用を想定したものではない。また、VR 環境で書籍を取り扱うに

†1 群馬大学情報学研究所  
a j251a030@gunma-u.ac.jp  
†2 群馬大学情報学部  
†3 大阪工業大学情報科学部

は、書籍を選んだり、書籍を手を持って表示の位置決めをするなどの操作も必要になるが、そうした行為の支援方式は提案されていない。本研究では、書籍の移動やページめくりを含め、VR 環境で触覚フィードバックを得ながら書籍を取り扱える環境の構築を目指す。

### 3. 支援の枠組み

書籍に対する操作は表 1 に示すように 3 種類に分類できる ([8]の分類を書籍用に修正)。

表 1 読みの最中に行われる操作の種類

操作の種類	説明	操作の例
書籍操作	書籍全体に対する操作	<ul style="list-style-type: none"> <li>・書籍を持つ、置く</li> <li>・書籍を並べる、重ねる</li> </ul>
ページ操作	書籍内のページに対する操作	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ページを1枚ずつめくる</li> <li>・ページを連続してばらばらめくる</li> <li>・複数ページを同時にめくる(ジャンプする)</li> <li>・異なるページ間を行き来する</li> <li>・ページに指や葉を挟む</li> </ul>
コンテンツ操作	ページ内のコンテンツに対する操作	<ul style="list-style-type: none"> <li>・書き込む</li> <li>・指さす、ポインティングする</li> <li>・テキストをなぞる</li> </ul>

理想的には、これら全ての操作が触覚フィードバックを得ながら手で操作できることが望ましい。しかし、全ての操作をひとつのデバイス(コントローラ)で可能にするには、実現が困難な上に、たとえ実現できたとしてもデバイスの操作方法に制約が生じることが予想される。

たとえば、開いた本の触覚位置に VR 空間内で書籍のコンテンツを表示するには、開いているページやページのゆがみを検知する必要があり、技術的にハードルが高い。また、ページをゆがまないようにした場合には、ばらばらページをめくったり、指を挟んでページ間を行き来するなどの操作が制約される。

そこで、本研究では、書籍の取り扱いにおいて、書籍操作とページ操作を別々のコントローラで操作するアプローチを提案する。具体的には、書籍の見開きサイズの板のようなシート(「シートコントローラ」と呼ぶ)と、紙を束ねた小型の書籍のようなデバイス(「ページコントローラ」と呼ぶ)の 2 種類のコントローラを提供する。シートコントローラは、書籍を移動したり、並べたりする書籍操作を担当し、ページコントローラは書籍のページめくりをする役割をもつ。

ユーザは、書籍をシートコントローラに結び付ける(「アタッチ操作」と呼ぶ)ことで、シートコントローラと一体化して書籍を移動できる。適当な位置でシートコントローラから書籍を取り外す(「デタッチ操作」と呼ぶ)と、書籍はその位置に固定して空中に表示される(「フローティング」と呼ぶ)。

アタッチとデタッチの概念を取り入れることにより、ひとつのシートコントローラで複数の書籍を取り扱えるようになる。また、フローティングの概念を取り入れることにより、

書籍を閲覧するために両手でページを開く必要がなくなり、また複数の書籍を空間に並べて比較できるようになる。

また、ユーザは書籍をページコントローラに結び付ける(アタッチ操作)ことで、書籍のページをめくれるようになる。必要に応じて、ページコントローラから書籍を取り外す(デタッチ操作)ことも可能である。ページコントローラでページを開くと、コントローラにアタッチされた書籍の対応するページが表示される。この方式は Masunaga ら [7] が電子書籍のページ操作のために提案した方式を、VR の読書環境に適用したものである。

ユーザは書籍に対する操作の種類ごとにシートコントローラとページコントローラを使い分ける必要がある。書籍の位置の変更、すなわちシートコントローラの利用はそれほど頻繁ではないと予想するため、ユーザの通常の利用において混乱はないだろうと予想するが、これが本当かどうかはシステムを試作して検証する必要がある。

## 4. 提案システム

### 4.1 システム構成概要

提案するシステムにおいて、VR ヘッドマウントディスプレイ(HMD)として Pico 製の Pico 4 を使用する。

提案システムは、シートコントローラとページコントローラの 2 つのデバイスと、VR 空間内に表示される書籍コンテンツ(以下、コンテンツ)から構成される。

各コントローラには位置と方向を取得するための Pico Motion Tracker が取り付けられており、これによりデバイスの動きがリアルタイムに VR 空間内へ反映される。

ページコントローラの各ページには、ページ番号をエンコードした QR コードが印刷されており、カメラによってページ番号を認識し、VR 内の表示ページへと反映させる。

### 4.2 シートコントローラの構成

シートコントローラ(図 1)は、書籍を移動したり並べるための薄型の板状のデバイスである。前面に Pico Motion Tracker が装着されており、シートの位置および姿勢が VR 空間内に反映される。



図 1 シートコントローラ

アタッチ操作では、ユーザがシートコントローラを VR

空間内に表示された書籍コンテンツの中心付近に近づけることで、書籍コンテンツがシートコントローラに結び付けられる。このとき、VR空間内に表示されていた書籍コンテンツはシートコントローラと一体化して、シートコントローラ上に表示された状態となる。シートコントローラと一体化した書籍コンテンツは、シートコントローラを動かすことで、好きな位置に移動可能である。

図2に示すように、ユーザがシートコントローラの左下から左上方向へ手を使う動作(デタッチ操作)を行うことで、書籍コンテンツがシートコントローラから分離される。この操作により、書籍コンテンツはシートコントローラの位置に固定され、VR空間内に表示される。

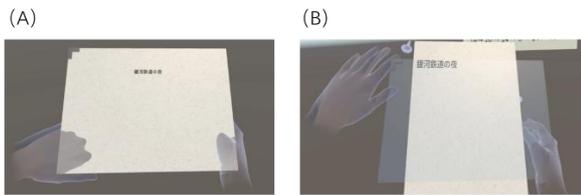


図2 デタッチのためのスワイプアップ操作として、手を左下(A)から左上(B)へスライドさせる様子

### 4.3 ページコントローラの構成

ページコントローラ(図3)は、ページ操作を行うための小型の紙の冊子状のデバイスである。実際の紙書籍に近い形状であり、表面には各ページに対応したQRコードが印刷されている。

ユーザがページコントローラをめくると、カメラが表示されているQRコードを認識し、対応するページ番号を取得する。これにより、VR空間内のコンテンツのページ状態が更新され、物理的なページめくり動作とVR内のページ遷移が同期される。

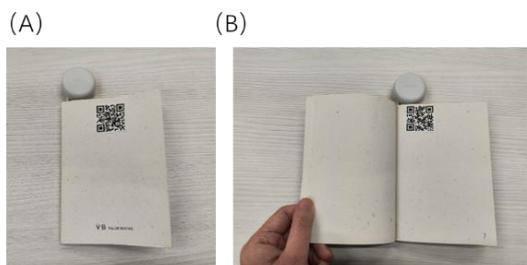


図3 ページコントローラ:(A) ページを開いていない状態、(B) ページを開いた状態

また、ページコントローラに取り付けられたPico Motion Trackerにより、デバイスの位置および姿勢が取得され、VR空間内でページコントローラに対応したオブジェクトが表示される。

## 5. 評価方法

提案手法の有用性を確認するための初期実験を行った。

提案システムの有効性を評価するため、従来システムを構築し、両システムの比較を行った。両システムでは、表示される書籍コンテンツ、ページ数、文字サイズおよび視覚表現を統一し、操作方式のみを差分要因とした。

### 5.1 実験デザイン

実験デザインは、1要因対応あり実験計画である。要因は「システム」であり、「従来システム」と「提案システム」の2水準である。

### 5.2 被験者

被験者は、VR機器の使用経験を有する大学生4名である。実験に先立ち、すべての被験者に対して実験内容を説明し、同意を得た上で実験を行った。

被験者ごとのシステム条件の実施順は、実験全体で学習効果が相殺されるようカウンターバランスを取った。

### 5.3 環境

比較対象として用いた従来システム(図4)は、小林らの先行研究[2]で提案されているブックビューアーというVRコントローラを用いた読書システムの機能を参考に、自作したものである。

書籍を移動する際、ユーザは書籍を選択し、Gripボタンを押すことで書籍を保持する。Gripボタンを押したまま書籍を移動でき、任意の位置でGripボタンを離すと、その位置に書籍コンテンツが固定される。書籍を開いたりページをめくる場合には、ユーザはコントローラから発せられるレイを書籍の左右に表示されるボタンに向けてクリックすることで操作を行う。これにより、ページを前後に移動させることができる。

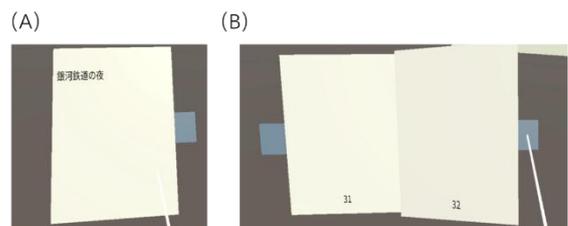


図4 従来システム (A) まだ開かれていない本 (B) 開いた本

### 5.4 実験タスク

3種類の実験タスクを設定した。書籍の移動しやすさを評価するための「書籍移動タスク」、指定したページへのアクセスしやすさを評価するための「ページジャンプタスク」、異なるページ間の行き来のしやすさを評価する「ページ間の行き来タスク」である。最後のタスクは、書籍の本文を読んでいる最中に目次や注釈を参照して再び元のページに戻るなど、通常の読書活動で頻繁に見られるページアクセ

スをモデル化したものである。

### 書籍移動タスク

VR空間内に6箇所の目標位置(図5)を設置し、被験者に書籍(コンテンツ)を1から6まで順に移動させた。従来システムでは、レイを用いて書籍を指定し、Gripボタンで書籍を移動させる。提案システムでは、被験者がシートコントローラに書籍を結び付けて、シートを動かして書籍の位置を変更する。

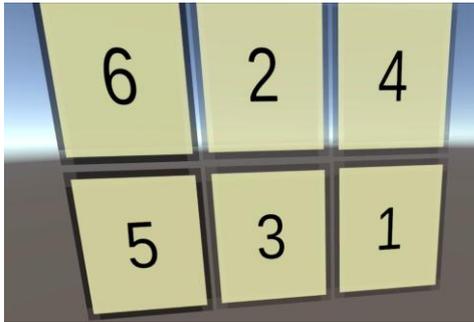


図5 書籍移動タスクにおける被験者視点

### ページジャンプタスク

画面にランダムなページ番号を提示し、被験者に指定されたページを開かせた。従来システムはページ側面のページめくりボタンをTriggerボタンで押してページ移動する。提案システムでは、ページコントローラによる紙めくり動作により指定ページへ移動する。

### ページ間の行き来タスク

画面にページ番号を提示し、被験者に指定されたページを開かせた。この際、「3→56→3→19」のように、特定のページ(上の例では「3」)を起点にして、それと他のページを行き来するようアクセスするページの順番を定めた。

## 5.5 実験手順と評価指標

実験は室内環境で実施し、HMDにはPico4を使用した。

実験に先立ち、被験者は実験開始前に各システムの操作練習を行った。その後、3つのタスクを全員が同じ順番で行った。各タスクについて、被験者の半分が従来システムから作業し、残り半分は提案システムから作業を開始した。

書籍移動タスクについては、客観指標としてタスク完了までに要した時間を計測し、主観指標としてタスク終了後にアンケート評価を実施した。

ページジャンプタスクおよびページ間の行き来タスクについては、タスクの性質に応じて客観指標を個別に設定したが、主観評価については両タスクを通して共通のアンケートを用いて実施した。主観評価では、指定された位置やページへの到達のしやすさ、操作の正確性および速さ、操作の直感性・分かりやすさ、操作中の身体的負担(手や腕の疲労)、ならびに操作中の精神的負担(集中力の消耗)について、5段階リッカート尺度による評価を行った。

全タスクの終了後にインタビューを行った。実験の実施は全体で90分だった。

## 6. 評価結果

### 6.1 書籍移動

書籍移動タスクでは、VR空間内に設定された複数の目標位置に対して、書籍(コンテンツ)を順に移動させる作業を行った。各被験者について、タスク開始からすべての目標位置への移動が完了するまでの時間を計測した。

移動タスクにおける平均所要時間は、従来システムが17.5秒、提案システムが21.75秒であった(図6)。対応のあるt検定を行った結果、両システム間に有意な差は確認されなかった。

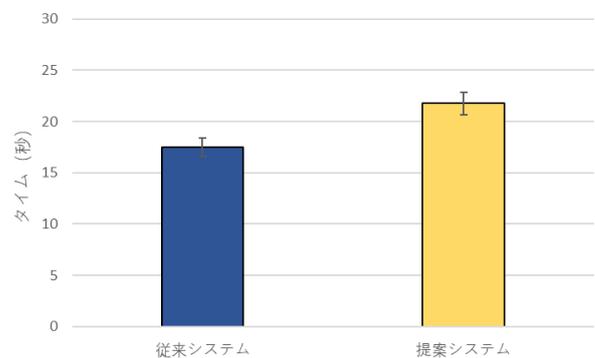


図6 移動タスクにおける平均所要時間

移動タスクに関する主観評価結果を図7に示す。正確さ、スピード、微調整のしやすさ、誤動作の少なさ、分かりやすさ、疲労度、精神的負担の各評価項目について、従来システムと提案システムの比較を行った。

各評価項目に対して対応のあるt検定を行った結果、いずれの項目においても有意な差は認められなかった。

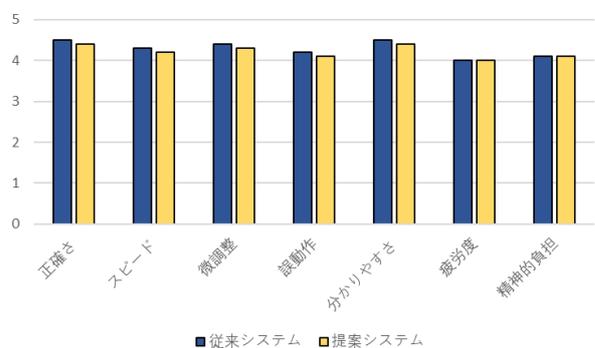


図7 移動タスクの評価アンケート

### 6.2 ページアクセス

ページジャンプタスクにおける所要時間の比較結果を図8に示す。平均所要時間は、従来システムが61.5秒、提案

システムが 49.0 秒であり、提案システムの操作時間が短い結果となった。対応のある  $t$  検定を行ったところ、両システム間に有意な差が確認された ( $t(3) = 8.04, p < .01$ )。ページジャンプタスクにおいては、提案システムが従来システムよりも操作効率が高いことが示された。

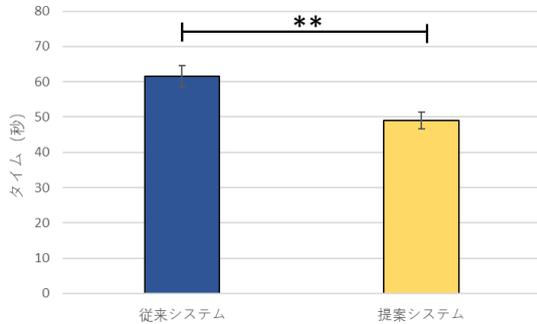


図 8 ページジャンプタスクにおける平均所要時間

ページ前後行き来タスクにおける平均所要時間の比較結果を図 9 に示す。平均所要時間は、従来システムが 65.5 秒であったのに対し、提案システムは 38.0 秒であった。対応のある  $t$  検定を行った結果、両システム間には有意な差が認められた ( $t(3) = 13.34, p < .01$ )。ページ前後行き来タスクにおいて、提案システムが従来システムよりも操作効率が高いことが示された。

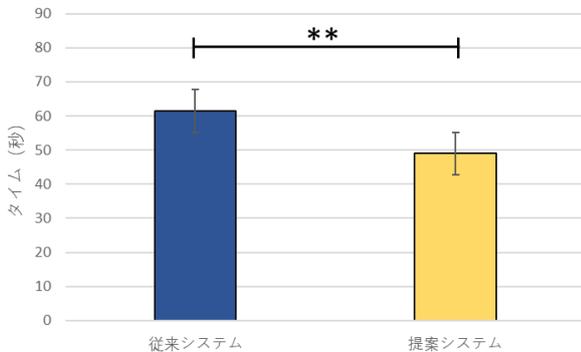


図 9 ページ間の行き来タスクにおける平均所要時間

ページジャンプタスクとページ間の行き来タスクを合わせたページアクセスについて、主観評価の結果を図 10 にまとめた。「スピード」( $t(3) = 11.00, p < .01$ )「疲労度」( $t(3) = 3.87, p < .05$ )「精神的負担」の少なさ ( $t(3) = 4.70, p < .05$ ) の項目において、提案システムが従来システムよりも有意に高い評価を示した。一方、「正確さ」については両システム間で大きな差は見られなかった。

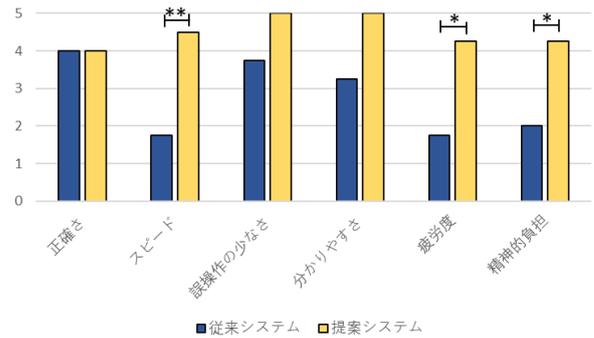


図 10 ページアクセスの評価アンケート

## 7. 考察

移動タスクについては、タスク完了までに要した時間の客観評価とアンケートによる主観評価において、両システム間に有意差が認められなかった。しかし、平均作業時間は、提案システムの方が従来システムよりも長い傾向を示し、アンケートのいくつかの評価項目では従来システムの評価が高かったことがわかった。これらの結果は、移動タスクに関して提案システムには改善の余地があることを示唆している。

インタビューでは、シートコントローラからコンテンツをデタッチする際、コンテンツの位置をうまく調整できない点が問題として指摘された。デタッチでのスワイプアップ・ジェスチャーで、シート上で手を上にスワイプすると、シートが押されて位置や角度が変わってしまうことがあるためだ。これにより、デタッチするコンテンツの位置や角度にぶれが生じる。よって、デタッチの際のジェスチャーを変更することで改善が可能だと考える。

ページアクセスについて、提案システムは従来システムより有意に効率的に作業できた。ページ間の行き来についても、提案システムは従来システムより有意に効率的だった。これらのタスクを総合した主観評価について、「スピード」「疲労度の少なさ」「精神的負担の少なさ」において、提案システムは従来システムに比べて有意に高い評価を得た。

ページを大きくジャンプするとき、ページコントローラでは、ページの厚さを手がかりに、指を挟む位置にあたりをつけて、一気にターゲットのページの近くにジャンプできることがインタビューで指摘された。この点が、常に先頭からシーケンシャルにアクセスする従来の方式とは大きく異なる。また、異なるページ間を行き来する際、ページコントローラでは、ページに指を挟んで簡単にページ間を往復できるという指摘もあった。ページコントローラのこうした利点が、効率的で、疲労や精神的負担の少ないページアクセスを可能にしたのだと考えている。

ただし、VR 環境内での手の位置が正確でないため、1 ペ

ページずつのページめくりでミスが発生することがあることが問題として見られた。手の動きの検出精度を高めることはもちろん必要だが、ページコントローラでの紙のシートを厚くしてページめくりしやすくしたり、ページをめくっている途中の状態を視覚化してめくっている感覚を高める工夫などが必要かもしれない。

## 8. むすび

本研究では、VR 空間での快適な読書環境を提供するため、書籍の操作に特化したコントローラを開発した。提案する枠組みの特徴は、書籍操作を行うシートコントローラと、ページ操作を行うページコントローラの2つで書籍に対する操作を支援することである。

プロトタイプシステムを構築し、提案手法の有用性を確認する初期評価実験を行った。シートコントローラについて、従来システムに対する有用性は確認できなかったが、コントローラの改善点が明らかになった。ページコントローラについては、ページのジャンプとページ間の行き来で従来手法より効率的で、疲労や精神的負担の少ないという評価を得た。本実験を通して、書籍操作とページ操作を2つのコントローラで支援する本研究の枠組みは、今後の発展に期待を持てるものだと考えている。今後もこの枠組みの中で、2つのコントローラの性能改善に努めていきたい。

## 参考文献

- [1] 矢野 浩二郎: VR・メタバースの外国語教育における可能性—基礎、現状、今後への展望。コンピュータ&エデュケーション 53, pp.37-42 (1998).
- [2] 小林 絵莉, 早川 莉緒菜, 柴田 博仁: 物語の印象は背景の視覚情報によって変わるか? VR 空間での読書の印象評価. 情報処理学会 インタラクション 2025 予稿集, 2P-93 (2025).
- [3] Schilit, B.N., Golovchinsky, G., and Price, M.N.: Beyond paper: Supporting active reading with free form digital ink annotations. *Proc. CHI '98*, pp.249-256, ACM Press (1998).
- [4] Chen, N., Guimbretiere, F., Agrawala, M., and Lewis, C.: Enhancing document navigation tasks with a dual-display electronic reader. *Proc. UIST '07*, ACM Press (2007).
- [5] 渡邊 純一郎, 望月 有人: フレキシブルディスプレイへ応用可能な曲げを利用した操作デバイス, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.12, pp.3899-3907, (2008).
- [6] Gallant, D.T., Seniuk, A.G., and Vertegaal, R.: Towards more paper-like input: Flexible input devices for foldable interaction styles. *Proc. UIST '08*, pp.283-286, ACM Press (2008).
- [7] Masunaga, S., Xu, X., Terabe, T., Shibuta, K., Shibata, H.: A paper book type input device for page navigation in digital documents. *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E100-C, No.11, pp.984-991, (2017).
- [8] 柴田 博仁, 高野 健太郎: アクティブリーディング中の柔軟なページ操作とコンテンツタッチを支援するタッチ操作体系. 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, pp.1929-1940 (2019).