

# 修士論文

拡張現実感における  
擬似触覚を用いた力覚フィードバック提示手法

Representation Methods for Haptic Feedback in Augmented Reality  
Using Pseudo-haptics

平成25年2月6日 提出

指導教員 小川 剛史 准教授

東京大学大学院  
工学系研究科 電気系工学専攻  
37-116430 大塚 隆史

## 要旨

拡張現実感の環境下において、現実世界に重畳表示した仮想物体とリアルなインタラクションを実現するには、視覚的な提示だけでなく、あたかも仮想物体に触れたかのような力覚フィードバックを提示することが重要である。従来研究では、仮想物体からの力覚フィードバックを実現するために力覚提示デバイスを用いる手法が研究されてきた。しかし、装着型や接地型のデバイスはユーザの行動や動きに制約を課すことが多いという問題がある。筆者らの研究グループでは、視覚と固有受容知覚の情報の不整合によって生じる擬似触覚を利用し、拡張現実感において触覚デバイスを用いることなく仮想物体から力覚フィードバックを得る手法の確立を目指している。本論文では、拡張現実感における擬似触覚の生起の有無と擬似触覚が与える力の大きさや、擬似触覚を効果的に生起させる条件について調査した。被験者実験より拡張現実感においても擬似触覚が生起することと、提示する手の速度変化によって力覚の大きさが異なるという知見が得られた。

## Abstract

In order to realize high realistic interactions between a user and virtual objects, it is very important to give a user haptic stimuli in augmented reality as if he touched them. In previous works, a user have to equip or grasp a haptic device simulating haptic feedback from virtual objects. However, equipping or grasping a device prevent a user from moving naturally. Our aim is to realize haptic feedback without a haptic device in augmented reality using pseudo-haptics which is a phenomenon where visuo-haptic sensory conflicts. In this paper, we investigated the occurrence of pseudo-haptics in augmented reality and the condition where we simulate haptic feedback efficiently using pseudo-haptics. Based on subjective experiments, we observed pseudo-haptics occurs in augmented reality and an influence to haptic sense differs depending on a displayed hand speed.

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.2 本論文の目的 . . . . .	2
1.3 本論の構成 . . . . .	2
<b>第2章 関連研究</b>	<b>3</b>
2.1 拡張現実感 . . . . .	3
2.2 擬似触覚 . . . . .	5
2.3 拡張現実感における擬似触覚 . . . . .	7
<b>第3章 提案手法</b>	<b>8</b>
3.1 擬似触覚を利用した力覚フィードバック提示手法の提案 . . . . .	8
3.2 拡張現実感において擬似触覚を提示する場合の問題点とアプローチ . . . . .	8
3.3 システム構成 . . . . .	9
3.4 提示する手の速度制御 . . . . .	10
<b>第4章 評価実験</b>	<b>13</b>
4.1 実験1:擬似触覚を用いた仮想物体の重量提示 . . . . .	13
4.2 実験2:擬似触覚を用いた仮想物体の引力提示 . . . . .	22
4.3 実験3:磁石を模した速度制御による引力提示 . . . . .	25
<b>第5章 考察</b>	<b>30</b>
5.1 実験1の考察 . . . . .	30
5.2 実験2の考察 . . . . .	37
5.3 実験3の考察 . . . . .	39
<b>第6章 結論</b>	<b>42</b>
6.1 結論 . . . . .	42

6.2 今後の課題 . . . . .	43
謝辞	44
発表文献	45

## 目 次

2.1	拡張現実感における仮想のディスプレイウィンドウ [1]	4
2.2	AR マーカと仮想キャラクター [2]	4
2.3	マウスポインタの速度 [3]	6
2.4	マウスポインタの速度振動 [4]	6
2.5	ボール付デバイス [5]	7
2.6	HEMP[6]	7
3.1	提案手法のイメージ	9
3.2	提案システムの構成図	10
3.3	スレッド3による提示速度制御	11
4.1	実験1のHMD画面	14
4.2	実験1の実験風景	14
4.3	実験1-1の条件1における提示する手の速度	15
4.4	実験1-1の平均得票数	16
4.5	実験1-2の平均得票数	19
4.6	実験1-3の平均得票数	21
4.7	実験2の実験風景	23
4.8	実験2におけるボールの速度	23
4.9	実験2の結果	24
4.10	実験3の構成図	25
4.11	磁石の引力を模したボールの速度	26
4.12	実験3-1の引力知覚度の平均値	27
4.13	実験3-2の引力知覚度の平均値	28
5.1	実験1-1のサー斯顿尺度値	31
5.2	実験1-2のサー斯顿尺度値	33

5.3	実験 1-3 のサー斯顿尺度値 . . . . .	35
5.4	実験 2 のサー斯顿尺度値 . . . . .	39
5.5	被験者 A の実験 3 の結果 . . . . .	40
5.6	被験者 B の実験 3 の結果 . . . . .	40

## 表 目 次

4.1	実験 1-1 の平均得票数の条件間における有意差 . . . . .	16
4.2	実験 1-2 の平均得票数の条件間における有意差 . . . . .	19
4.3	実験 1-3 の平均得票数の条件間における有意差 . . . . .	21
4.4	実験 2 の平均得票数の条件間における有意差 . . . . .	24
4.5	実験 3 の遅延区間 . . . . .	27
5.1	実験 1-1 の人数分布 . . . . .	30
5.2	実験 1-1 の標準得点およびサーストンの尺度値 . . . . .	31
5.3	実験 1-2 の人数分布 . . . . .	32
5.4	実験 1-2 の標準得点およびサーストンの尺度値 . . . . .	33
5.5	実験 1-3 の人数分布 . . . . .	34
5.6	実験 1-3 の標準得点およびサーストンの尺度値 . . . . .	35
5.7	現実の手に対する提示する手の最大遅延距離 . . . . .	36
5.8	実験 2 における人の数 . . . . .	37
5.9	$\zeta \geq 0.50$ の人の数 . . . . .	38
5.10	実験 2 の標準得点およびサーストンの尺度値 . . . . .	38

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

コンピュータが生成した仮想物体などの電子情報を用いて実空間に情報を付加する拡張現実感に関する研究が盛んに行われている [1][7][8][9]. あたかも仮想物体がそこに存在するかのように高いリアリティで実空間に提示するには, 実空間における幾何学的な整合性を保持することや光学的な整合性を保持することが重要である. 近年では視覚的な情報だけでなく, 聴覚, 触覚, 嗅覚など, さまざまな感覚を併用することで仮想物体のリアリティを向上させる方式が検討されている.

触覚などの力覚提示に関し従来の研究の多くは, 振動モータやピンチグローブなどの物理デバイスを装着したり, PHANTOM[10] のような接地型の力覚提示デバイスを把持することで, 力触覚フィードバックをユーザに提示していたがこれらのデバイスはユーザの行動や動きに制約を課すことが多い. また力覚フィードバックを提示する箇所はデバイスのある限られるため, 体の任意の場所に力覚フィードバックを提示しようとするとう任意の箇所にデバイスを装着する必要がある, デバイス自体のコストや装着する手間がかかる.

一方で主に人工現実感環境下において, 視覚刺激だけで力覚フィードバックを提示する手法が研究されている. 視覚刺激による力覚フィードバックの提示には擬似触覚 (Pseudo-haptics) と呼ばれる錯覚が利用されている. 擬似触覚とは, 視覚と固有受容知覚の間に情報の不整合が発生した場合に擬似的な触覚を知覚する現象である [11]. 人間は自身の体の動きを固有受容知覚によってある程度認識することができるが, 固有受容知覚の情報と視覚情報の間に不一致が生じた場合に外部から力を与えられていると錯覚する. 例えば, マウスを等速で動かしている際に手の動きが, 急にマウスポインタの移動速度が減速したり加速したりすることで, 画面上の凹凸があるように感じられ, まるで手が力を受けてるように錯覚する.

擬似触覚を用いることで, 物理デバイスを用いずに力覚フィードバックを提示することは可能であるが, その知覚の大きさには個人差があり, 大きな力覚フィードバックを提示が困難であるという課題がある. また擬似触覚を生起させる際, 視覚と固有受容知覚の情報



の不整合を生じさせるために手など体の一部を意図的に見えなくしているものが多く、擬似触覚は人工現実感における研究が盛んである。

## 1.2 本論文の目的

本研究では、拡張現実感における仮想物体の操作においてより直感的なインタラクションを実現することを目的とし、擬似触覚を用いてユーザに力触覚フィードバックを提示する手法について検討している。物理デバイスを用いないことで、ユーザの行動や動きを制限することなく力覚フィードバックを提示する簡易的な力学提示システムが構築できると考えている。本力学提示システムは、仮想物体を用いたエアホッケーや積み木、仮想レバーなどを想定したアプリケーションにおける触覚提示に応用でき、仮想物体を直感的に操作することを可能にすることで、拡張現実感において重畳描画された仮想物体のリアリティ向上に貢献できると考える。

本論では、擬似触覚 (Pseudo-haptics) を拡張現実感環境で実現する手法について検討し、仮想物体の重さや引力のような力覚フィードバックを知覚させるための条件について調査した被験者実験について述べる。

## 1.3 本論の構成

本論の構成を以下に述べる。第1章では本論の研究背景と目的について述べた。第2章では拡張現実感における研究や擬似触覚に関する研究について述べる。第3章では擬似触覚を拡張現実感において実現する際の問題点やそれに対するアプローチについて述べ、実装したシステム構成について説明する。第4章では第3章で提案した手法をもとに行った被験者実験について述べ、その実験結果を示す。第5章では第4で行った被験者実験の結果をもとに考察を行う。第6章ではまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 関連研究

本章では拡張現実感に関する研究と擬似触覚に関する研究を述べる。また、擬似触覚を拡張現実感環境下で実現する際の問題点について考察する。

### 2.1 拡張現実感

拡張現実感 (Augmented Reality, AR) とは、一般的には「情報技術を活用して現実空間に何らかの情報を付加すること、また情報が付加された空間そのもの」という定義がされている [1]。拡張現実感を実現する技術の一つに、カメラから撮影した画像の空間上に位置的および光学的な整合性を保つように仮想物体を重畳描画する技術がある (図 2.1)。これに関してノースカロライナ大学のローランドアズマは拡張現実感の定義として以下の三つの条件を述べている。

- 現実と仮想が組み合わされている
- 相互作用がリアルタイムに行われる
- 3D で再現される

拡張現実空間において仮想物体を表示するためにはカメラと物体の位置姿勢の関係を推定する必要がある。この推定を容易にするライブラリの一つに ARToolKit[12][13][14] がある。ARToolKit を用いることにより特定のマーカの位置・姿勢が容易に推定できる。これらの情報からマーカ上に座標系を生成でき、その座標系を元に図 2.2 のように仮想物体を表示できる。なおマーカの大きさ・模様が既知である必要がある。

また、近年においてマーカの代わりとして任意の物体を使用する方法がある。これはマーカレス法と呼ばれ Handy AR[15][16] や PTAM[17] などがある。これらの技術は物体の特徴となる点をトラッキングすることで可能となる。Handy AR は手のひらの部分を肌色検出し、指先のエッジ検出をすることで手の位置・姿勢を推定をしている。Handy AR はユーザが自分の手を用いて直感的に仮想物体を空間上に配置することを可能にした。Handy AR



図 2.1 拡張現実感における仮想のディスプレイウィンドウ [1]

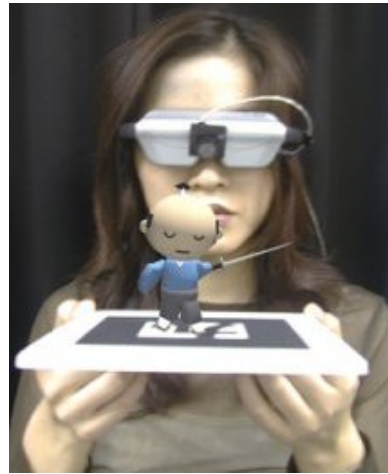


図 2.2 AR マーカと仮想キャラクター [2]

は肌色検出を行うため光の影響を受けやすい。これに対し PTAM は特徴点を検出し、カメラの位置・姿勢推定を高速で行うことで拡張現実感環境を構築している。環境に対しコーナー検出法を用いた特徴点を検出して初期化を行い、新たな画像から特徴点を検出しマッチングを行うことにより特徴点のトラッキングを可能にしている。しかし上記の手法ではオクルージョンに弱くトラッキング対象の一部が隠れてしまうと正確にトラッキングが行えないなどの欠点がある。以上の手法以外にも拡張現実感において仮想物体を重畳描画する際にカメラの位置・姿勢検出には他にも多くの手法が研究されている [18][19][20]。

仮想物体を実物体のように扱うためには幾何学的な整合性や光学的な整合性を保つことが重要である。質量のある物体に対し手で押すなどの力を加えた際に反作用の法則により力覚フィードバックを受けるが、仮想物体のように質量の伴わない物を扱う際に力覚フィードバックが得られないと操作性の低下やリアリティの低下に繋がる。

拡張現実感などにおいて力覚フィードバックを実現する手法は数多く研究されているが、その多くが物理デバイスなどを用いて力学的なフィードバックを実現している [21][22][10][23]。例えば、Haptic Ring[24] は指先に小型デバイスを取り付けてワイヤーを引っ張ることで指先に力覚フィードバックを与える。指先が仮想物体に接触した際にワイヤーを引っ張ることでユーザは仮想物体とから力覚フィードバックを受けていると知覚する。しかし物理デバイスを用いる場合デバイスをユーザに取り付ける必要があるため、ユーザの自然な動きを妨げデバイス自体の重みがユーザに負荷をかけるという欠点がある。

一方で物理デバイスを用いずに視覚情報のみで力覚フィードバックを錯知覚させる研究がある。この錯覚を擬似触覚 (Pseudo-haptics) と呼ぶ。擬似触覚は視覚から得られる情

報と体性感覚から得られる情報に不整合が生じた際に、視覚による情報が優勢になるという脳の特徴から擬似的な力を受けているように錯覚する現象である。以下に擬似触覚についての研究を紹介する。

## 2.2 擬似触覚

擬似触覚には大きく分けて二通りの感じ方があり、表面の形状を錯知覚するものと力学的な力を錯錯覚するものに分けられる [25][26][27]。本節では擬似触覚を表面形状知覚と力知覚に分け各々に関して行われている研究について紹介する。

### 2.2.1 表面形状知覚の擬似触覚

Lécuyer らは、マウスを操作する手を箱で覆い意図的に見えない状態にして、ユーザの操作とは独立に画面上のマウスポインタの動きを加速・減速させると擬似触覚が生じ、ディスプレイ上に凹凸などの表面形状を提示できると報告している [3]。ユーザはディスプレイ上に表示されたマウスポインタを自由に動かすことができ、ディスプレイ上には円状の領域が表示されている。円状の領域外ではマウスポインタの動きを変化させない。円状の領域は図 2.3 のように中心を通る直線を境としてマウスポインタを加速させる領域と減速させる領域に分けられている。マウスの変位量とマウスポインタの変位量の比を C/D ratio といい、C/D ratio を変化させることで表面形状を提示している、具体的には減速時に C/D ratio を大きくしてマウスポインタが山を登っていると知覚させ、加速時には C/D ratio を小さくすることで山を下っていると知覚させており、C/D ratio を適切に変更することで凹凸などの表面形状が効果的に提示できるとの知見を得ている。また同著者らは、C/D ratio だけでなく、提示するマウスポインタの大きさを変更することで表面形状の提示がさらに効率よく提示できるとの研究結果も報告している [28]。また Hachisu ら [4] は、C/D ratio の変化量に微小な振動を付加することが表面形状や仮想物体の材質を表現する手助けになるとして、ディスプレイ上には円状の領域や仮想物体が提示され、円状の領域をマウスポインタが動く際に C/D ratio の変化量に図 2.4 のような微小な振動を重ね合わせることで表面形状を提示し、マウスポインタが仮想物体に衝突した際のマウスポインタの動きを振動させることで仮想物体の材質を表現する手法を提案している。

このように擬似触覚を用いて表面形状や材質を知覚させる研究は盛んに行われている [26][29][30][31][32][33]。次節では擬似触覚の力知覚に関する研究について紹介する。

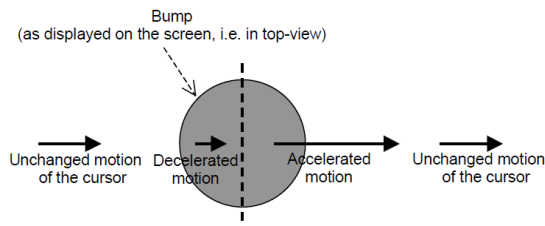


図 2.3 マウスポインタの速度 [3]

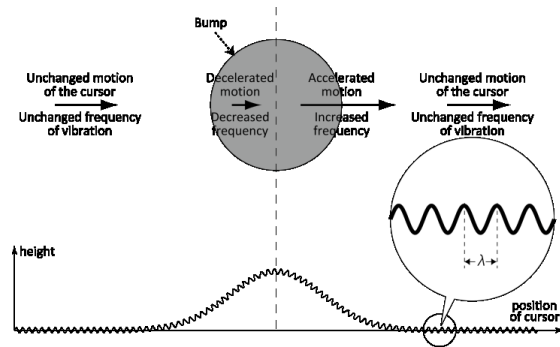


図 2.4 マウスポインタの速度振動 [4]

### 2.2.2 力知覚の擬似触覚

Dominjon らは、擬似触覚を用いてボールの重さを錯覚させるシステムを構築している [5]。ユーザはディスプレイの前に座り、ボールの取り付けられたデバイスを手で上下に動かすことができる。図 2.5 のようにボールがデバイスに取り付けられたデバイスがあり、実験時は箱に覆うことで被験者が直接見ることがないようにしている。またディスプレイには仮想のボールが表示されておりユーザが動かすボールの動きに連動して動くようになっている。ボールを押し上げる動作をする際に画面上のボールの動きを実際のボールの動きより速くしたり遅くしたりすることで、実際のボールの重さが一定であっても、それぞれ実際の重さよりも軽く感じさせたり重く感じさせることができると報告している。Paljic らは、ドアノブ型の弾性力のあるデバイスと等尺性のデバイスを用いてトルクを提示するシステムを構築しており、等尺性のデバイスと比較して弾性力のあるデバイスは効率よくトルクを提示できるという知見を得ている [34]。弾性力のあるデバイスは、ある程度自由に回転することができ等尺性のデバイスは固定されており回転しない。両方のデバイスにおいて、加えたトルクは計測することができ、画面上の仮想的なドアノブの回転角度を大きくしたり、小さくしたりすることで、デバイスを回す際に知覚するトルクを実際のトルクより小さくまたは大きくしている。

また Pusch らは、実際の手が静止しているときに仮想の手が動くことで手が流されている感覚を提示するシステム (HEMP) を研究している [6]。ユーザは HMD を介して仮想の手を見ており仮想の手は操作する手の動きに合わせて動く。図 2.6 のようにユーザの前に流れ場が表示されており、そこへ手をかざすと操作する手は静止しているにも関わらず、仮想の手が流れの方向へ移動する。このとき視覚が体性感覚に対して優位になり手が流されていると知覚すると報告している。

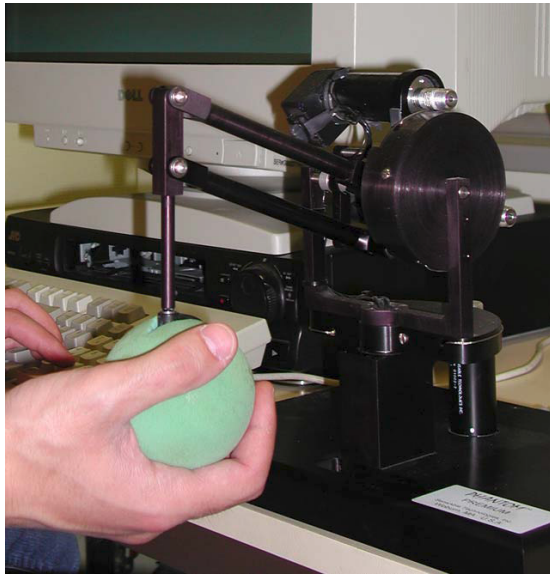


図 2.5 ボール付デバイス [5]



図 2.6 HEMP[6]

さらに岡本らは事前に撮影された映像を用いても擬似触覚が生起すると報告している [35][36][37][38]. 一定間隔で鳴る音に合わせて手を一定の速度で動かすよう被験者に指示し予め手の動きを撮影する. 被験者が同様に手を動かす際, 現実の手を見せるのではなく, 事前に撮影された手の映像を提示して再生速度を早めたり遅くしたりすることで擬似触覚が生起すると報告している.

### 2.3 拡張現実感における擬似触覚

以上で述べたように擬似触覚を用いることで力覚フィードバックを提示することは可能である. しかし既存研究は擬似触覚を提示するために操作する手を意図的に見えなくしており人工現実感における研究が多い. 例えば, Lécuyer らの研究では手を箱で覆うことにより意図的に手を見えなくしており, マウスポインタの動きを変化させることによって視覚刺激を変化させている.

筆者らの研究では拡張現実感において擬似触覚を用いて力覚フィードバックを提示することを目的としている. 拡張現実感において仮想物体を現実物体のように扱うためにはユーザが自身の手で仮想物体を操作する場合を考慮する必要がある [39][40]. このとき拡張現実感では手を視野から除くことができないため, 従来の手法では実現できずどのように擬似触覚を提示するかが課題である. 次章では本研究における提案手法について説明する.

## 第3章 提案手法

### 3.1 擬似触覚を利用した力覚フィードバック提示手法の提案

擬似触覚は、体の動きと視覚から得られる対象の動きに不整合が発生した際に、体性感覚よりも視覚による情報が脳内で優勢になるという特性から生じる触錯覚である。本研究ではこの擬似触覚を用い、拡張現実感において物理デバイスを用いずに力触覚を提示する。物理デバイスを用いずに力触覚を提示することは、ユーザの動きを妨げずより簡素なシステムで拡張現実感におけるリアリティを向上できると考える。

### 3.2 拡張現実感において擬似触覚を提示する場合の問題点とアプローチ

従来研究では、意図的に体性感覚と視覚刺激の不整合を発生させるため、操作している自身の手をユーザが直接見ることがないようにしている。しかし拡張現実感では、実物体を操作するときのように、画像マーカなどを用いて仮想物体を直接操作するため、その手を視野から除くことができない。例えば仮想物体を持って移動させる操作を考えた場合、視覚刺激の変化量を大きくするという事は、視覚刺激としての手の動きを加速させることに対応するが、それを実現するには、ユーザが取り得るすべての操作の映像を事前に準備しておき、ユーザの今後行う行動を予測して、適切な映像を選択して加速した手の動きを提示することになる。しかし、事前の映像保存や行動予測を行うことは現実的ではない。本研究では、ユーザの視界からユーザの手を隠すことなく手の運動速度を制御するために、ユーザの装着するカメラでリアルタイムに取得した映像を用いる。具体的には、視覚刺激を減速させる場合には、提示するフレームの再生速度を遅くすることで実現し、加速させる場合には、再生速度を速めることで実現する。ただし、上記で述べたように、現実の手の位置よりも前に手があるように再生速度を速めて映像を提示することができないため、本手法では、一度減速してから加速する映像を提示する。図 3.1 は提案手法のイメージであり、手が右から左へ移動する際の取得画像と提示画像を示している。赤点は中指の先端を

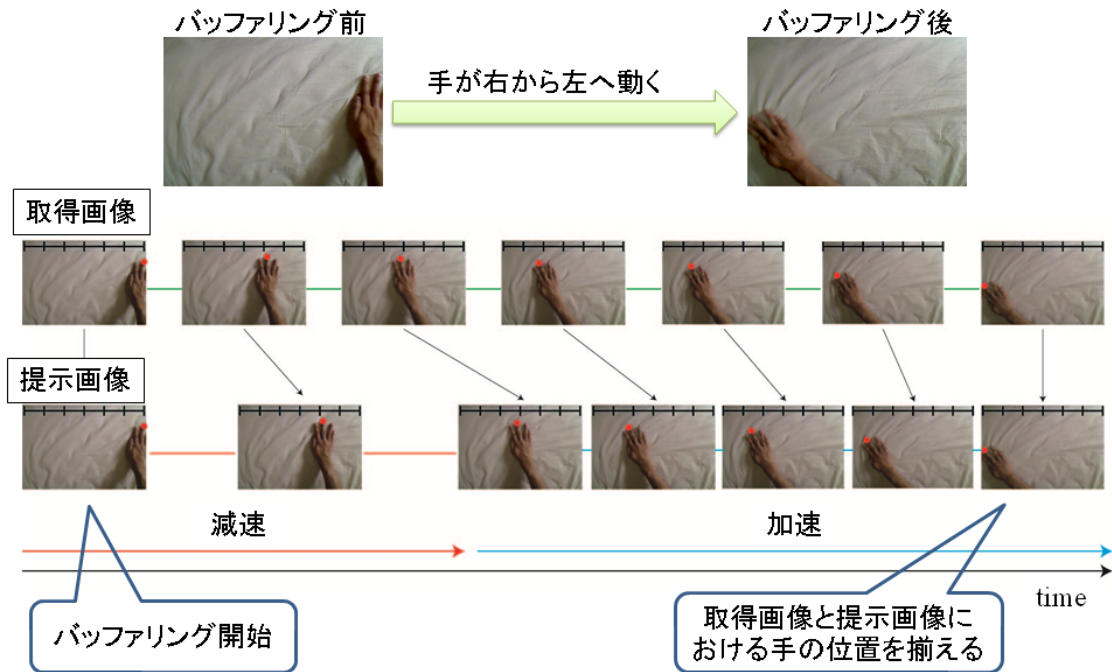


図 3.1 提案手法のイメージ

指している。

### 3.3 システム構成

再生速度を速めたり遅くするために画像取得，仮想物体の描画，画像の描画を個別に処理した。具体的な処理は，図 3.2 のように 3 スレッドで実現した。スレッドの並列処理には OpenMP を使用した。スレッド 1 は，OpenCV を用いてカメラから画像を取得し，ARToolkit で処理できるように IPL イメージを ARUint8 に変換してバッファに保存する。スレッド 2 は，ARToolkit を用いてカメラの位置・姿勢を算出し手の位置を求める。その後，仮想物体を畳重描画し，IPL イメージに再変換してバッファに保存する。バッファに保存された IPL イメージはスレッド 3 で表示する。スレッド 1 に要した時間とスレッド 2 で推定した手の位置から，手の移動速度をスレッド 2 において算出する。手の移動距離と提示し



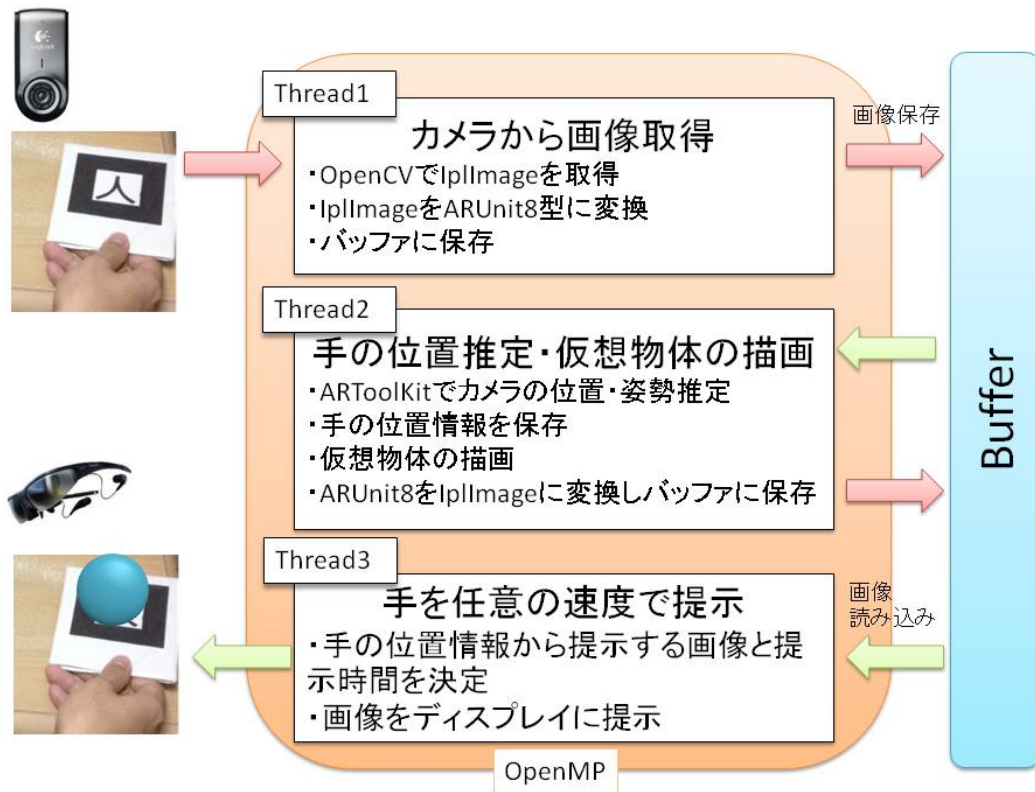


図 3.2 提案システムの構成図

たい手の移動速度をスレッド3で決定し、スレッド3において、バッファに保存したIPLイメージを任意の時間で表示することで手を提示したい速度で表示する。カメラはLogicool社製のWebcam 905を利用し、HMDはVUZIX社製のWrap920を利用した。

### 3.4 提示する手の速度制御

本節では、HMDに提示する手を任意の速度で表示する際の具体的な処理について述べる。スレッド1で取得された画像は、スレッド2においてARToolKitを用いてカメラの位置・姿勢が推定され、カメラに対するマーカおよび手の相対座標が推定される。このとき、スレッド1ではカメラの性能限界である30fpsで画像が取得され、スレッド2ではそれよりも早い速度で座標推定が行われ仮想物体が描画される。このとき、スレッド1でバッファに保存された画像よりもスレッド2での処理が進まないようにする。スレッド2での1ルー

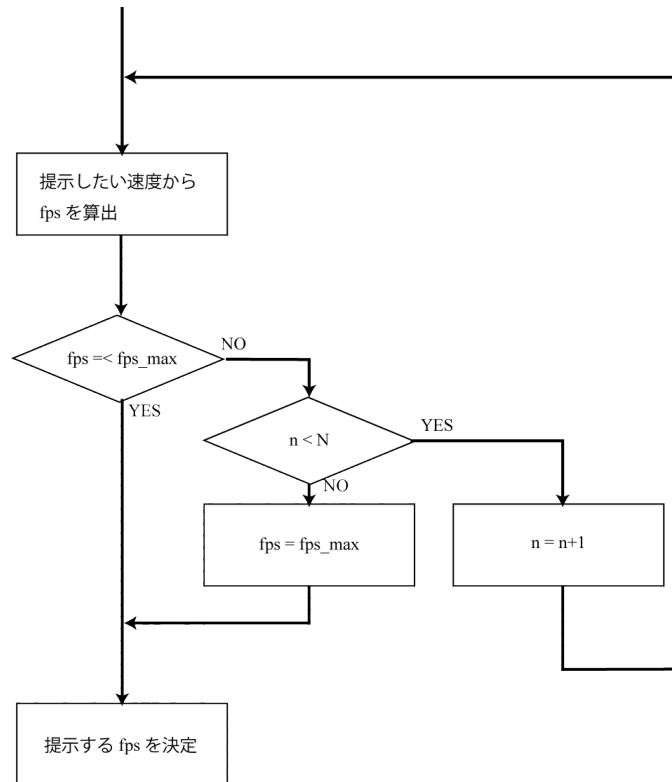


図 3.3 スレッド3による提示速度制御

自分の処理が Thread1 の1ループ分の処理速度よりも遅くなることはなく、取得画像に対して仮想物体が描画された画像が著しく遅延することはない。つまり、ほぼリアルタイムで仮想物体が描画された画像がバッファに保存される。

スレッド3ではスレッド2で推定した手の位置を元に速度制御を行う。まず、スレッド3において手の速度制御を行うためには、スレッド3の1ループ分の処理速度を決定しなければならない。1ループで描画できるフレーム数は一枚であるので、その速度はfpsで表せる。clock関数を用いることにより、1ループの開始時間、1ループの終了時間を計測する。遅延して表示する際は、指定したfpsになるまで、1ループの終了時間を計測し続け次のループに移らずに待機させることで1ループを指定の速度で処理させることが可能である。次に、提示したい速度で手を表示するために必要なfpsについて述べる。スレッド3で提示する画像をn番目の画像とする。提示したい手の速度を $\vec{V}_h$ として、n番目の画像における手の位置を $p_n$ 、n-1番目の画像における手の位置を $p_{n-1}$ とするとn番目の画像を表示

する際のスレッド3の処理時間は次の式(3.1)で表される.

$$fps = \frac{|\vec{V}_h|}{|\vec{p}_n - \vec{p}_{n-1}|} \quad (3.1)$$

しかし, 式(3.1)によって算出されるfpsは,  $|\vec{p}_n - \vec{p}_{n-1}|$ の値が極端に小さいと増大する. システムで処理できる速度には限界があるため, fpsが極端に大きな値だとその速度で処理できない. そこで $|\vec{p}_n - \vec{p}_{n-1}|$ の値を大きくするため, 図3.3のような処理を行った. 以下に具体的な処理を説明する.

提示したい速度からfpsを算出し, そのfpsがシステムが処理できる限界値fps\_maxより小さければ提示するfpsを決定する. 算出したfpsがfps\_maxよりも大きく, 提示するフレームの番号nがカメラが取得した最新のフレーム番号Nと等しければ提示画像と取得画像が等しくなるので, fpsにfps\_maxを代入して提示するfpsを決定する.  $n < N$ ならば, 提示する画像を次の画像に切り替えて提示するフレーム番号はn+1として, 新たな手の位置情報とタイムスタンプの情報からfpsを算出し同様の処理を行う.

## 第4章 評価実験

提案手法を評価するにあたり，仮想物体から受けることが想定される力は力の方向によって大きく分けて二通りある．一つ目は自分の手の移動方向と仮想物体から加わる力の方向が逆であるもの，二つ目は手の移動方向と仮想物体から加わる力の方向が同じであるものである．この二つの力を提案手法を用いて拡張現実感において提示できるか評価するため3種類の実験を行った．第一に仮想物体を打ち返す場面において打ち返す動作を行う際の物体の重さを擬似触覚を用いて提示できるか検証し，拡張現実感において擬似触覚が生起するかを調査した．このとき，手の移動方向と加わる力の向きは逆である．第二に仮想物体同士が引きつけ合う場合を想定し物体間における引力を擬似触覚を用いて提示できるか検証した．このとき，手の移動方向と加わる力の向きは同じである．第三に実際の磁石を模した速度制御を仮想物体に対して行い擬似触覚を用いて引力提示が可能か検証した．次節以降に各実験の詳細について述べる．

### 4.1 実験 1: 擬似触覚を用いた仮想物体の重量提示

#### 4.1.1 実験 1-1

##### 実験目的

拡張現実感において仮想物体の重みを知覚できるか調査した．具体的には，移動している仮想物体を打ち返す動作を想定した際に，打ち返す手の再生速度を変更させることにより仮想物体の重みの知覚に違いが生じるか検証した．

##### 実験方法

図 4.1 に被験者に提示する HMD の画像を示し，図 4.2 に実験風景を示す．被験者は成人 22 名である．テーブルの上には仮想の立方体があり，仮想の立方体から図の右方向へ移動する仮想のボールがある．環境マーカをマーカ 1 とし把持するマーカをマーカ 2 とする．被験者はマーカ 2 を把持し，その上に表示されたボールを移動させ，立方体から動く

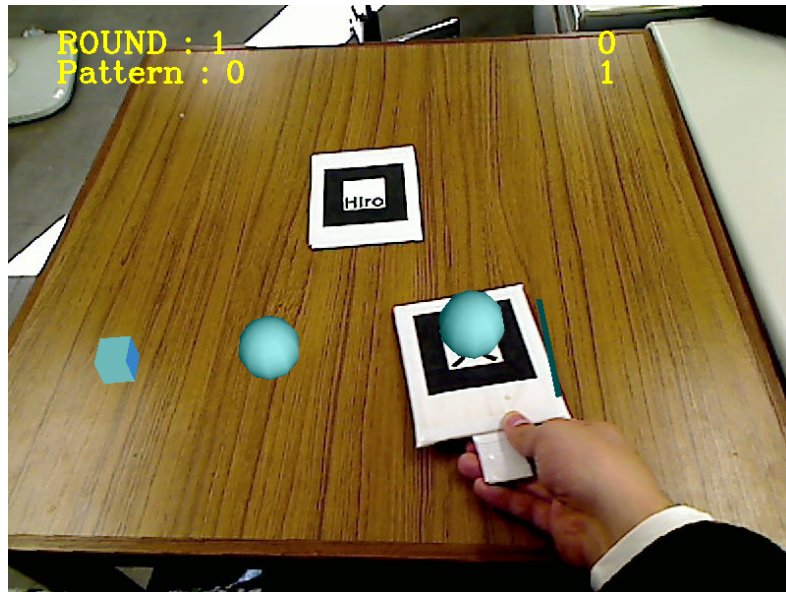


図 4.1 実験1のHMD画面



図 4.2 実験1の実験風景

ボールに衝突させる。被験者はこの操作をHMDを通して観察しており、2つのボールが衝突した際の提示する映像を制御することで提示する手の速度を変更させ視覚刺激を変化させた。提示する手はHMDに表示される手を示し、現実の手は現実空間における手を示

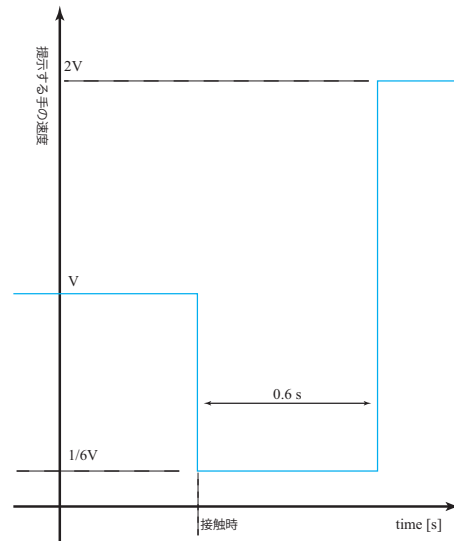


図 4.3 実験 1-1 の条件 1 における提示する手の速度

す。なおマーカ 2 上のボールの移動速度と提示する手の運動速度は同じである。仮想物体に衝突後の具体的な提示する手の移動速度は 6 通りあり、現実の手の速度に対して提示する手の移動速度が  $1/6$ ,  $2/6(1/3)$ ,  $3/6(1/2)$ ,  $4/6(2/3)$ ,  $5/6$ ,  $6/6(1)$  倍となる条件がある。それぞれを条件 1~6 とする。図 4.3 に条件 1 における提示する手の速度を示す。現実の手の速度を  $V$  とする。手の速度を遅くして提示する時間は全条件において 0.6 秒とし、以降は遅延がなくなるまで手の速度を 2 倍にして提示した。被験者には全ての条件について一対比較をさせ、15 組の試行を行わせた。1 組の試行ごとに、移動するボールを跳ね返す際に移動するボールがより重く感じた条件に得票させた。被験者は 1 組の試行を行う際、条件を前者、後者に自由に切り替えることができ、得票を行うと次の組の試行に移れる。具体的な回答は、マウスを用いてクリックすることで回答させた。被験者は右クリックすることで画面左上の Pattern を 0 か 1 に変更することができる。Pattern は各組の前者・後者に対応しており、これを切り替えることで条件を切り替えられる。右上に表示されている 0,1 は Pattern の数字に対応しており、ボールがより重く感じた方を左クリックすることで得票させた。左上の ROUND の数字は組の番号を示しており、被験者には予め 1~15 までの組の試行を行うと伝えた。各条件の組合せをランダムに ROUND に割り振り、1 組における前者・後者もランダムに行った。例えば 15 組の組合せの中で (2,3) の組合せがあるが、これを ROUND1~15 の中にランダムに割り振り、条件 2, 3 のどちらが前者となるかもランダムで決めた。これを他の組合せに対しても ROUND が重複しないように行った。

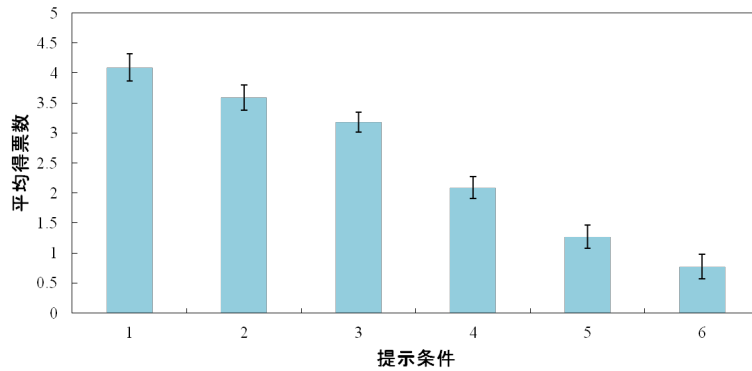


図 4.4 実験 1-1 の平均得票数

表 4.1 実験 1-1 の平均得票数の条件間における有意差

条件	1	2	3	4	5	6
1	-		*	**	**	**
2	-	-		**	**	**
3	-	-	-	**	**	**
4	-	-	-	-	*	**
5	-	-	-	-	-	*
6	-	-	-	-	-	-

\* $p < 0.05$   
 \*\* $p < 0.01$

### 実験結果

実験結果を図 4.4 に示す。横軸の番号は条件の番号に対応しており、縦軸は平均得票数と標準誤差を示している。平均得票数は条件 6 が最も小さく 0.7 程度であった。最も平均得票数が大きかったのは、条件 1 の 4.1 であったが条件 2、条件 3 と比較しても大きな差は見られなかった。

平均得票数に条件間で有意差があるか検証するため Wilcoxon 符号付順位和検定を行った。有意差を表 4.1 に示す。行と列の数字は条件の番号を示す。\* は有意水準 5% で有意差があることを示し、\*\* は有意水準 1% で有意差があることを示している。

条件間で有意差が見られたものの多くは有意水準 1% で有意差があった。有意水準 5% で有意差があったのは条件 (1, 3), (4, 5), (5, 6) の組合せであった。有意差が見られなかつ

たのは条件 (1, 2) および (2, 3) の組合せであった。

以上の結果から、現実の手に対して提示する手が遅延する距離が小さく、重さをより強く知覚させる条件は条件 3 である可能性が高い。この推測に関しては考察で詳しく述べる。



### 4.1.2 実験 1-2

#### 実験目的

実験 3-1 の結果より擬似触覚を提示する上で効果的だと思われる 1/2 倍の速度で手を提示する場合において、遅延時間を変化させることでボールの重さの知覚に違いが生じるか調査した。

#### 実験方法

実験 1-1 と同様に、テーブルの上には仮想の立方体があり、仮想の立方体から図の右方向へ移動する仮想のボールがある。被験者はマーカ 2 を把持し、その上に表示されたボールを移動させ、立方体から動くボールに衝突させる。被験者はこの操作を HMD を通して観察しており、2つのボールが衝突した際の提示する映像を制御することで視覚刺激を変化させた。手とマーカ 2 上のボールの移動速度は同じである。提示する手の移動速度は実際の手の移動速度に対して 1/2 倍であり、遅延して提示する時間は 6 通りあり、条件 1～条件 6 においてそれぞれ 0.2 秒、0.4 秒、0.6 秒、0.8 秒、1.0 秒、1.2 秒である。被験者には全ての条件に対して一対比較をさせ 15 組の試行を行わせた。回答方法は実験 3-1 と同じであり、1 組の試行ごとに、移動するボールを跳ね返す際に移動するボールがより重く感じた条件に得票させた。被験者は 1 組の試行を行う際、条件を前者、後者に自由に切り替えることができ、得票を行うと次の組の試行に移れる。具体的な回答は、マウスを用いてクリックすることで回答させた。被験者は右クリックすることで画面左上の Pattern を 0 か 1 に変更することができる。Pattern は各組の前者・後者に対応しており、これを切り替えることで条件を切り替えられる。右上に表示されている 0,1 は Pattern の数字に対応しており、ボールがより重く感じた方を左クリックすることで得票させた。左上の ROUND の数字は組の番号を示しており、被験者には予め 1～15 までの組の試行を行うと伝えた。各条件の組合せをランダムに ROUND に割り振り、1 組における前者・後者もランダムに行った。例えば 15 組の組合せの中で (2,3) の組合せがあるが、これを ROUND1～15 の中にランダムに割り振り、条件 2, 3 のどちらが前者となるかもランダムで決めた。これを他の組合せに対しても ROUND が重複しないように行った。被験者は成人 21 名である。

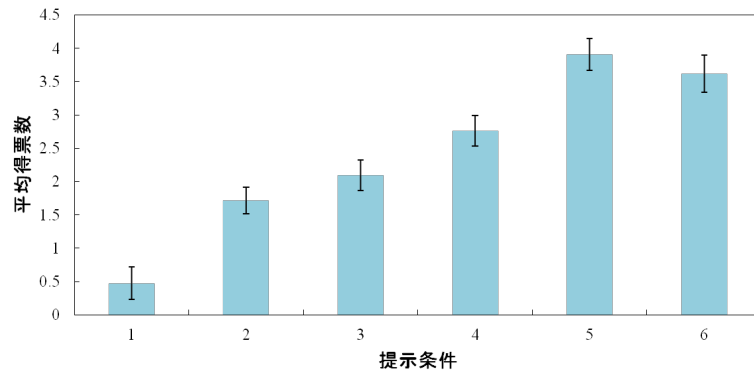


図 4.5 実験 1-2 の平均得票数

表 4.2 実験 1-2 の平均得票数の条件間における有意差

条件	1	2	3	4	5	6
1	-	**	**	**	**	**
2	-	-		**	**	**
3	-	-	-	*	**	**
4	-	-	-	-	**	*
5	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	-

\* $p < 0.05$

\*\* $p < 0.01$

### 実験結果

実験結果を図 4.5 に示す。横軸の番号は条件の番号に対応しており、縦軸は平均得票数と標準誤差を示している。平均得票数は条件 1 が最も小さく 0.4 程度であった。ついで条件 2, 3 の順に大きくなり、それぞれ 1.71, 2.09 であった。最も平均得票数が大きかったのは、条件 5 の 3.90 であったが条件 6 の 3.61 と大きな差は見られなかった。また平均得票数が条件間で有意差があるか検証するため Wilcoxon 符号付順位和検定を行った。有意差を表 4.2 に示す。行と列の数字は条件の番号を示す。\* は有意水準 5% で有意差があることを示し、\*\* は有意水準 1% で有意差があることを示している。条件 (3, 4) と条件 (4, 6) の間に有意水準 5% で有意差があり、条件 (2, 3) と条件 (5, 6) の間には有意差がなかった。また上記の組合せを除くすべての組合せの間に有意水準 1% で有意差があった。

### 4.1.3 実験 1-3

#### 実験目的

実験 1-2 において手の速度を 1/2V ではなく 1/3V にしたときに得票数にどのような影響があるか調査した。実験 1-1 において手の速度が 1/3V の場合と 1/2V の場合では、平均得票数にあまり差はなく有意差もなかったが、手の速度を 1/3V として 1/2V よりも遅い条件で実験 1-2 を行うことで、遅延時の手の速度を小さくした際に遅延時間が重さの知覚に与える影響を調査した。

#### 実験方法

実験 1-2 と同様に、テーブルの上には仮想の立方体があり、仮想の立方体から図の右方向へ移動する仮想のボールがある。被験者はマーカ 2 を把持し、その上に表示されたボールを移動させ、立方体から動くボールに衝突させる。被験者はこの操作を HMD を通して観察しており、2つのボールが衝突した際の提示する映像を制御することで視覚刺激を変化させた。手とマーカ 2 上のボールの移動速度は同じである。提示する手の移動速度は現実の手の移動速度に対して 1/3 倍とし、遅延して提示する時間は実験 1-2 と同様に 6 通りあり、条件 1～条件 6 においてそれぞれ 0.2 秒、0.4 秒、0.6 秒、0.8 秒、1.0 秒、1.2 秒である。被験者にはすべての条件に対して一対比較をさせ 15 組の試行を行わせた。回答方法は実験 3-1 および実験 3-2 と同じであり、1 組の試行ごとに移動するボールを跳ね返す際に移動するボールがより重く感じた条件に得票させた。被験者は成人 17 名である。

#### 実験結果

実験結果を図 4.6 に示す。横軸の番号は条件の番号に対応しており、縦軸は平均得票数と標準誤差を示している。平均得票数は条件 1 が最も小さく 0.1 程度であった。ついで条件 2, 3 の順に大きくなり、それぞれの値は 1.35, 2.58 であった。条件 4～6 は平均得票数がほぼ横ばいになっており、その値は 3.5 程度であった。また条件間で有意差があるか検証するため Wilcoxon 符号付順位和検定を行った。有意差を表 4.3 に示す。行と列の数字は条件の番号を示す。\* は有意水準 5% で有意差があることを示し、\*\* は有意水準 1% で有意差があることを示している。有意水準 1% で有意差が認められたのは、条件 1 と他の条件の組合せおよび条件 2 と他の条件の組合せの間であり、有意水準 5% で有意差が認められたの

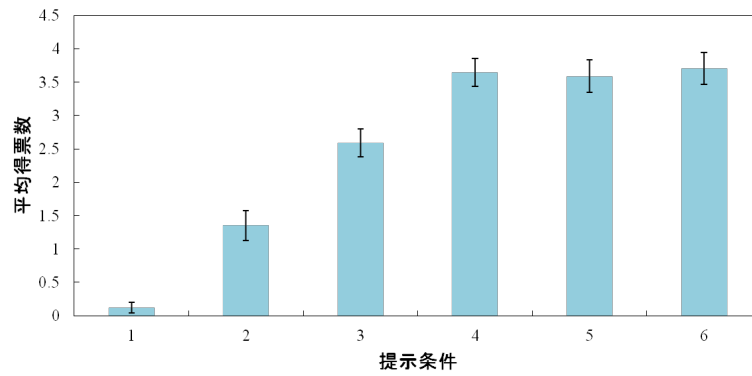


図 4.6 実験 1-3 の平均得票数

表 4.3 実験 1-3 の平均得票数の条件間における有意差

条件	1	2	3	4	5	6
1	-	**	**	**	**	**
2	-	-	**	**	**	**
3	-	-	-	*	*	*
4	-	-	-	-		
5	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	-

\* $p < 0.05$   
 \*\* $p < 0.01$

は、条件 (3, 4), (3, 5), (3, 6) の間である。また条件 (4, 5), (4, 6), (5, 6) の間には有意差がなかった。

## 4.2 実験 2: 擬似触覚を用いた仮想物体の引力提示

### 実験目的

拡張現実感において仮想物体間に引力が働く場合を想定し、擬似触覚を用いて引力の提示が可能か検証する。物体間に働く引力は、仮想物体が磁力を持ち物体同士が引き合う磁力を想定している。被験者には仮想物体同士を近づける動作をするよう指示する。物体間に働く引力を擬似触覚を用いて提示することで、磁力を帯びた積み木などの簡易なアプリケーションのリアリティや操作性の向上に貢献できると考えられる。

### 実験方法

実験風景を図 4.7 に示す。テーブルの上に立方体とボールがあり、被験者はマーカ 2 を把持し、その上に表示されたボールを立方体に向かって移動させ、2つの物体を衝突させる。被験者はこの操作を HMD を通して観察しており、システムでは、HMD に提示する映像を制御することでユーザの視覚刺激を制御した。提示する手の運動速度は、立方体とボールとの距離で決定した。具体的には図 4.8 に示すように、加速の開始地点、速度の変化量の異なる 6 通りである。ボールと立方体の距離を  $x$ mm とし横軸に示し、ボールの移動速度を縦軸に示している。ボールの速度と提示する手の速度は同じであり、ユーザは  $x$  軸の正方向から負方向へボールを動かす。すべての条件において減速開始地点は  $x = 350$  とし、基準速度の提示開始地点は  $x = 275$  である。条件  $a$  での加速開始地点は  $x = 150$  であり、条件  $b$  での加速開始地点は  $x = 100$ 、条件  $c$  での加速開始地点は  $x = 50$  である。条件の番号 1, 2 は加速する際の加速度で区別した、1 は加速度が無限大のもの、2 は加速度が  $450\text{mm}/\text{s}^2$  のものを示している。被験者は成人 28 名である。

まず、被験者には、基準速度  $150\text{mm}/\text{s}$  で動くボールを見せ、マーカ 2 をボールの速度に合わせて動かす動作を十分に繰り返させることで基準速度  $150\text{mm}/\text{s}$  を体感で覚えさせた。その後マーカ 2 上にボールを表示し、スタートラインから立方体まで可能な限り、練習した基準速度  $150\text{mm}/\text{s}$  でマーカ 2 を動かすよう被験者に指示した。ボールはマーカ 2 に固定してあり、ボールと手の移動速度は同じである。ボールがスタートラインから立方体に接触するまでを一回の試行とし、ボールの速度変化によって、引力の知覚に違いが生じるかを検証した。

被験者にはどの条件が提示されているかは知らせずに、異なる二つの条件で試行を交互に行い、強い引力を感じた方を主観評価で回答させた。これを全ての条件の組合せについて行った。全ての組み合わせは 15 組あり、その得票数を調査した。

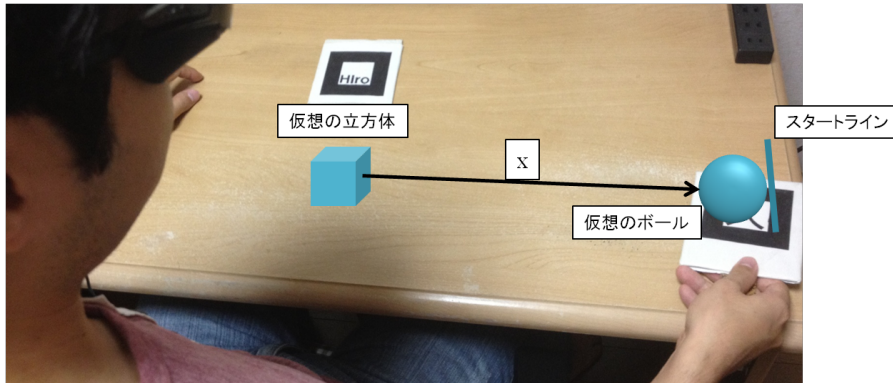


図 4.7 実験 2 の実験風景

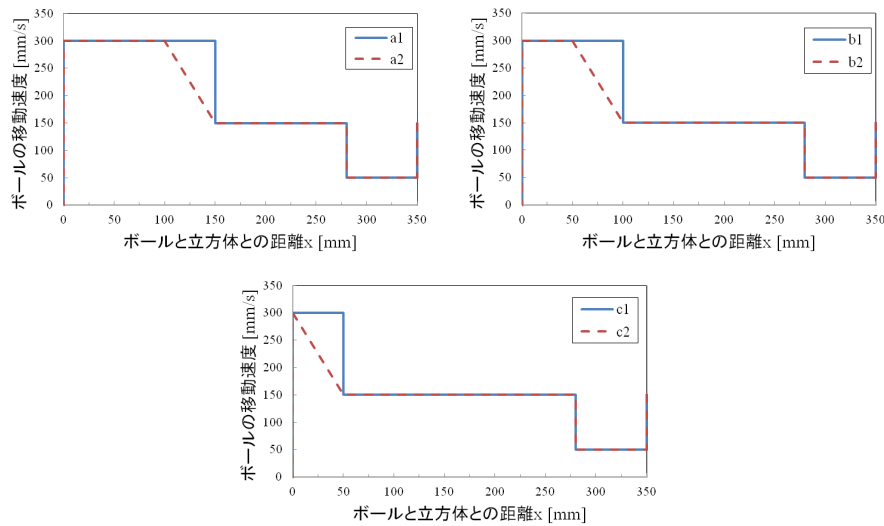


図 4.8 実験 2 におけるボールの速度

### 実験結果

結果を図 4.9 に示す。横軸に速度提示条件を、縦軸に被験者が試行を行った際の得票数の平均値を示し、標準誤差を算出して表示した。平均得票数は全ての条件において約 2-3 の範囲にあり、最も小さいもので条件 c2 の 1.93、最も大きいもので条件 a1 の 2.93 であった。平均得票数について条件間の有意差を Wilcoxon の符号付順位和検定を用いて調査した。有意差を表 4.4 に示す。行と列は条件を示す。\* は有意水準 5% で有意差があることを示し、\*\* は有意水準 1% で有意差があることを示している。条件 (a1, c1), (a1, c2) の間

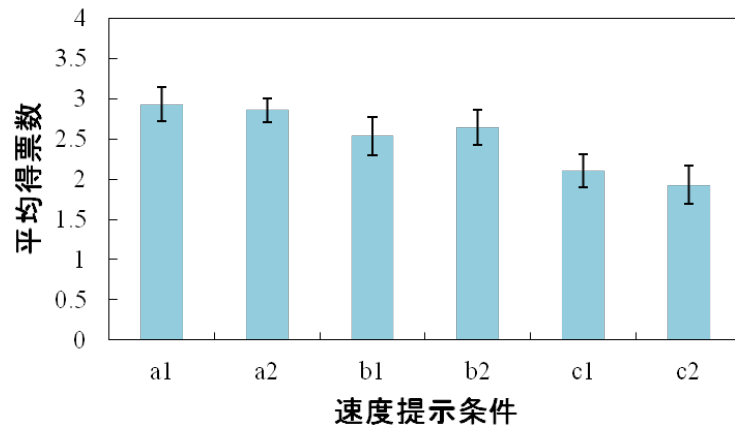


図 4.9 実験 2 の結果

表 4.4 実験 2 の平均得票数の条件間における有意差

条件	a1	a2	b1	b2	c1	c2
a1	-				*	*
a2	-	-			**	**
b1	-	-	-			
b2	-	-	-	-		*
c1	-	-	-	-	-	
c2	-	-	-	-	-	-

\* $p < 0.05$

\*\* $p < 0.01$

に有意水準 1% で有意差が認められ、条件 (a2, c1), (a2, c2), (b2, c2) の間に有意水準 5% で有意差が認められた。

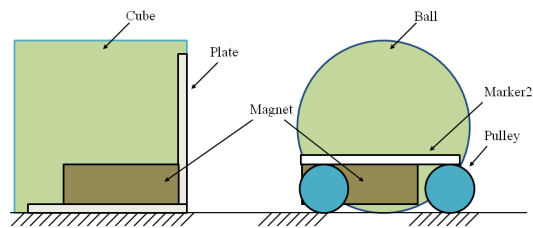


図 4.10 実験 3 の構成図

### 4.3 実験 3:磁石を模した速度制御による引力提示

#### 4.3.1 実験 3-1

##### 実験目的

実際の磁石が引きつき合うときの速度を拡張現実感における仮想物体の速度とした場合に擬似触覚が生起するか検証し、引力の知覚の程度の度合を調査した。磁力による引力を擬似触覚を用いて提示させる場合に実際の物理法則に基づく速度制御の有効性を検証した。被験者には仮想物体同士を近づける動作を行うよう指示し、物体同士が近づく際に手を加速させて提示することで擬似触覚を生起させ引力を提示する。このときに加速させる手の速度を実際の磁石を用いた場合の推定速度に合わせ、実際の磁石を用いた場合と比較させることで擬似触覚による引力の知覚の程度を調査した。

##### 実験方法

図 4.10 に実験の構成を示す。マーカ 2 の裏側に磁石と滑車を取り付けてマーカ 2 が卓上を滑るようにし、立方体右側面に厚さ 2mm のステンレス板を設置した。磁石には、重さ 80g、表面磁束密度 79mT、大きさ  $40 \times 40 \times 10$ mm の異方性フェライト磁石を用いた。被験者は成人 7 名である。被験者には基準速度 100mm/s で動くボールを見せ、マーカ 2 をボールの速度に合わせて動かす動作を十分に繰り返させることで基準速度 100mm/s を体感で覚えさせた。その後マーカ 2 上にボールを表示し、スタートラインから、マーカ 2 を可能な限り、練習した 100mm/s で動かすように指示した。ボールはマーカ 2 に固定しており、ボールと手の移動速度は同じである。ボールがスタートラインから立方体に接触するまでを一回の試行とし、ボールの速度変化によって、引力の知覚に違いが生じるかを検証した。ステンレス板をはさんでボールの向かい側に、磁石がある場合、磁石がない場合に



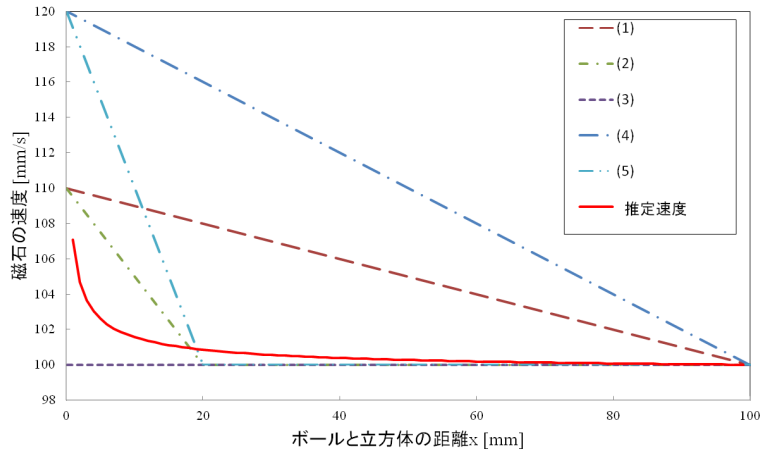


図 4.11 磁石の引力を模したボールの速度

分け、二回の試行を一組の試行とした。磁石のある場合の試行を試行 1、磁石ない場合の試行 2 とした。被験者には、試行 1 を行う際に知覚した引力を 10 として試行 2 で知覚する引力を 0-10 の範囲で回答させると予め伝えた。なお、磁石は立方体に隠れており HMD を通しては視認できず、被験者に磁石の有無を伝えなかった。試行 2 のボールの速度は 5 通りあり、図 4.11 に示す。

ボールと立方体の距離を  $x$  として横軸に示し、提示する磁石の速度を縦軸に示す。条件 1, 2 は運動力学から推定される磁石の速度を近似したものであり、加速開始地点はそれぞれ  $x = 100$ ,  $x = 20$  である。条件 3 はボールの速度を  $100\text{mm/s}$  とし速度を変化させなかった。被験者一人につき 1 組の試行を、各条件において計 5 回行った。

ここで遅延する区間を求めておく。加速して提示するのに要する時間  $t_a$  は、微小な時間  $dt_a$  を考えて

$$dt_a = \frac{dx}{v(x)} = \frac{dx}{ax + b} \quad (4.1)$$

$a$  は磁石の速度の傾き、 $b$  はその切片、 $v(x)$  は磁石の速度である。

$$t_a = \int_0^{x_0} \frac{dx}{ax + b} \quad (4.2)$$

$x_0$  は加速開始地点を示す。式 (4.2) より加速して提示する時間  $t$  が求まる。加速する区間を現実の手が通過する時間と提示する手が通過する時間の差分を  $t_s$  とすると

$$t_s = \frac{x_0}{V_0} - t_a \quad (4.3)$$

表 4.5 実験3の遅延区間

条件	遅延区間 [mm]
条件1	42.2
条件2	8.4
条件4	79.5
条件5	15.9

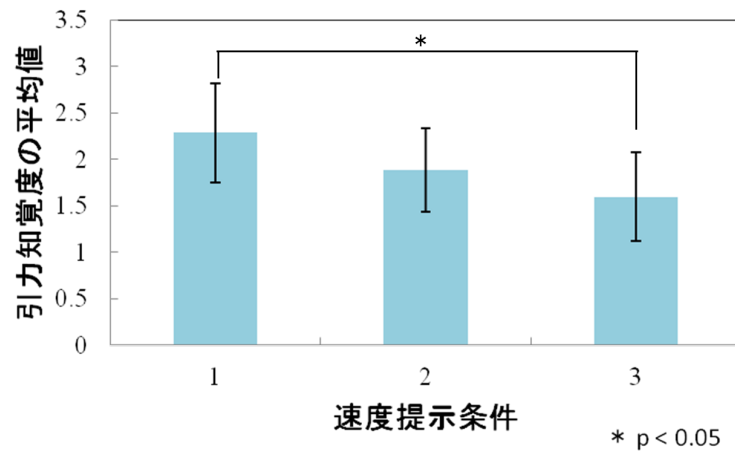


図 4.12 実験3-1の引力知覚度の平均値

と求まる。  $V_0$  は基準速度である。ゆえに減速して提示するときの磁石の速度を  $V_d$  とすると遅延する区間  $x_d$  は

$$t_s = \frac{x_d}{V_d} - \frac{x_d}{V_0} \tag{4.4}$$

を  $x_d$  で整理して

$$x_d = \frac{V_0 \cdot V_d}{V_0 - V_d} \cdot t_s \tag{4.5}$$

と求まる。条件ごとの遅延区間を表4.5に示す。

### 実験結果

実験結果を図4.12に示す。横軸に条件を示し、縦軸に被験者の引力知覚度の平均値と標準誤差を示す。引力知覚度の平均値は条件1-3のいずれの条件においても2.5以下と小さく、各条件で大きな差は見られなかった。それぞれの平均値は条件1が最も大きく2.1、次いで条件2の1.5、条件3が最も小さく1.5であった。また、条件間で有意差があるか検証

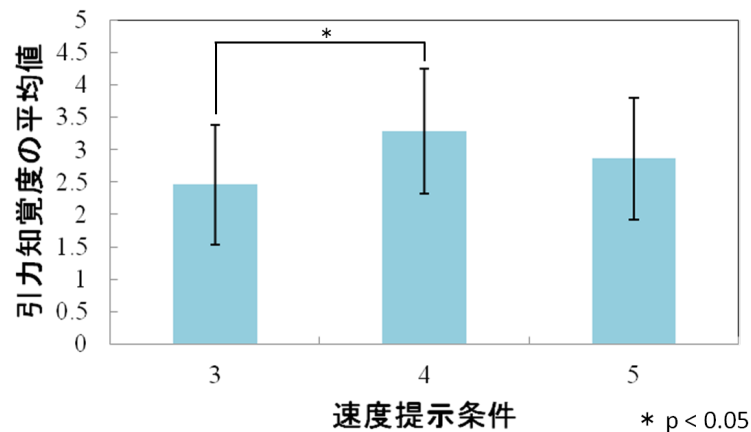


図 4.13 実験 3-2 の引力知覚度の平均値

するために Wilcoxon 符号付順位和検定を行った。検定結果として条件 1-3 の間に有意水準 5% で有意差が認められた。

### 4.3.2 実験 3-2

#### 実験目的

実験 2 において速度の変化量を倍にして速度制御を行うことで、引力の知覚に与える影響を調査した。

#### 実験方法

図 4.12 より、実際の磁石と比較し微弱な引力しか知覚しなかったため追加実験を行った。図 4.11 において、条件 1, 2 の速度勾配を 2 倍にしたものを、それぞれ条件 4, 5 とし、条件 3, 4, 5 において、2-1 と同様の手法で実験を行った。被験者は成人 8 名である。

#### 実験結果

実験結果を図 4.13 に示す。横軸に条件を示し、縦軸に被験者の引力知覚度の平均値と標準誤差を示す。引力知覚度の平均値は条件 3-5 のいずれの条件においても 3.5 以下と小さく、各条件で大きな差は見られなかった。それぞれの平均値は条件 4 が最も大きく 2.8、次いで条件 5 の 2.4、条件 3 が最も小さく 2.1 であった。条件間で有意差があるか検証するた

め Wilcoxon 符号付順位和検定を行った。結果として条件 (4, 3) の間に有意水準 5% で有意差が認められた。

## 第5章 考察

本章では，評価実験の結果に関する考察を行う．

### 5.1 実験1の考察

#### 5.1.1 実験1-1の考察

図4.4，表4.1より条件1～3の平均得票数はほぼ同じであり，条件(1, 2)，(2, 3)に有意差が見られないことから条件1～3における仮想物体の重さの知覚は同程度であると推測できる．また，その他の条件組合せにおいて有意差が見られるとこと，条件3と条件4の平均得票数に大きな差があることから，条件3と条件4を境として仮想物体の重さの知覚が変化すると考えられる．この仮定を確かめ，条件1-6において知覚する重さの程度を調査するため，サーストンの一対比較法による尺度値を求めた．表5.1に実験1の被験者の人数分布を示す．縦軸および横軸は条件を示し，表の中の数値は縦軸の条件と横軸の条件を一対比較した際に横軸の条件に得票した人数を示している．つまり，横軸の条件の方が縦軸の条件より仮想物体を重く感じると回答した人数である．表5.1をもとに一致性の係数  $u$  を求める．一致性の係数は式(5.6)より算出できる．表5.1と式(5.6)から  $u$  を求めると  $u = 0.44$  となり一致性は不確かであった．そこで自由度  $f$  を式(5.7)より求め，カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式(5.8)で求めた．式(5.7)，式(5.8)より  $f = 17.33, \chi_0^2 = 169.23$  となった．

表 5.1 実験1-1の人数分布

	1	2	3	4	5	6
1	-	14	17	18	21	20
2	8	-	16	19	18	18
3	5	6	-	21	19	19
4	4	3	1	-	17	21
5	1	4	3	5	-	15
6	2	4	3	1	7	-

表 5.2 実験 1-1 の標準得点およびサーストンの尺度値

	1	2	3	4	5	6	尺度値
1	-	0.349	0.748	0.908	1.691	1.335	0.983
2	-0.349	-	0.605	1.097	0.908	0.908	0.518
3	-0.748	-0.605	-	1.691	1.097	1.097	0.728
4	-0.908	-1.097	-1.691	-	0.748	1.691	-0.617
5	-1.691	-0.908	-1.097	-0.748	-	0.473	-1.116
6	-1.335	-0.908	-1.097	-1.691	-0.473	-	-1.003

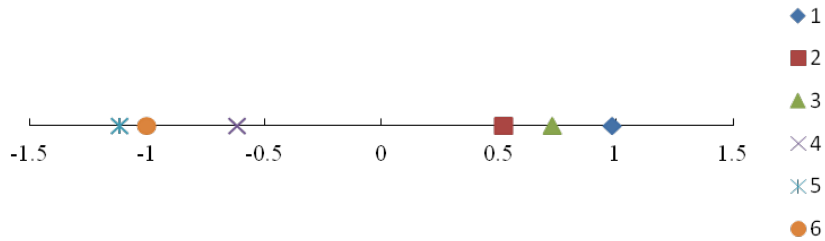


図 5.1 実験 1-1 のサーストン尺度値

カイ二乗値分布表より有意水準 1% における自由度 17 のカイ二乗値は  $\chi^2 = 34.81$  であるので  $\chi_0^2 > \chi^2$  となり, 有意水準 1% で一致性があると言える. 一致性が認められたためサーストンの尺度値を求めた. 表 5.2 に実験結果の標準得点とサーストンの尺度値を示す. 表 5.2 により求めたサーストンの尺度値を図 5.1 に図示した.

図 5.1 より実験の尺度値を比較してみると条件 3 と条件 4 の間に大きな差があることがわかる. これは条件 4 に対して条件 3 がボール重みをより大きく被験者に知覚させたことを示している. 実際に表 5.1 から条件 3 と条件 4 を一対比較させた結果を見てみると, 条件 4 に得票した人数が 1 人であるのに対し条件 3 に得票した人数は 22 人である. 以上のことから条件 4 に対して条件 3 はボールの重みをより大きく知覚させるのに有効であるといえる.

また, 図 5.1 より条件 1,2,3 の尺度値は近い値を示しているが, 提示する手が実際の手に対し遅延する最大距離が各条件につき異なる. 例えば条件 1 では遅延する際の手の移動速度を一定とすると, 最大遅延距離は  $(V - 1/6V) \cdot 0.6 = 1/2V\text{mm}$  となる. 同様に最大遅

表 5.3 実験 1-2 の人数分布

	1	2	3	4	5	6
1	-	1	3	2	3	1
2	20	-	3	6	2	5
3	18	18	-	4	2	4
4	19	15	17	-	8	3
5	18	19	19	13	-	14
6	20	16	17	18	7	-

延距離を求めると条件 2 では  $2/5Vmm$ ，条件 3 では  $3/10Vmm$  となる．ゆえに条件 1-3 において条件 3 は最大遅延距離が最小である．一方で得票数について図??より条件 1-3 は得票数の平均値についても大きな差が認められない．実際に表??より条件 (1, 2)，条件 (1, 3)，条件 (2, 3) 間のいずれにおいても有意差がなく，条件 1-3 の平均得票数に有意差はない．ゆえに，6 条件の中でボールの重みを大きく知覚させ，かつ最大遅延距離が最小値をとりうる条件は条件 3 であると考えられる．つまり，提示する手の位置が実際の手とずれが小さく効果的にボールの重みを提示できる条件は条件 3 である．

また条件 3 と条件 4 の知覚の度合に大きな差があることから，提示する手が実際の手の手速度の  $1/2-2/3$  倍で移動する際に擬似触覚の知覚に大きく影響を与える閾値が存在する可能性があると考えられる．

### 5.1.2 実験 1-2 の考察

実験 1-2 において被験者の判断に一致性があるか検証するために一致性の係数  $u$  を求めたところ， $u = 0.472$  となり一致性は不確かであった．そこで，自由度  $f$  を式 (5.7) より求め，カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式 (5.8) で求めた．式 (5.7)，式 (5.8) より  $f = 17.93, \chi_0^2 = 153.30$  となった．カイ二乗分布表より有意水準 1% における自由度 18 のカイ二乗値  $\chi^2 = 34.81$  であるので  $\chi_0^2 > \chi^2$  となり，有意水準 1% で一致性があると言える．一致性が認められたためサーストンの尺度値を求めた．表 5.3 に実験結果の人数の分布を示す．縦軸および横軸は条件を示し，表の中の数値は縦軸の条件と横軸の条件を一対比較した際に横軸に得票した人数を示している．表 5.4 に実験結果の標準得点とサーストンの尺度値を示す．表 5.4 により求めたサーストンの尺度値を図 5.2 に図示した．

図 5.2 より実験の尺度値は条件 5,6 が 0.8 付近であり最も大きく，次いで条件 4 が 0.2 付近，条件 2, 3 が -0.2 付近，最後が条件 1 の約 -1.3 と最も小さい．このことは条件 5, 6 が

表 5.4 実験 1-2 の標準得点およびサーストンの尺度値

	1	2	3	4	5	6	尺度値
1	-	-1.668	-1.068	-1.309	-1.068	-1.668	-1.356
2	1.668	-	-1.068	-0.566	-1.309	-0.712	-0.397
3	1.067	1.068	-	-0.876	-1.309	-0.876	-0.185
4	1.309	0.566	0.876	-	-0.303	-1.068	0.276
5	1.068	1.309	1.309	0.303	-	0.4307	0.884
6	1.668	0.712	0.876	1.066	-0.431	-	0.779

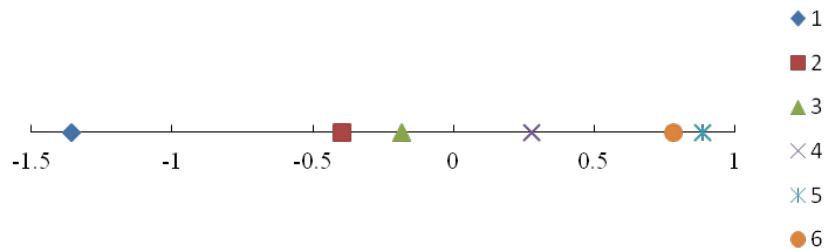


図 5.2 実験 1-2 のサーストン尺度値

他の条件と比較して仮想物体をより重く知覚させやすいことを示している。実際に表 5.3 を見てみると、条件 5 と条件 1, 4 を一対比較させたときに条件 5 に得票した人数はそれぞれ 18, 19, 19 人であり、各組において被験者数 8 割を超えていることがわかる。同様に条件 6 と条件 1, 2 を一対比較したときの条件 6 に得票した人数を見てみると、それぞれ 20, 16, 17 人であり各組について被験者数の 7 割を超えており、3 組を合わせた全得票数のうち 8 割を超える得票を条件 6 が得ていることがわかる。以上のことから条件 5, 6 は他の条件と比較してボールの重みをより大きく知覚させるのに有効であるといえる。また、図 5.2 より条件 5, 6 の尺度値は近い値を示しているが、提示する手が実際の手に対し遅延する最大距離が条件につき異なる。例えば条件 5 では遅延する際の手移動速度を一定であり遅延時間が 1.0s なので、最大遅延距離は  $(V - 1/2V) \cdot 1.0 = 0.50Vmm$  となる。同様に条件 6 に対しても最大遅延距離を求めると条件 6 では遅延時間が 1.2s なので  $0.60Vmm$  となり、条件 5 よりも最大遅延距離が大きい。一方、得票数について図 4.5 より条件 5, 6 は得票数の平均値についても大きな差が認められない。実際に表 4.2 より条件 (5, 6) の間に有意



表 5.5 実験 1-3 の人数分布

	1	2	3	4	5	6
1	-	1	1	0	0	0
2	16	-	3	1	2	1
3	16	14	-	4	5	5
4	17	16	13	-	8	8
5	17	15	12	9	-	8
6	17	16	12	9	9	-

差がなく、条件 (5, 6) の平均得票数に有意差はない。以上により、6 条件の中で仮想物体を最も重く知覚させ、かつ最大遅延距離が小さい条件は条件 5 であると考えられる。つまり、提示する手の位置が実際の手とずれが小さく効果的にボールの重みを提示できる条件は条件 5 である。また表 4.2 より、条件 (3, 4)、条件 (5, 6) を除く他の条件間において有意差が見られたことや、図 5.2 から尺度値に条件 (1, 2)、条件 (3, 4)、条件 (4, 6) 間に大きな差が見られたことから、遅延時間が 0.2~0.4 秒、0.6~0.8 秒、0.6~1.0 秒の間に閾値があり、閾値を境として擬似触覚による物体の重みの知覚は急激に増大する考えられる。

### 5.1.3 実験 1-3 の考察

実験 1-1, 1-2 と同様にサーストンの尺度値を求めた。一致性の係数  $u$  を求めたところ、 $u = 0.486$  となり一致性は不確かであった。そこで、自由度  $f$  を式 (5.7) より求め、カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式 (5.8) で求めた。式 (5.7)、式 (5.8) より  $f = 18.13, \chi_0^2 = 150.4$  となった。カイ二乗分布表より有意水準 1% における自由度 19 のカイ二乗値は  $\chi^2 = 36.19$  であるので  $\chi_0^2 > \chi^2$  となり、有意水準 1% で一致性があると言える。一致性が認められたためサーストンの尺度値を求めた。表 5.5 に実験結果の人数の分布を示す。縦軸および横軸は条件を示し、表の中の数値は縦軸の条件と横軸の条件を一对比較した際に横軸に得票した人数を示している。

表 5.5 より、条件 1 と他の条件を一对比較した際に、他の条件に得票させた人がほとんどであることがわかる。条件の組み合わせ (1, 2)、(1, 3) において条件 2, 3 に得票したのは各一人ずつであった。このことから条件 1 は他の条件よりも重量知覚が小さいと言える。また、サーストン法において選択率が 0, 1 であるものは尺度値が求められないため、人数分布に完全な偏りがある条件 1 を除外してサーストンの尺度値を求めた。表 5.6 に条件 1 を除いた実験結果の標準得点とサーストンの尺度値を示す。表 5.6 により求めたサーストンの

表 5.6 実験 1-3 の標準得点およびサーストンの尺度値

	2	3	4	5	6	尺度値
2	-	-0.929	-1.565	-1.187	-1.565	-1.311
3	0.929	-	-0.722	-0.541	-0.541	-0.219
4	1.565	0.722	-	-0.074	-0.074	0.535
5	1.187	0.541	0.074	-	-0.074	0.432
6	1.565	0.541	0.074	0.074	-	0.563

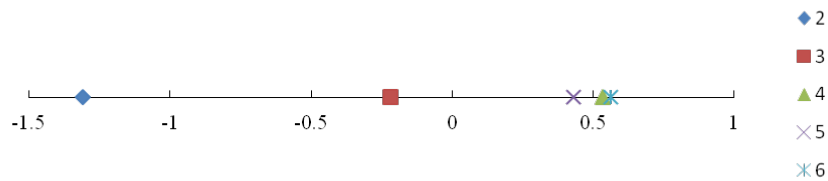


図 5.3 実験 1-3 のサーストン尺度値

尺度値を図 5.3 に図示した。表 5.6, 図 5.3 よりそれぞれの尺度値を見てみると, 条件 4, 5, 6 が最も大きく 0.5 付近であり, 次いで条件 3 の -0.2, 一番小さい尺度値は条件 2 の -1.3 であった。条件 4, 5, 6 の尺度値にはほとんど差がなく, 条件 5, 3 の間および条件 2, 3 の間には尺度値に大きな差があることがわかる。このことから, 条件 4, 5, 6 では仮想物体の重さはほぼ等しく知覚され, 条件 3 ではより軽く, 条件 2 では最も軽く知覚されたといえる。また, 条件 1 は他の条件と比較して得票数が最も少なかったため, 条件 2 よりも弱く知覚されたと考えられる。条件 4, 5, 6 の尺度値は近い値を示し仮想物体の重さの知覚の大きさもほぼ等しいと考えられるが, 一方で提示する手が実際の手に対し遅延する最大遅延距離が条件につき異なる。条件 4, 5, 6 の遅延時間はそれぞれ 0.8, 1.0, 1.2 であり, 3 条件の中では条件 4 が最も遅延時間が小さい。各条件につき最大遅延距離を求める。遅延する際の手移動速度を一定とすると条件 4 における最大遅延距離は  $(V - 1/3V) \cdot 0.8 = 0.53V$  となる。同様に条件 5, 6 の最大遅延距離を算出するとそれぞれ  $0.67V$ ,  $0.80V$  となる。以上により, 仮想ボールのより重く知覚させかつ実際の手に対し提示する手の遅延距離が小さい条件は条件 4 である。つまり遅延するときの手を  $1/3V$  のとき遅延する時間を 0.8s としたときに仮想物体の重さを効果的に提示できると考えられる。この結果実験 1-2 と異なる

表 5.7 現実の手に対する提示する手の最大遅延距離

遅延時間 [s]	提示速度	提示速度
	1/2V	1/3V
0.2	0.1V	0.13V
0.4	0.2V	0.27V
0.6	0.3V	0.40V
0.8	0.4V	0.53V
1.0	0.5V	0.67V
1.2	0.6V	0.80V

るものであり、最適だと考えられる遅延時間は実験 1-2 の結果に対して 0.2s 短くなっている。実験 1-2, 実験 1-3 において効果的と思われる各条件に対して、遅延する際の手の移動速度を一定として手の最大遅延距離を求めるとそれぞれ 0.50V, 0.53V となった。これにより最大遅延距離と最適な条件には何らかの関係がある可能性があると考えられる。

#### 5.1.4 実験 1 のまとめ

実験 1-1, 実験 1-2 のからそれぞれ、条件 3, 条件 4 が最も仮想物体の重さを効果的に知覚させる条件であることが分かった。つまり、遅延して提示する手の速度は実際の手の速度を  $V$  として  $1/2V$ , 遅延して提示する時間は 1.0s の条件のとき仮想物体の重量は効果的に知覚されると考えられる。一方、実験 1-3 では実験 1-2 における遅延するときの手の速度を  $1/2V$  よりさらに遅い  $1/3V$  として実験を行った。その結果として遅延するときの手の速度が  $1/3V$  であるとき、効果的に仮想物体の重さを知覚させる遅延時間は 0.8s であることがわかった。実験 1-2 と実験 1-3 で最適と思われる条件において、実際の手に対して提示する手が遅延する最大距離はそれぞれ 0.50V, 0.53V であり値が近いといえる。遅延するときの手の速度と遅延時間に対して最大遅延距離を求め、表 5.7 に示した。表 5.7 から実験 1-2 の遅延時間 1.0s における最大遅延距離と最も値が近い条件は、実験 1-3 において遅延時間 0.8s であることがわかる。本実験においては、提示する手の最大遅延距離が 0.5V の値に近いほど効果的に重量を知覚できたといえるが、それが普遍性をもつかは、遅延時に提示する手の速度を変更してさらに実験を行う必要があると考える。

表 5.8 実験2における人の数

	a1	a2	b1	b2	c1	c2
a1	-	13	17	17	16	19
a2	15	-	14	14	21	16
b1	11	14	-	15	15	16
b2	11	14	13	-	17	19
c1	12	7	13	11	-	16
c2	9	12	12	9	12	-

## 5.2 実験2の考察

図 4.9 より, 有意水準 5% で条件 (a1, c1), (a1, c2), (a2, c1) および条件 (a2, c2) の間に有意差があることや, 条件 (b2, c2) の間においても有意差があることがわかる. 手が加速して提示される区間が長い条件 a と加速して提示される区間が短い条件 c の間に有意差があることから, 手が加速して表示される区間が長い場合は短い場合と比較してユーザにより強い引力を知覚させる傾向にあると言える. しかし平均得票数について考慮すると, 全ての条件において約 2~3 であり, 知覚する引力の強さが条件間でどの程度異なるかが分かりにくい. そこで知覚する引力の大きさを尺度値で求めるため, サーストンの一対比較法により実験2の結果を分析した. 表 5.8 に実験2の結果の被験者分布を示す. 縦軸および横軸は条件を示し, 表の中の数値は縦軸の条件と横軸の条件を一対比較した際に横軸に得票した人数を示している.

まず被験者の判断に一致性があるか検証するため一致性の係数  $u$  を求めた表 5.1 と式 (5.6) から  $u$  を求めると  $u = 0.014$  となり一致性は不確かであった. そこで自由度  $f$  を式 (5.7) より求め, カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式 (5.8) で求めた. 求めた結果  $f = 16.775, \chi_0^2 = 22.929$  となった. カイ二乗分布表より有意水準 5% における自由度 16 のカイ二乗値は  $\chi^2 = 26.30$  であるので  $\chi^2 > \chi_0^2$  となり, 一致性はないと言える.

そこで, 被験者が首尾一貫した判断をしているか一意性の検定を行った. 式 (5.2) により各被験者の一意性の係数  $\zeta$  を求めた.  $\zeta \geq 0.25$  の人数は 21 人となり,  $\zeta \geq 0.25$  である被験者の一意性の係数  $u$  を求めたところ  $u = 0.0286$  となり一致性は不確かであった. そこで自由度  $f$  を式 (5.7) より求め, カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式 (5.8) で求めた. 式 (5.7), 式 (5.8) より  $f = 17.452, \chi_0^2 = 26.925$  となった. カイ二乗分布表より有意水準 5% における自由度 17 のカイ二乗値  $\chi^2 = 26.925$  であるので  $\chi^2 > \chi_0^2$  となり, 一意性はないと言える. さらに一

表 5.9  $\zeta \geq 0.50$  の人の数

	a1	a2	b1	b2	c1	c2
a1	-	6	8	11	9	10
a2	8	-	5	7	12	10
b1	6	9	-	9	8	9
b2	3	7	5	-	11	10
c1	5	2	6	3	-	9
c2	4	4	5	4	5	-

表 5.10 実験 2 の標準得点およびサーストンの尺度値

	a1	a2	b1	b2	c1	c2	尺度値
a1	-	-0.180	0.180	0.792	0.366	0.566	0.345
a2	0.180	-	-0.366	$-1.392 \cdot 10^{-16}$	1.067	0.566	0.289
b1	-0.180	0.366	-	0.366	0.180	0.366	0.220
b2	-0.792	$-1.392 \cdot 10^{-16}$	-0.366	-	0.791	0.566	0.040
c1	-0.366	-1.0677	-0.180	-0.791	-	0.366	-0.408
c2	-0.566	-0.566	-0.366	-0.565	-0.366	-	-0.486

意性の条件を  $\zeta \geq 0.50$  として同様に検定を行った。  $\zeta \geq 0.50$  の人数を求めると 14 人となり、実験結果における  $\zeta \geq 0.50$  である被験者の分布を表 5.9 に示す。縦軸および横軸は条件を示し、表の中の数値は縦軸の条件と横軸の条件を一对比較した際に横軸に得票した人数を示している。表 5.9 をもとに  $\zeta \geq 0.5$  である被験者の一貫性の係数  $u$  を求めたところ  $u = 0.0799$  となり一貫性は不確かであった。そこで自由度  $f$  を式 (5.7) より求め、カイ二乗値  $\chi_0^2$  を式 (5.8) で求めた。求めた値は  $f = 18.958, \chi_0^2 = 37.125$  となった。カイ二乗分布表より有意水準 5% における自由度 18 のカイ二乗値は  $\chi^2 = 28.87$  であるので  $\chi_0^2 > \chi^2$  となり有意水準 5% で一致があると言える。そこで  $\zeta \geq 0.50$  の被験者に対してサーストンの尺度値を求めた。実験 2 における  $\zeta \geq 0.50$  であった被験者の標準得点とサーストンの尺度値を表 5.10 に示す。

表 5.10 で求めた尺度値を図 5.4 に図示した。

表 5.10 と図 5.4 より、尺度値が最も大きいものは条件 a1 の 0.345、最も小さいもので条件 c2 の -0.486 であった。条件 a1, a2 および b1 の尺度値にあまり差はなく約 0.22~0.35 付近であり、条件 b2 は 0.040 となった。条件 c1 および c2 も尺度値にあまり差はなく -0.45 付

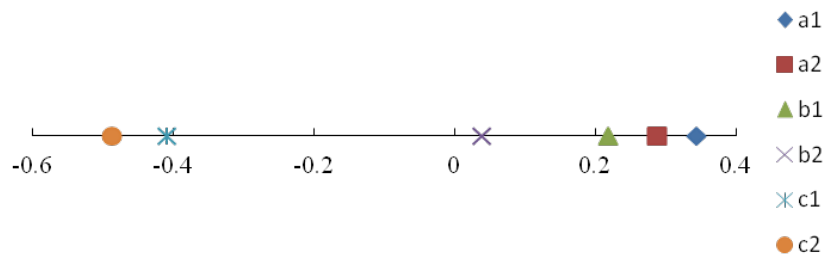


図 5.4 実験 2 のサーストン尺度値

近となった。このことから条件 a1, a2, b1 はほぼ同じ引力を知覚させ、その力は 6 条件において最も強いと言える。次いで知覚させる引力が大きい条件は条件 b2 であり、最も引力を知覚させない条件は条件 c1 と条件 c2 であると考えられる。

この結果は図 4.9 や表 4.4 の結果とも合致しているが、サーストンの尺度値に関しては一致性の係数  $u$  は  $u = 0.0799$  と非常に小さいため精度が低い可能性があると考えられる。この原因として被験者が一定の基準速度で手を動かすことが困難であったことや、減速時に生起する擬似触覚によって加速時の擬似触覚を正確に判断できなかったことなどが考えられる。また実験 1 の結果と比較して条件間で平均得票数に有意差があるものが少ないことから被験者が引力を知覚しにくかったと考えられる。実際に一対比較時に判断がしにくかったとの回答が被験者から多く得られた。

### 5.3 実験 3 の考察

図 4.12 より、引力知覚度の平均値は条件 1~3 のいずれの条件においても 2.5 以下と小さく、本実験における磁石を模した速度制御の引力提示に関する有効性は示せなかった。しかし速度制御を行わなかった条件 3 と加速して提示される区間が長い条件 1 との間に有意水準 5% で有意差があったことから、条件 1 は条件 3 に対して引力を知覚させやすいと言える。また、速度勾配を倍にして行った実験において、図 4.13 より、条件 3-5 いずれの条件においても引力知覚度の平均値は 3.5 を下回っており、速度勾配を倍にしても磁石ほどの引力を提示ができなかったと言える。しかし、条件と条件 4 の間に有意差が見られたことから、条件 4 は条件 3 よりも引力を知覚させやすいと言える。以上より、条件 1,4 が条件

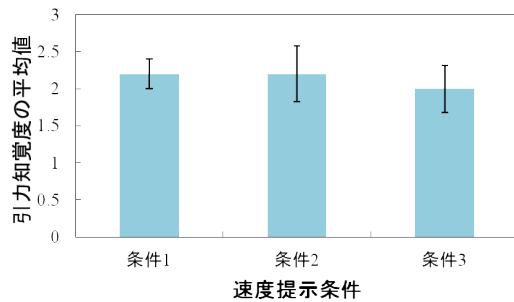


図 5.5 被験者 A の実験 3 の結果

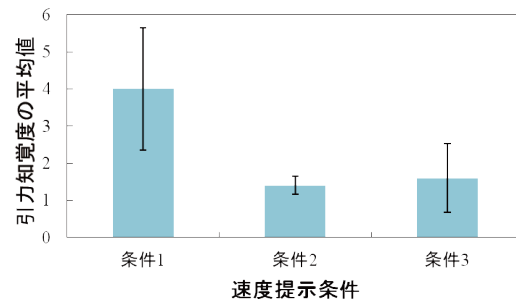


図 5.6 被験者 B の実験 3 の結果

3 に対して引力知覚の平均値が大きく、条件間で知覚度の平均値に有意差があることから、引力の知覚は加速度勾配よりも加速する区間に依存する可能性があると考えられる。

また本実験結果において被験者の引力知覚に大きな違いが生じた。例として被験者 A、被験者 B の実験 3-1 の実験結果を図 5.5、図 5.6 に示す。両被験者の結果を見てみると被験者 A は平均得票数が条件 1~3 において 2 程度あり、条件 3 が条件 1 や条件 2 に比べてやや少ない。これに対し、被験者 B の結果は条件 1 の平均得票数が最も大きく、それに次いで、条件 3、条件 4 の順に大きかった。条件 1 平均得票数が大きい条件 1 においても標準誤差も非常に大きいことから、手の動かし方や操作への慣れが影響していると考えられる。被験者の間に引力知覚度に関してばらつきがみられたため、今後はこのばらつきを低減するため、個人の知覚の度合いを考慮した指標や試行時の操作への慣れを考慮する必要があると考える。

## サーストンの一対比較法

以下にサーストンの一対比較法による計算式を示す [41][42]. 一巡三角形の個数  $d$  は式 (5.1) で表される.

$$d = \frac{1}{6}k(k-1)(k-2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k a_i(a_i-1) \quad (5.1)$$

$k$  は資料数を示し,  $a_i$  は資料  $i$  に得票した人数の合計を示す.

一意性の係数  $\zeta$  は式 (5.2) で表される.

$$\zeta = 1 - \frac{24d}{k^3 - 4k} \quad (5.2)$$

自由度  $f$  は式 (5.3) で表される.

$$f = \frac{k(k-1)(k-2)}{(k-4)^2} \quad (5.3)$$

カイ二乗値  $\chi_0^2$  は式 (5.4) で表される.

$$\chi_0^2 = \frac{8}{k-4} \left\{ \frac{k(k-1)(k-2)}{24} - d + \frac{1}{2} \right\} + f \quad (5.4)$$

一致性の総判断数  $m$  は式 (5.5) で表される.

$$m = {}_n C_2 \cdot k C_2 + \sum_{j>i} a_{ij}^2 - n \sum_{j>i} a_{ij} \quad (5.5)$$

$a_{ij}$  は資料  $i, j$  を比較した際に条件  $i$  の方に得票した人数である.

一致性の係数  $u$  は式 (5.6) で表される.

$$u = \frac{2m}{{}_n C_2 \cdot k C_2} - 1 \quad (5.6)$$

一致性の自由度  $f$  は式 (5.7) で表される.

$$f = {}_k C_2 \frac{n(n-1)}{(n-2)^2} \quad (5.7)$$

カイ二乗値  $\chi_0^2$  は式 (5.8) で表される.

$$\chi_0^2 = \frac{4}{n-2} \left\{ m - \frac{1}{2} {}_n C_2 \cdot k C_2 \frac{n-3}{n-2} \right\} \quad (5.8)$$



## 第6章 結論

### 6.1 結論

本研究では、拡張現実感における仮想物体の操作においてより直感的なインタラクションを実現することを目的とし、擬似触覚を用いてユーザに力覚フィードバックを提示する手法について被験者実験を行った。擬似触覚の生起させる手段として、リアルタイムで撮影した映像をバッファリングし、再生速度を速めたり遅くしたりすることで手の速度制御を行った。力覚フィードバックの例として仮想物体の重量知覚と仮想物体間に働く引力について調査し、磁石を模した速度を行った際の引力の知覚についても調査を行った。

仮想物体の重量知覚に関する実験1において、仮想物体衝突後の遅延する手の速度や遅延時間を変更することで条件の対比較を行わせた。平均得票数を求めた結果、本実験環境下において遅延するときの手の速度が現実の手の1/2倍であり、遅延時間が1.0sのときに効果的に物体の重量を知覚させることが知見として得られた。また重量知覚に関しサーストンの尺度値を算出した。実験1-1において、遅延時における手の速度が1/2倍の条件である条件の尺度値は他の条件と比較して2番目に大きかった。また実験1-2において、遅延時間が1.0sである条件の尺度値は最も大きかった。以上によりサーストンの尺度値に関しても、現実の手と提示する手の位置のずれを小さくし効果的に重量を知覚させる条件は前述の条件であると言える。しかし本条件の普遍性を検証するには、仮想物体の大きさ・色・移動速度などの他の条件に関し実験を行う必要がある。

また仮想物体間に働く引力知覚に関する実験2において、加速の開始地点や速度変化量が異なる条件に分け、条件を対比較させた。結果として、加速して提示する距離が小さい条件と他の条件間にのみ有意差があった。加速して提示する距離が大きいほど強い引力を知覚するかどうか検証するためサーストンの尺度値を求めた。一意性の係数が高い被験者の実験結果を抽出して尺度値を求めた結果、加速して提示する距離が大きいほど強い引力を知覚する傾向が見られた。しかし一致性の係数が小さく一意性のあると判断された人数も少ないことから、尺度値に関してはより多くの被験者実験をする必要があると考える。

磁石を模した速度制御に関する実験3においては、引力知覚度の平均値に関して個人差

が非常に大きかった。速度変化なしの条件と加速して提示される区間が長い条件の間に有意差があったことから、擬似触覚は生起していると考えられる。しかし引力知覚度の平均値にあまり差がなく、実際の磁力と比較して知覚度が非常に小さいことから、実際の磁石の引力をうまく提示できなかつたと考えられる。

以上のことから、拡張現実感においても擬似触覚は生起したため、提案手法によって力覚フィードバックを提示できると考えられる。しかし、実験3の結果より実際の磁石の引力提示が困難であったことから現実の物理法則に基づく速度制御が必ずしも有効であるとは言えない。また実験1の結果から、提示する手の速度が小さく遅延時間も長いほど大きな力を提示できるとは言えないことから、提案手法によって提示できる力覚フィードバックの大きさに限りがあると考えられる。一方で手の移動方向と知覚する力の向きについては、手の移動方向と同方向の力よりも逆方向の力を知覚しやすい傾向がみられた。

## 6.2 今後の課題

減速時や加速時における現実の手と提示する手の位置の違いをなるべく小さくし、バッファリングの前後において位置の整合性をいかに自然に保つかが今後の課題として挙げられる。位置の違いを小さくすることは仮想物体を手で操作する際の操作性の向上繋がり、位置の整合性を自然に保つことは意図しない加速・遅延による擬似触覚の生起を避けて意図した力覚フィードバックを提示する上で重要だと考える。具体的には、重量知覚に関しては手の加速時における擬似触覚の生起を避け、引力提示に関しては減速時における影響を避けることなどが考えられる。また重量提示に関し本研究で求められた条件で知覚される重量を調査することや、引力提示に関し遅延時の影響を可能な限り除いた上で知覚度を調査する必要があると考える。さらに本研究を通して、得票数や知覚度に個人差によるばらつきみられたことから個人によって最適な条件が異なる可能性がある。このことからユーザごとにキャリブレーションを行い、年代・性別による知覚の違いについて調査した結果をシステムに反映させることで、より精度の高い力覚フィードバックの提示が可能になると考える。

## 謝辞

本研究や大学院修士課程において、多くのご指導・ご鞭撻をしていただきました東京大学の小川剛史准教授に心より感謝いたします。学会発表の機会を与えてくださり、有意義な時間が過ごせましたことを深く感謝しております。また貴重なお時間を割いてミーティングを行い、多くのご助言与えてくださった東京大学の若原恭教授，中山雅哉准教授，関谷勇司准教授，妙中雄三助教，宮本大輔助教に心より感謝いたします。本論を執筆する際も大変お世話になりました。

修士課程を過ごす中で、研究室の人数も増え多くの先輩・同期・後輩に恵まれて研究生活が送れましたことをうれしく思います。生活面においては一時辛い時期もありましたが、小川准教授をはじめ、心やさしい同期や先輩・後輩のご理解や支えがあったからこそ乗り切ることができました。心より深く感謝しております。

最後に、長い学生生活を献身的に支えてくれた両親や妹にこの場をお借りして感謝の意を表したいと思います。

## 発表文献

### 国内会議 (査読あり)

1. 大塚 隆史, 小川 剛史. “拡張現実感における擬似触覚を用いた力覚フィードバックの実現に関する検討”, VR 学研報, (Dec. 2012).

### 国内会議 (査読なし)

1. 大塚 隆史, 小川 剛史. “拡張現実感における擬似触覚を用いた引力提示に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.112, no.221, pp.109-114, 2012.
2. 大塚 隆史, 小川 剛史. “拡張現実感における擬似触覚を用いた仮想物体の重量知覚に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, (Mar.2013, to appear).

## 参考文献

- [1] Ronald T. Azuma. A survey of augmented reality. *Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] ARToolKit (<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>).
- [3] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, and Laurent Etienne. Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures. In *CHI '04 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 239–246, 2010.
- [4] Taku Hachisu, Gabriel Cirio, and Maud Marchal. Pseudo-haptic feedback augmented with visual and tactile vibrations. In *IEEE International Symposium on VR Innovation*, pp. 327–328, 2011.
- [5] Lionel Dominjon, Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Paul Richard, and Simon Richir. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Virtual Reality*, 2005.
- [6] Andreas Pusch, Olivier Martin, and Sabine Coquillart. Hemp-hand-displacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 59–66, 2008.
- [7] D.W.F van Krevelen and R.Poelman. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. In *The International Journal of Virtual Reality*, 2010.
- [8] Feng Zhou, Henry Been-Lirn Duh, and Mark Billinghurst. Trends in augmented reality tracking, interaction and display:a review of ten years of ismar. *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 193–202, 2008.

- [9] Shang Ping Lee, Adrian David Cheok, Teh Keng Soon James, Goh Pae Lyn Debra, Chio Wen Jie, Wang Chuang, and Farzam Farbiz. A mobile pet wearable computer and mixed reality system for human-poultry interaction through the internet. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 10, No. 5, pp. 301–317, 2006.
- [10] Phattanapon Rhienmora, Kugamoorthy Gajananan, Peter Haddawy, Siriwan Suebnukarn, Matthew N. Dailey, Ekarin Supataratarn, and Poonam Shrestha. Haptic augmented reality dental trainer with automatic performance assessment. In *Proceedings of the 15th international conference on Intelligent user interfaces*, 2010.
- [11] 中小路久美代, 山本恭裕, 小池康晴. 擬似触覚を利用した重みのコミュニケーションのためのビジュアルインタラクションデザイン. 情報処理学会研究報告, pp. 1–6, 2010.
- [12] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality*, 1999.
- [13] NyARToolKit project (<http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/>).
- [14] Processing (<http://processing.org/>).
- [15] Taehee Lee and Tobias Höllerer. Handy ar: Markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking. In *11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 83–90, 2007.
- [16] Taehee Lee and Tobias Höllerer. Hybrid feature tracking and user interaction for markerless augmented reality. In *IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 145–152, 2008.
- [17] Georg Klein and David Murray. Parallel tracking and mapping for small ar workspaces. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 225–234, 2007.
- [18] Byung-sung Lee and Junchul Chun. Manipulation of virtual objects in marker-less ar system by fingertip tracking and hand gesture recognition. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences: Information Technology, Culture and Human*, pp. 1110–1115, 2009.

- [19] Soumita Ghosh, Jianmin Zheng, Wenyu Chen, Jane Zhang, and Yiyu Cai. Real-time 3d markerless multiple hand detection and tracking for human computer interaction applications. In *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, pp. 323–330, 2010.
- [20] 吉田悠一. 高速特定物体認識手法を用いたモバイルデバイスでのリアルタイム ar. 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol. 2011, No. 3, pp. 75–82, 2011.
- [21] Dzmitry Tsetserukou and Susumu Tachi Katsunari Sato. Exointerfaces: Novel exoskeleton haptic interfaces for virtual reality, augmented sport and rehabilitation. In *AH '10 Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference Article No. 1*, 2010.
- [22] Matt Adcock, Matthew Hutchins, and Chris Gunn. Fingertips: gesture based direct manipulation in augmented reality. In *Haptic collaboration with augmented reality*, p. 41, 2004.
- [23] Ernst Kruijff, Dieter Schmalstieg, and Steffi Beckhaus. Using neuromuscular electrical stimulation for pseudo-haptic feedback. In *VRST '06 Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 316–319, 2006.
- [24] Takefumi Aoki, Hironori Mitake, Danial Keoki, Shoichi Hasegawa, and Masako Sato. Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 115–122, 2009.
- [25] Anatole Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53, 2009.
- [26] 家崎明子, 杣田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. 複合現実型視覚刺激による触印象への影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 129–139, 2008.
- [27] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, and Abderrahmane Kheddar. Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? In *IEEE Virtual Reality*, pp. 83–90, 2000.

- [28] Jean-Marie Burkhardt Anatole Lécuyer and Chee-Hian Tan. A study of the modification of the speed and size of the cursor for simulating pseudo-haptic bumps and holes. *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol. 5, No. 14, pp. 14:1–14:21, 2008.
- [29] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified angle of edged shapes using pseudo-haptic effects. In *EuroHaptics'12 Proceedings of the 2012 international conference on Haptics: perception, devices, mobility, and communication - Volume Part I*, pp. 25–36, 2012.
- [30] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In *IEEE Haptics Symposium*, pp. 211–216, 2012.
- [31] Taku Hachisu, Gabriel Cirio, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, and Hiroyuki Kajimoto. Virtual chromatic percussions simulated by pseudo-haptic and vibrotactile feedback. In *ACE '11 Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, 2011.
- [32] 土屋翔, 昆陽雅司, 岡本正吾. Vib - touch:指先による仮想能動触を利用した触力覚インタラクション. 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol. 2010, No. 4, pp. 185–186, 2010.
- [33] 昆陽雅司, 岡本正吾. 振動刺激を用いた疑似力覚の呈示. 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 314–317, 2010.
- [34] Alexis Paljic, Jean-Marie Burkhardt, and Sabine Coquillart. Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque: a comparison between isometric and elastic input devices. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2004.
- [35] Shin Okamoto, Hiroki Kawasaki, Hiroyuki Iizuka, Takumi Yokosaka, Tomoko Yone-mura, and Taro Maeda Yuki Hashimoto, Hideyuki Ando. Inducing human motion by visual manipulation. In *AH '11 Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference Article No. 32*, 2011.



- [36] 岡本信, 川崎宏記, 大野哲史, 米村朋子, 安藤英由樹, 前田太郎. Pseudo-haptic を生じさせる速度変化成分の分析. 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp. 218–221, 2008.
- [37] 川崎宏記, 岡本信, 大野哲史, 米村朋子, 安藤英由樹, 前田太郎. 先行/遅延する自己身体イメージによる pseudo-haptic の生起. 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp. 222–225, 2008.
- [38] 大野哲史, 岡本信, 川崎宏記, 米村朋子, 前田太郎. 追従運動における pseudo-haptic の生起可能性. 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp. 226–229, 2008.
- [39] M. Lee, R. Green, and M. Billinghurst. 3d natural hand interaction for ar applications. In *Image and Vision Computing New Zealand*, pp. 1–6, 2008.
- [40] Volkert Buchmann, Stephen Violich, Mark Billinghurst, and Andy Cockburn. Fingertips: gesture based direct manipulation in augmented reality. In *GRAPHITE '04 Proceedings of the 2nd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 212–221, 2004.
- [41] 飯田洋市. Ahp における一対比較表の表記法に関する提案. 信州大学人文社会科学研究 / 信州大学人文社会科学研究会編, pp. 192–205, 2009.
- [42] 伊佐治せつ子, 和泉志穂. Pc 画面上で見る三原色の季節感について. 武庫川女子大学紀要 自然科学編, pp. 17–23, 2010.