

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

弾性体を利用したアクチュエータによる
鋭い感触の触覚呈示手法

萩原 正宏

(コンピュータサイエンス専攻)

指導教員 高橋 伸

2012年3月

概要

触覚呈示装置とは、人の触覚に何らかの感触を呈示する装置をいう。代表的な触覚呈示装置は振動モータであり、携帯電話やゲーム機のコントローラ等に内蔵され、広く普及している。このような触覚呈示装置では、様々な感触が呈示できることが望ましい。現在、物体の柔らかさや、つるつるやざらざらといった風合い、重さなどの感触の呈示が研究されている。こうした数ある感触の中から、本研究では叩かれたような鋭い感触に着目し、その呈示を目的とする。

叩かれたような鋭い感触を呈示する手段として、瞬発力のあるアクチュエータが必要だと考え、ゴムやバネが持つような弾性力を利用することとした。薄い金属板の弾性力を利用したアクチュエータとして、飛び移り座屈機構というものがあり、本研究では、この機構を用い、叩かれたような鋭い感触の呈示を試みる。

触覚呈示装置としては入力に対する応答性がよいこと、呈示強度が可変であることが求められる。この二つの課題をサーボモータの制御によって実現する方法を提案する。さらに呈示する感触に対して、物理的な客観量とユーザの感じる感覚量について評価する。

この叩かれたような鋭い感触の応用用途として、まず一つ目にVR (Virtual Reality) 環境などで叩かれたことの再現が挙げられる。二つ目は危険の警告やゲームの演出としての利用である。例えば、訓練用シミュレータなどで、事故につながるような誤った操作をした際、それを実感するためにこの鋭い感触を呈示することや、格闘ゲームやFPS(First Person Shooter)などで受けたダメージを演出するといった用途が考えられる。

本研究では、このゲームでの演出について、実装した装置を用いたゲームアプリケーションを二つ作成した。また、装置にマウスなどの入力機能を組み込むことで腕を動かしながら操作することを促し、皮膚感覚と深部感覚の両方に刺激を与えることを図る。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的とアプローチ	1
1.3	応用用途	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	触覚の定義	3
2.2	触覚の生理学	4
2.2.1	触受容器とその分類	4
2.2.2	痛みと「鋭い感触」	5
2.3	触覚呈示装置	6
2.3.1	触感ディスプレイ	6
2.3.2	情報ディスプレイ	7
	エンターテインメント利用での情報ディスプレイ	8
第3章	飛び移り座屈機構による触覚呈示手法	10
3.1	飛び移り座屈機構について	10
3.1.1	動作原理	10
3.1.2	飛び移り座屈機構の利用例	12
3.2	提案手法	12
3.2.1	サーボモータの回転順序	12
3.2.2	呈示強度の調整方法	12
	片側回転方式	14
	両側回転方式	15
3.3	実装した装置の仕様	15
3.3.1	システム概要	15
	装置主要部（アルミフレーム）	16
	無線化した場合の装置	18
	小型版の装置主要部	18
3.3.2	応答時間	19
3.3.3	繰り返し周期	23

第4章	評価	24
4.1	呈示強度変化に対する客観量の調査	24
4.1.1	実験結果	24
4.2	呈示強度変化に対する感覚量の調査	26
4.2.1	実験方法	26
4.2.2	実験結果	27
4.2.3	考察	31
第5章	触覚呈示装置の応用例	34
5.1	障害物をよけるゲームアプリケーション	34
5.2	飛んでくる球をよけるゲームアプリケーション	34
第6章	結論	37
	謝辞	38
	参考文献	39

図目次

2.1	ヒト指腹部軟組織断面の模式図 [1]	5
2.2	力覚呈示装置 . 左図 ¹ : SensAble 社 PHANTOM OMNI[2][3] . 右図 ² : SPIDER[4]	7
2.3	ソレノイドによる衝突感の呈示を行う装置 . 左図 : 外観 . 右図 : 使用イメージ	8
2.4	振動モータを 64 個内蔵したジャケット ¹ [5]	8
2.5	FPS におけるダメージを演出する装置 . 左図 : 空気圧を呈示するベスト [6] . 右 図 : ソレノイドによる衝撃を呈示するベスト [7]	9
3.1	飛び移り座屈 (左図) とそれを再現した機構 (右図)	11
3.2	飛び移り座屈機構を利用した小型自走ロボット [8]	12
3.3	応答性を考慮した回転順序	13
3.4	弾性帯の両端にサーボモータを装着した図	14
3.5	片側回転方式の動作図	15
3.6	両側回転の動作図	16
3.7	システム構成 ² . 上図 : システム構成の概要 . 下図 : 実際のシステム	17
3.8	本研究で弾性帯として使用した焼き入りリボン鋼 . 左図 : 幅の違う弾性帯 . 右 図 : 手で簡単に曲げることができる	19
3.9	アルミフレームの装置主要部の外観	20
3.10	無線化した場合の装置の外観	21
3.11	小型版の装置の外観	22
3.12	応答速度の計測	22
3.13	繰り返しにかかる時間	23
4.1	重りの跳ね上げ実験の外観	25
4.2	重りの跳ね上げ実験の結果のグラフ	25
4.3	弁別閾実験の様子	27
4.4	被験者 a の弁別閾測定実験結果のグラフ	28
4.5	被験者 b の弁別閾測定実験結果のグラフ	28
4.6	被験者 c の弁別閾測定実験結果のグラフ	29
4.7	被験者 d の弁別閾測定実験結果のグラフ	29

4.8	被験者ごとの弁別閾の測定結果のグラフ．高低線で結ばれた範囲は不確定帯を示す．1人の被験者に対して六つの不確定帯があり，左から順に，標準刺激が呈示強度1, 2, 3, 4, 5, 6のときの弁別閾を示している．ただし，標準刺激1, 6の場合はそれぞれ下弁別閾と上弁別閾が測定できないことに注意．．．．	30
4.9	理想的な弁別閾のグラフ．隣り合う不確定帯同士で上限閾と下限閾とが一致していることに注意．．．．．	31
4.10	被験者ごとの弁別閾とウェーバ比のグラフ．．．．．	33
5.1	「電流イライラ棒」を模したゲーム．自機が棒に当たると座屈を生起させる．左上図：マウスを統合した装置の外観．左上図：実際に操作している様子．下図：ゲーム画面．．．．．	35
5.2	飛来する球をよけるゲームアプリケーション．左上図：持ち手をつけた装置．左下図：操作している様子．右上図：弾性帯の接触位置．右下図：ゲーム画面	36

第1章 序論

1.1 研究の背景

触覚呈示装置とは，人の触覚に何らかの感触を呈示する装置をいう．そして触覚ディスプレイには触感ディスプレイと情報ディスプレイとの2種類がある．触感ディスプレイは，現実にある感触の忠実な再現を目的とする．対して情報ディスプレイは必ずしもリアルでなくとも触覚を用いて何かしらの情報の伝達を目的とする．例えば，点字は視力が悪い人に対して，指先の触覚を通して文字情報を伝える．

そもそも触覚とは，ヒトや動物が自身の機械変形や温度変化を手掛かりに，圧力や振動，温度変化などの外界からの刺激や，腕をどの程度曲げているのかや怪我の有無などの自身の身体の状態を検知する感覚をいう．触覚は皮膚感覚と深部感覚とに分けられる．皮膚感覚（狭義の触覚）はその名の通り，皮膚表層部の器官によって検知される感覚であり，例えば，物体表面に触れた時にザラザラやつるつるといった質感などを知覚する．深部感覚は，身体内部の関節や筋肉にある器官によって検知される感覚であり，例えば手で物体を押したときにどの程度の力で押しているのかといった情報を知覚する．

1.2 研究の目的とアプローチ

代表的な触覚呈示装置は振動モータであり，携帯電話やゲーム機のコントローラ等に内蔵され，広く普及している．また，比較的高価ではあるが，可動するアームの先に把持する部分が付いた装置ではその部分を押したり引いたりするときに反力を呈示することで深部感覚を適切に刺激している．さらに現在では，物体の柔らかさや，つるつるやざらざらといった風合い，重さなどの様々な感触の呈示が研究されている．そういった状況において，本研究では，数ある感触の中から叩かれたような鋭い感触に着目し，その呈示を目的とする．

叩かれたような鋭い感触を呈示する手段として，本研究では物理的に皮膚を叩くことを選択した．そしてその実現には，瞬発力のあるアクチュエータが必要だと考え，ゴムやバネが持つような弾性力を利用することとした．弾性力を利用したアクチュエータとして，飛び移り座屈という現象を利用した機構が存在する．飛び移り座屈とは，プラスチック製の下敷きや薄い金属板などの柔軟な板（以降，弾性帯）をたわませ，それに適当な外力を与えるとたわみが急速に反転する現象をいう．この現象をサーボモータによって再現，制御する機構を飛び移り座屈機構という．本研究では，この機構を用い，叩かれたような鋭い感触の呈示を試みる．

触覚呈示装置としては入力に対する応答性がよいこと，呈示強度が可変であることが求められる．応答性は，飛び移り座屈が起こる直前の状態を入力状態とすることでその向上を図る．飛び移り座屈によって発生する力は，弾性帯の大きさ等で変化するが，可能ならば装置の初期設定を変えずに発生する力を変化させたい．そこで二つのサーボモータを弾性帯の両端に取り付け，その回転方法によって発生する力を変える方法を提案する．さらにこの発生する力に対して，物理的な客観量とユーザの感じる感覚量について評価する．

1.3 応用用途

叩かれたような鋭い感触の応用用途について考えてみると，まず一つ目に触感ディスプレイとして，VR（Virtual Reality）環境などで叩かれたことを再現することが挙げられる．二つ目は情報ディスプレイとして，危険の警告やゲームで演出として利用することである．例えば，訓練用シミュレータなどで，事故につながるような誤った操作をした際，それを実感するためにこの鋭い感触を呈示することが考えられる．また，格闘ゲームやFPS(First Person Shooter)などで受けたダメージを演出するといった用途もあるだろう．

本研究では，このゲームでの演出について，実装した装置を用いたゲームアプリケーションを二つ作成した．一つでは，ゲーム内でミスをした際のペナルティを演出する．もう一つでは，飛んできた球が衝突したときの衝撃を，球の速度に応じて演出し分ける．また，装置にマウスなどの入力機能を組み込むことで腕を動かしながら操作することを促し，皮膚感覚と深部感覚の両方に刺激を与えることを図る．

1.4 本論文の構成

本章では，研究の背景とその目的，応用用途について述べた．第2章ではまず，触覚の定義とその生理学について述べてから，触覚呈示装置を触感ディスプレイと情報ディスプレイとに分けて，その関連研究を紹介していく．第3章では，飛び移り座屈機構を用いて叩かれたような鋭い感触を呈示する手法とその実装について説明する．第4章では実装した装置が呈示する感触について物理的な客観量と主観的な感覚量について評価する．そして第5章では装置を用いたアプリケーションについて解説する．最後に第6章で本研究の結論を述べる．

第2章 関連研究

この章では、まず触覚の基礎知識として、その定義と生理学について述べる。そして、触覚呈示装置を触感ディスプレイと情報ディスプレイとの2種類に分け、その関連研究を紹介していく。

2.1 触覚の定義

触覚または触力覚とは、自身の機械変形または温度変化を手掛かりに内外の力学的な状況を検知する感覚をいう。生理学的には体性感覚 (somatic senses) を指し、「身体の表層組織 (皮膚や粘膜) や、深部組織 (腱, 筋, 骨膜, 間接囊, 靭帯) にある受容器が刺激されて生じる感覚」[9] である。

体性感覚には、皮膚感覚 (cutaneous senses) と深部感覚 (deep senses) とがあり¹、前者は皮膚の表層で圧力や振動、温度、痛みを検知し、後者は身体内部で筋骨格の長さや張力、関節の角度を検知する。以下に分類をまとめておく。

- 体性感覚 (広義の触覚)
 - 皮膚感覚 (表在感覚)
 - * 触覚 (狭義の触覚) 何かに触れたり圧迫されたりするときの感覚 (本研究の主対象)
 - * 温度覚
 - * 痛覚
 - 深部感覚 (自己受容感覚, 力覚)
 - * 位置感覚
 - * 運動感覚
 - * 力感覚
- 内臓感覚

また、「なでる」など「触って調べる」行為、つまり触知行為にも分類がある。これは、皮膚感覚と深部感覚との協調度合いによって分けられる。皮膚感覚のみを用いる場合を触知覚 (tactile perception)、両方を協調して用いる場合を触運動知覚 (haptic perception)、深部感覚

¹体性感覚に内臓感覚 (visceral senses) を含めるとする立場もあるが、本稿では文献 [9] に則り、除外する

のみを用いる場合を運動知覚 (kenesthetic perception) とそれぞれ呼ぶ (表 2.1) [10]。特に触運動知覚は能動的触覚 (active touch) とも呼ばれ、「手で自由にさわることによって生じる対象の知覚」[9] と定義されている。本研究では主に皮膚感覚による触知覚を取り扱うが、将来的には装置の応用段階で触運動知覚も視野に入れたいと考えている。

表 2.1: 触知行為の分類 [10]

	触知覚	触運動知覚	運動知覚
使用する感覚	皮膚感覚	皮膚感覚 深部感覚	深部感覚

2.2 触覚の生理学

2.2.1 触受容器とその分類

皮膚は有毛部 (毛根が存在する部分) と無毛部 (毛根が存在しない部分) とに分けられ、無毛部は手の平や足の裏など、皮膚が厚く、指紋や掌紋がある。無毛部は有毛部に比べるとその面積はわずかである。しかし、無毛部は四肢の先端といった、身体の部分において最も自由度の高い部位にあり、外界を探索する、例えば手で対象に触れたり、なでたり、把持したりすることで対象物の重さや粘度、風合い等を知覚するのに用い、触覚の知覚として重要な役割を持つ。そのため、従来の触覚研究においても、その対象の多くは無毛部であった。本研究でも、装置への主な接触部位は手の平であり、その理由の一端がここにある。

皮膚には機械変形を検知する受容器 (機械受容器, mechanoreceptor) が分布している。受容器には、カプセル型などのある程度構造体としてまとまりをもった受容器である、マイスナー小体 (Meissner corpuscle)、パチニ小体 (Pacinian corpuscle)、メルケル触盤 (Merkel disc)、ルフィニ終末 (Ruffini ending) と、特定の構造を持たず、神経線維の先端が枝分かれして広がった受容器である、自由神経終末 (free nerve ending) とがある。ヒトが知覚する触刺激の多くは、構造体を持つ受容器が検知し、したがって多くの触覚研究はこれらの受容器を対象に研究を行っている。

機械受容器は刺激に対する受容野と順応性により四つに分類される。受容野とは機械刺激に対して触受容器が発火する皮膚の範囲をいう。この違いは主に、触受容器が皮膚の浅い位置にあるのか、深い位置にあるのかで変化する。順応性とは刺激の変化に应答するか、つまり刺激のはじまりと終わりにのみ反応し、同じ刺激が一定時間継続すると反応しなくなるような特性を順応性が速いといい、逆に同じ刺激がある程度継続しても反応し続けるような特性を順応性が遅いという。受容野において面積が比較的狭く境界が明瞭である場合を I 型とし、逆に面積が比較的広く境界が不明瞭な場合は II 型とする。また、速順応を FA 型 (fast adapting type) とし、遅順応を SA 型 (slowly adapting type) とする。これらの分類を組み合わせることによって SA I 、SA II 、FA I 、FA II という 4 種の分類ができる。

本研究では、皮膚感覚に衝撃力の呈示、つまり素早い皮膚変形を起こす。しかし、皮膚を「押し込む」ほどの変形量の出力は想定してない。したがって、FA 型の受容器が刺激されると考えられる。

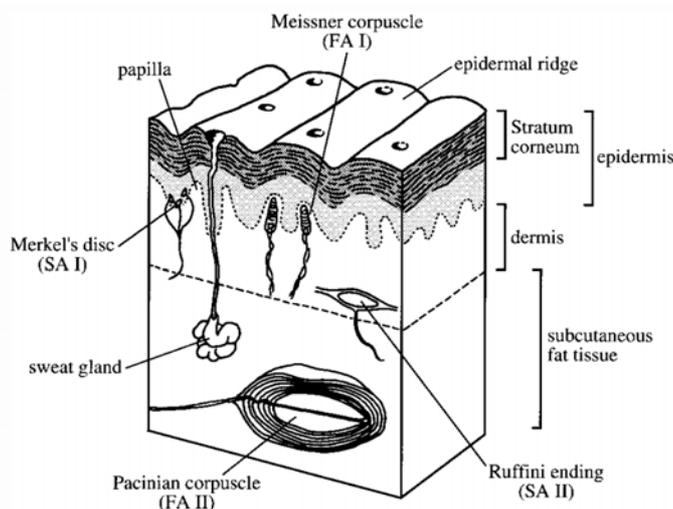


図 2.1: ヒト指腹部軟組織断面の模式図 [1]

表 2.2: 触容器の分類

	SA	SA	FA	FA
順応	遅い	遅い	速い	速い
受容野の境界	明瞭	不明瞭	明瞭	不明瞭
受容野の面積	狭い	広い	狭い	広い
触受容器	メルケル触盤	ルフィニ終末	マイスナー小体	パチニ小体
反応する刺激の種類	持続的な圧力	持続的な圧力	低周波振動 変化する圧力	高周波振動 変化する圧力

2.2.2 痛みと「鋭い感触」

痛みとは、皮膚や深部組織の神経組織が侵害されることで検知される感覚である。侵害の度合い、範囲によりその強度は変化し、怪我や身体の不調を痛みにより知覚する。痛みは一過痛、急性痛、慢性痛 3 種類に分類される [11]。一過痛とは、叩かれたり、つねられたり、足の小指をタンスの角にぶついたりした場合など、身体への損傷がほぼないような痛みをいう。対して、急性痛とは切り傷ややけどなど、身体の損傷・疾患が原因となる痛みをいう。そし

て慢性痛とは、痛みの原因となる損傷・疾患が治っているにも関わらず痛みだけが残るものをいう。

本研究では叩かれたような「鋭い感触」を皮膚感覚に呈示する。当然強く叩けば痛覚を刺激する。身体に損傷を与えるような出力は想定していないので一過痛である。しかし、エンターテイメント目的などの応用用途では強い痛みを与えることは避けたい。このような場合では、あくまでゲームなどのコンテンツを楽しむことが最終的な用途、目的であり、感触の呈示強度は強すぎず弱すぎず、調整できることが望ましい。

2.3 触覚呈示装置

触覚呈示装置を応用用途により分類したものの表 2.3 にまとめる [12]。触覚呈示装置には、より本物らしく触感を再現する触感ディスプレイと、全体システムにおける最適性を優先する情報ディスプレイがある。前者は VR (Virtual Reality) 環境などでの触覚の再現を応用目的される。後者は点字に代表されるような、触覚を用いた情報伝達に使われる。

表 2.3: 触覚呈示装置の応用 ([12] より一部抜粋改変)

分類	優先事項	現在想定されている応用
触感ディスプレイ	本物らしく触感を再現すること	<ul style="list-style-type: none"> ・オンラインショッピング ・アミューズメント ・遠隔手術支援, 手術シミュレーション ・テレグジスタンス
情報ディスプレイ	全体システムにおける最適性	<ul style="list-style-type: none"> ・障害支援 ・情報ツール ・警告 (危険の伝達) ・ゲームでの演出

2.3.1 触感ディスプレイ

触感ディスプレイの応用としてアミューズメント、つまり娯楽がある。例えば、ビリビリという紙を破る感触や鉛筆削りの感触、液体を注ぐときの感触など、「心地よい」とされる感触を再現する研究がそれにあたる [13][14][15]。

体性感覚の一つである深部感覚を再現するシステムとしては、PHANToM[2][3] や SPIDAR[4] が挙げられる (図 2.2)。これらの研究で開発された装置は、ユーザが装置のペン型や球体の把持する部分を押したり引いたりするときに適切な抵抗力を付与することで反力を呈示する。

利用されるアクチュエータは主に DC モータであり，把持する部分に繋がった糸を巻き取るという方式を取っている．



図 2.2: 力覚呈示装置．左図¹：SensAble 社 PHANTOM OMNI[2][3]．右図²：SPIDER[4]

こういった装置を用いたシステムは手術シミュレータ [16] や技能教示 [17] などに用いられる．そのため，現実に即した忠実な深部感覚の再現が望まれる．これはつまり，運動知覚行為の再現であるが，そのためには装置可動部の高い自由度や持続的に強い力を呈示できる能力が必要となる．そのために装置は大きく，重くなりがちであり，机などの接地する土台を必要とする「接地型」といわれるタイプに属する．また，研究用途という側面が強く，価格も高価であり，まだ一般家庭のようなエンドユーザには普及していない．

GravityGrabber[18] は指に巻きつけたベルトをモータで巻き取ることで指の腹の部分にせん断力を与え，持った物の重量感や慣性質量を呈示するシステムである．この研究の特長は，非接地型である装着型の装置であるにもかかわらず，重さという触運動知覚行為を必要とする感覚を皮膚感覚のみで再現している点である．ただし，より重いものを再現しようとするとき，應和らの手法のように，ユーザが背負ったタンクにポンプで水を送り，重量感と重量増加を呈示するといった装置が必要となってくる [19] ．

2.3.2 情報ディスプレイ

情報ディスプレイの応用用途としては，障害支援や情報ツール，警告，ゲームでの演出などがある．文献 [20] では指先につけた電極からの電気刺激により警告情報の呈示を行っている．PHANTOM のような力覚呈示装置による外科シミュレーションにおいて，把持した道具が身体の危険部位を侵害しようとした際に電気刺激を与え，警告する．

また，携帯端末とのインタラクションに触覚情報を利用する研究が近年増えている．Hemmertらは直交させた二つのレール上を移動する重りによりタッチスクリーン搭載型携帯電話の操作フィードバックを呈示する [21] ．SqueezeBlock[22] は，仮想的なバネの感触によって視覚に依存しないインタラクションを提案している．バネの感触はモータによって再現され，モータにはデバイスを把持する圧力を入力としたフィードバック制御がかけられている．Sekiguchi

¹画像は http://rk.mech.kyushu-u.ac.jp/sc/research/simsoft_jp.html より転載

²画像は <http://www.ddd.co.jp/product/spidar/index.html> より転載

ら [23] はソレノイドを内蔵した箱型デバイスによって衝突感と刻み感を呈示している．利用方法としてはこの箱を振った際，内部に何かが入っているような感触をメタファーとして利用しメールを受信していることをユーザに知らせる，といったものが提案されている．

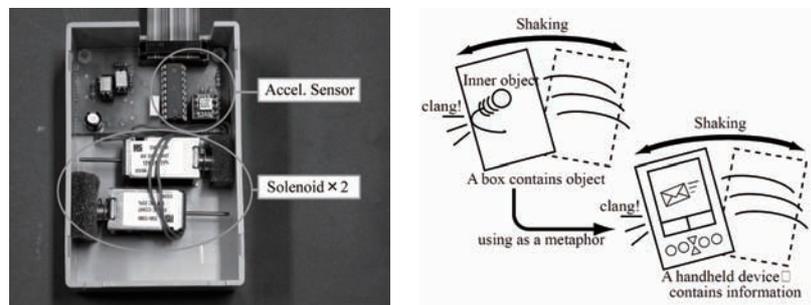


図 2.3: ソレノイドによる衝突感の呈示を行う装置．左図：外観．右図：使用イメージ

エンターテイメント利用での情報ディスプレイ

エンターテイメント利用を目的とした情報ディスプレイとして，文献 [5] では 64 個の振動モータをジャケットに内蔵している．振動子を用いること自体はごく一般的であるが，その応用目的が興味深い．ゲームや映画の緊張感のある場面で心臓周辺を振動させ「鼓動」を意識させるといったような，その場面に合わせた演出を行うことができる（図 2.4）．また，映画



図 2.4: 振動モータを 64 個内蔵したジャケット²[5]

館やアミューズメント施設で，客席や床に強力なスピーカーを内蔵させその振動によって臨場感を演出する商品 [24] などもある．そして大島らは，振動子と効果音によって「身体を切

²<http://spectrum.ieee.org/biomedical/devices/jacket-lets-you-feel-the-movies> より転載

られる」感覚の演出を試みている [25]。振動子とスピーカーを複数個胴体に装着し、触覚への仮現運動を生起させると同時に効果音を移動呈示することにより「ばっさり感」を生成している。

さらに「FPS Gaming Vest」では空気圧を出すベストをユーザに装着させ、FPS(First Person Shooter) ゲームで受けたダメージを演出している(図 2.5 左図) [6]。ベストの中にはコンプレッサから送られた空気圧を出す空気パッドが前面に4個、背面に4個入っている。この複数の空気パッドによって「銃で撃たれた」「爆発を受けた」などの様々なダメージを演出し分けている。また文献 [7] では同様のことをソレノイドを用いて行っている(図 2.5 右図)。やはり、「被弾」の演出には振動よりも「叩く」ような感触が適していると考えられる。本研究では、ソレノイドのような電磁気式のアクチュエータではなく、将来的な小型化軽量化を見越し、弾性力に利用したアクチュエータを用いた手法を提案する。



図 2.5: FPS におけるダメージを演出する装置。左図：空気圧を呈示するベスト [6]。右図：ソレノイドによる衝撃を呈示するベスト [7]

第3章 飛び移り座屈機構による触覚呈示手法

触覚呈示装置に用いられる主なアクチュエータには、振動モータやボイスコイル、ソレノイド、サーボモータ、空気圧、水流などがある。しかし、本研究が目的とする鋭い感触を実現しようとするときこれらでは様々な問題が出てくる。まず、振動モータは呈示する感触が全く違うので除外する。また、空気圧や水流は原理上空気を圧縮するコンプレッサーや水をくみ上げるポンプが必要となり、装置が大がかりになってしまう。サーボモータは持続的な出力に優れているが、瞬発力が乏しい。ボイスコイル、ソレノイドといった電磁気式で直線運動をするものは応答性に優れるが、大きな出力を得ようとするとき重量やサイズが問題となり、文献 [26] でも従来の電磁気式のアクチュエータでは瞬発力のある感触を呈示するのは困難であると指摘している。また、ボイスコイル、ソレノイドはある程度すでに完成された素子であり、これを目的に応じて改良することは難しい。そこで、小型化・軽量化の可能性があり、目的に応じた改良がし易いアクチュエータとして、飛び移り座屈機構を採用した。

この機構の特長には以下のような点が挙げられる。

- 仕組みが単純
- 瞬間的に強い力が発生できる
- 座屈さえ生起できれば安定した出力が得られる
- 制御方法に工夫の余地がある

以下、飛び移り座屈機構による触覚呈示手法とその実装について説明していく。

3.1 飛び移り座屈機構について

3.1.1 動作原理

「飛び移り座屈」と呼ばれる現象について説明する。薄い金属板やノートの下敷きといった、「しなる」ことができる板状の弾性体に両端から力を加え、弾性力を蓄えるようにたわませておく。そして、たわませたまま、たわみが反転するように適当な力を加えていくと、ある時点で限界を超え、蓄えられた弾性力によって急速にたわみが反転する。この現象を飛び移り座屈という。

この現象を金属の板（弾性帯と呼ぶ）とサーボモータによって再現し制御する機構が存在する（以降、飛び移り座屈機構と呼ぶ）。この機構の基本的な仕組みは、まず帯状の薄い金属

板の両端をたわませた状態になるように台座とサーボモータの回転軸に取り付ける．そしてサーボモータを回転によってたわみを反転させ、飛び移り座屈の生起を制御する、といったものである(図 3.1)．

座屈の強度は基本的に弾性帯のサイズや固定長に基づき変化する．弾性帯の、幅が広く、固定長が長く、厚さが厚くなればより強度は強くなる．また、基本機構のままでは動作している最中に強度を変化させることはできない．

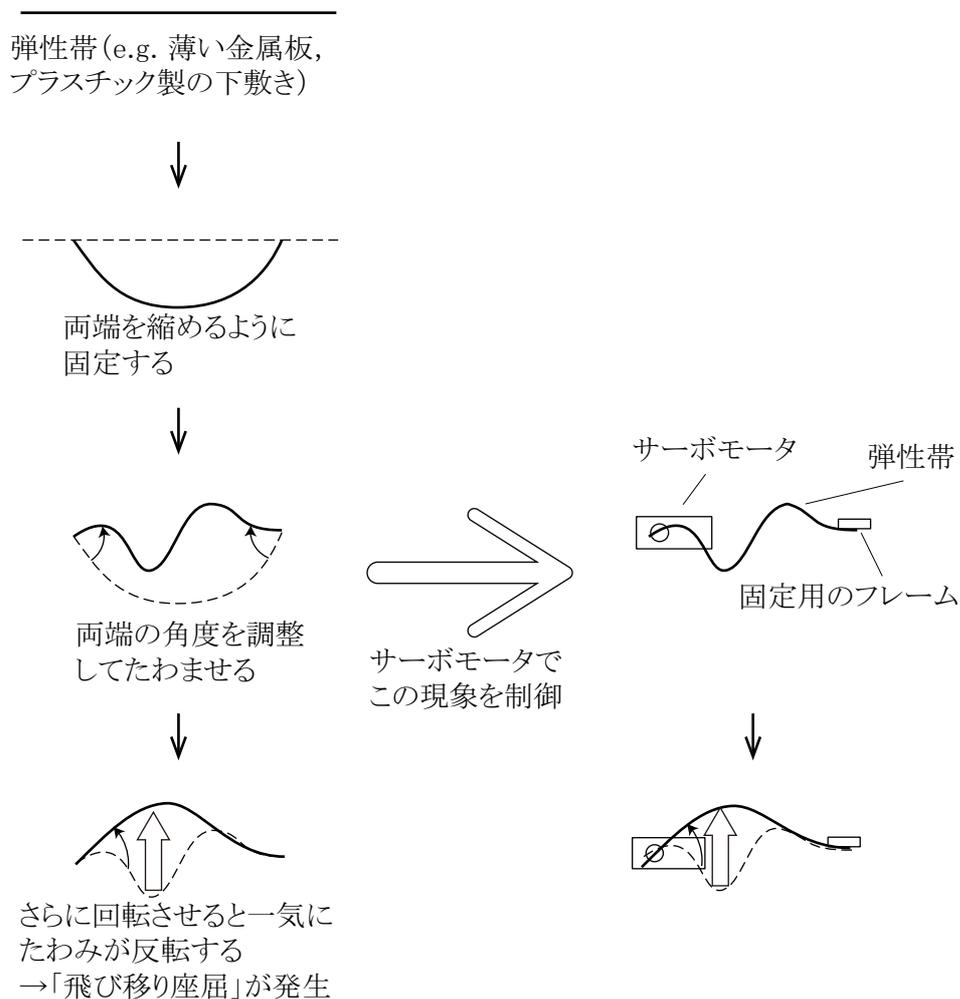


図 3.1: 飛び移り座屈 (左図) とそれを再現した機構 (右図)

3.1.2 飛び移り座屈機構の利用例

文献 [8] では、この基本方式に対して、サーボモータに取り付けたアームによって弾性帯の片端を回転させることで片方向のみに座屈を生起されるよう改良している（図 3.1.2）．片方向のみに座屈を生起できるので「飛び跳ねる」小型ロボットの自走用アクチュエータに適応した形式となっている．このように飛び移り座屈機構は装置の設計を工夫することで目的に応じた特長を發揮できる．

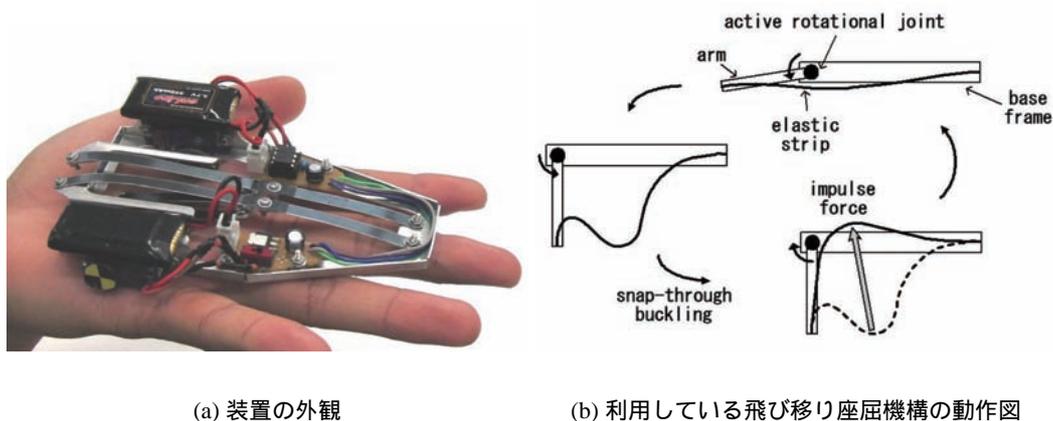


図 3.2: 飛び移り座屈機構を利用した小型自走ロボット [8]

3.2 提案手法

3.2.1 サーボモータの回転順序

触覚呈示装置として利用するためには、入力に対する出力の応答速度が求められる．そこで座屈が生起する直前の状態を入力待ち状態とした．これにより少しの回転で即座に座屈を生起できる．そして座屈を生起させたあとはたわみを反転させてから、再び入力待ち状態に戻る．このサーボモータの回転順序を図 3.3 を示す．

3.2.2 呈示強度の調整方法

弾性帯の幅や厚さなどの初期設定の変更ではなく、動作中に異なる強度の座屈を生起させることを試みる．そのために弾性帯の両端にサーボモータを取り付け（図 3.4），飛び移り座屈を生起する際の回転制御により弾性帯のたわませ方を調整する方法を取った．二つのサーボモータのうち、左側のサーボモータの角度を θ_L ，右側のサーボモータの角度を θ_R とする．角度の基準として、サーボを俯瞰した際に 3 時の角度を $0[^\circ]$ とする（図 3.4 左図）．

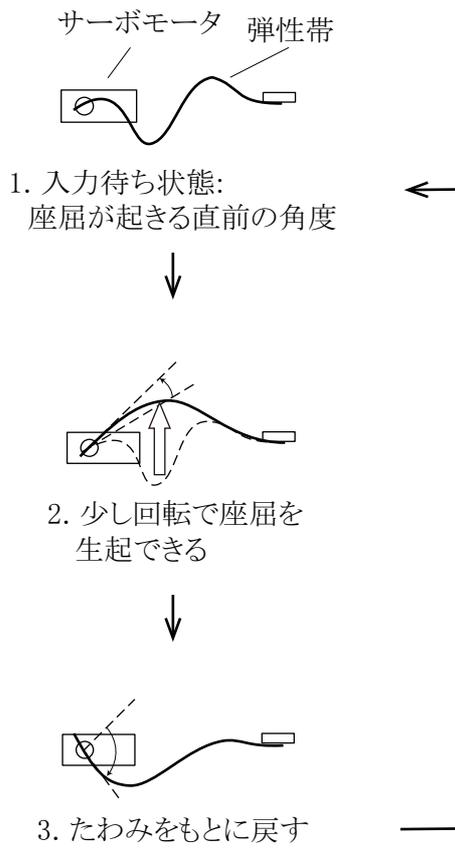


図 3.3: 応答性を考慮した回転順序

本研究では二つの回転制御方法を提案する．まず一つ目は飛び移り座屈を生起させる際，片一方のサーボモータのみを回転させ，もう一方は生起させる際には回転させず，生起中以外に弾性帯の取り付け角度を調整する方法である（以降，片側回転方式と呼ぶ）．二つ目は両方のサーボを同時に回転させ，片方は常に一定の回転方法とし，もう一方の回転角度を変えることで強弱を出す方法である（以降，両側回転方式と呼ぶ）．どちらの回転方法にしても θ_R の設定によって発生する力を調整する．

両側回転方式では3.2.1で説明した「座屈の生起する直前を入力待ち状態とする」という回転順序は使えない．そのため，応答速度は芳しくない．しかし，代わりに強度の上限が片側回転方式よりも上がるという長所を持つ．これは実際に手で弾性帯の座屈を行ってみると体感できるが，片方のみを回転させるよりも両端を同時に回転させた方がより強い座屈が起こるのである．

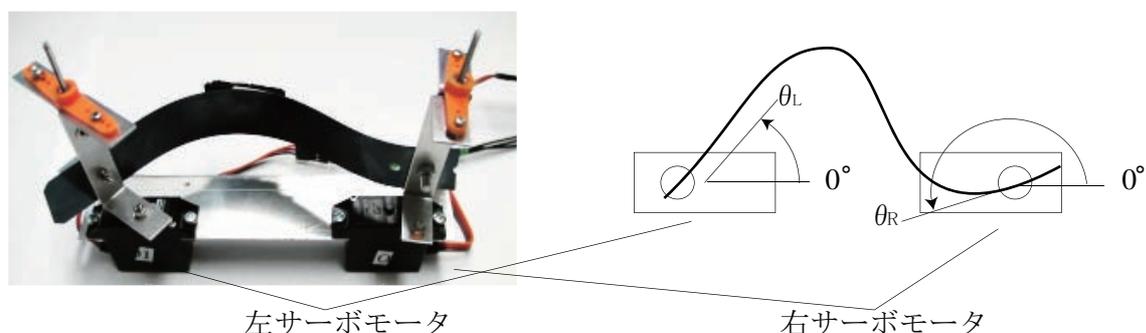


図 3.4: 弾性帯の両端にサーボモータを装着した図．

片側回転方式

図 3.5 に片側回転方式の動作図を示す．まず入力待ち状態として，座屈の生起する直前の状態にする．この時点で θ_R の角度により強度を調整する． θ_R が座屈を生起できる範囲内で最大（図中で 6 時方向に近づく）のとき，強度は最弱となる．反対に座屈を生起できる範囲内で最小（図中で 12 時方向に近づく）のとき，強度は最強となる．そして，入力信号がきたとき，左サーボのみを時計回りに回転させることで座屈を生起させる．その後，たわみを反転させるために左サーボを反時計回り，右サーボを時計回りに回転させる．そして再び入力待ち状態に移行する．

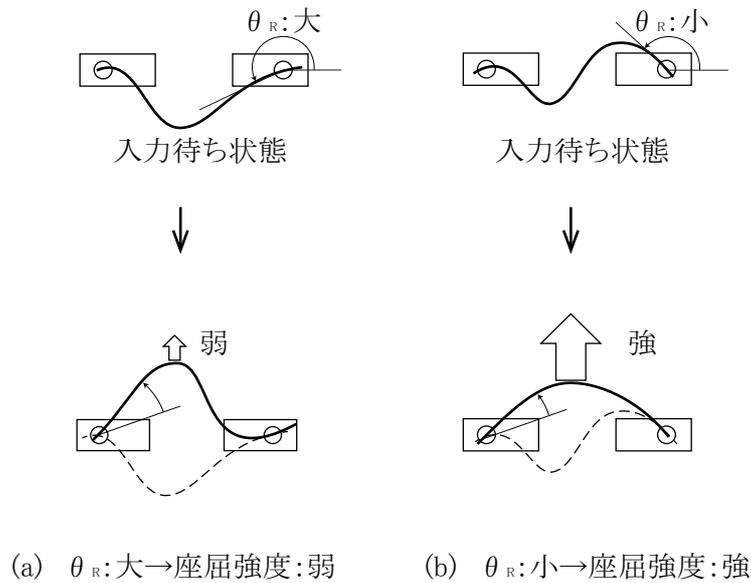


図 3.5: 片側回転方式の動作図

両側回転方式

図 3.6 に両側回転方式の動作図を示す．両側回転では弾性帯が下に凸の弧を描くときを入力待ち状態とした．入力信号がくると左右のモータを同時に回転させる．入力信号が来たなら，左右のサーボを同時に回転させ始める．左サーボは 6 時方向から 12 時方向へ常に同じ最終角度まで回転をさせる．そして右サーボの最終角度によって座屈の強度を調整する．例えば，右サーボの最終角度が，座屈を生起できる範囲で最大なら，強度は最小となる（図 6(b)）．逆に，右サーボの最終角度が，座屈を生起できる範囲で最小なら，強度は最大となる．

3.3 実装した装置の仕様

3.3.1 システム概要

システム全体の構成要素は，計算機とマイコンボード，サーボモータ用外部電源，装置主要部である．装置主要部はサーボモータと弾性帯，フレームで構成される．図 3.7 にシステム構成の概要と実際に作成したシステムの全体図を示す．本研究での触覚呈示装置はマイコンボード，外部電源，装置主要部をまとめたものを指すが「装置」と記述した場合は装置主要部を指すものとする．サーボモータは計算機に接続されたマイコンボードからの PWM (Pulse Width Modulation) 信号によって回転を制御される．サーボへの給電は単 3 型電池 \times 4 の直列接続 (4.8[V])，または三端子レギュレータで電圧降下させた 6P 型電池 (6.0[V]) といった外部電源から行われる．計算機とマイコンボードとの接続は有線 (USB 接続)，または無線通信 (通信規格 802.15.4/ZigBee) を用いる．

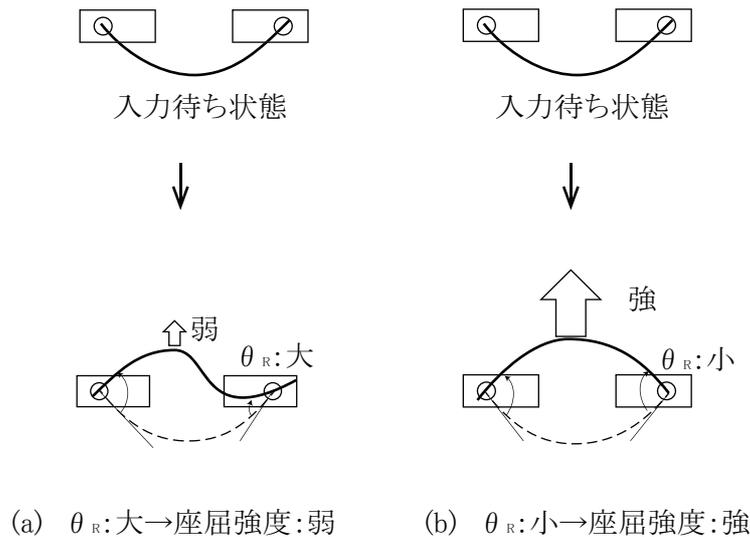


図 3.6: 両側回転の動作図

使用した部品について述べる．文献 [8] を参考に弾性帯には焼き入れリボン鋼 (JIS SK5-CSPH, 厚さ 0.15mm) を選定した (図 3.8)．弾性帯にトルクを印加するためのラジコン用サーボモータ (GWS 社製 MICRO-MG) は, ある程度幅の広い弾性帯を使用する場合やフレームの固定長を短くした場合など, トルクを必要とする条件設定に対応できるよう少々大きいが強力なものを採用した (仕様を表 3.2 に示す)．サーボと弾性帯を固定するフレームにはアルミ材またはアクリル板を加工して用いた．

開発環境を表 3.3 に示す．計算機には Intel Core2 Quad CPU Q9550 (2.83[GHz]), RAM4.00[GB] (3.00[GB] 使用可能), Windows 7 Professional SP1 (32[bit]) を使用した．マイコンボードには Arduino Diecimila を用いた．Arduino へは計算機上の Processing 言語のプログラムからシリアル通信により命令を送る．通信速度は有線時 57600[bps], 無線時 9600[bps] である．Arduino には Firmata¹ という通信プロトコルを実装したプログラムである「StandartFirmata」をアップロードした．

装置主要部 (アルミフレーム)

フレームにアルミを使用した装置主要部を図 3.9 に示す．以降, 実験や評価を行うがそのほとんどでこの装置を使用した．そのため, 特に断らない限り, 「装置」や「装置主要部」といった場合はこの装置を指す．フレームの外壁には装置が自立できるように発泡スチロール製の板を取り付けた．重さは 110[g], サイズは 100 × 57 × 150[mm], 弾性帯に対するフレームの固定長は 105[mm] である．装着できる弾性帯の幅の上限は 60[mm] となっているが, サーボの対面のフレームと弾性帯の取り付け金具を延長すれば上限は引き上げることができる．

¹http://firmata.org/wiki/Main_Page

²計算機の図は <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Desktop-PC.svg> より転載

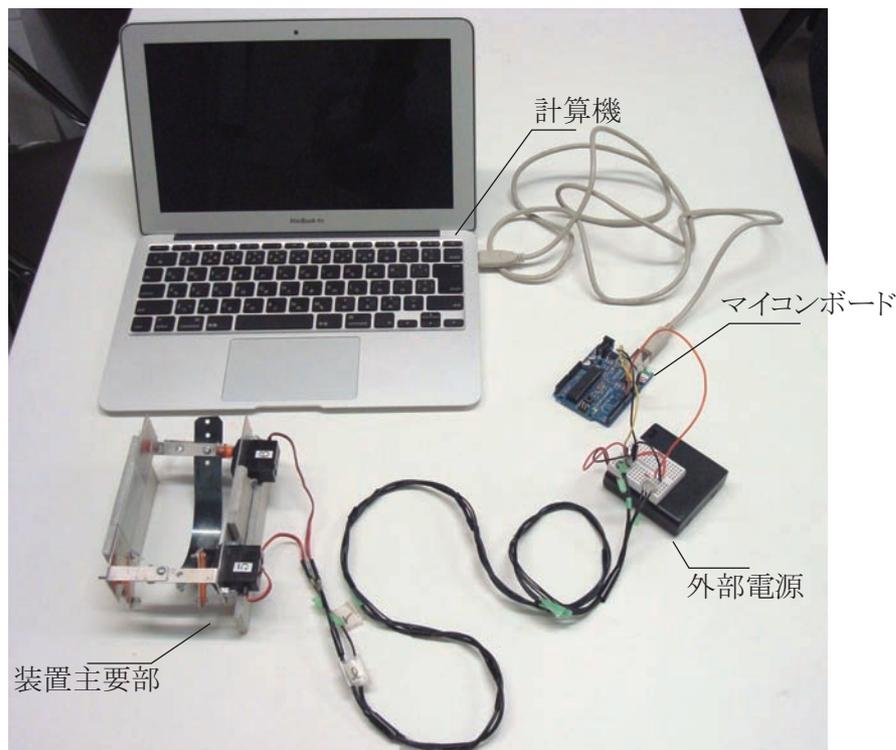
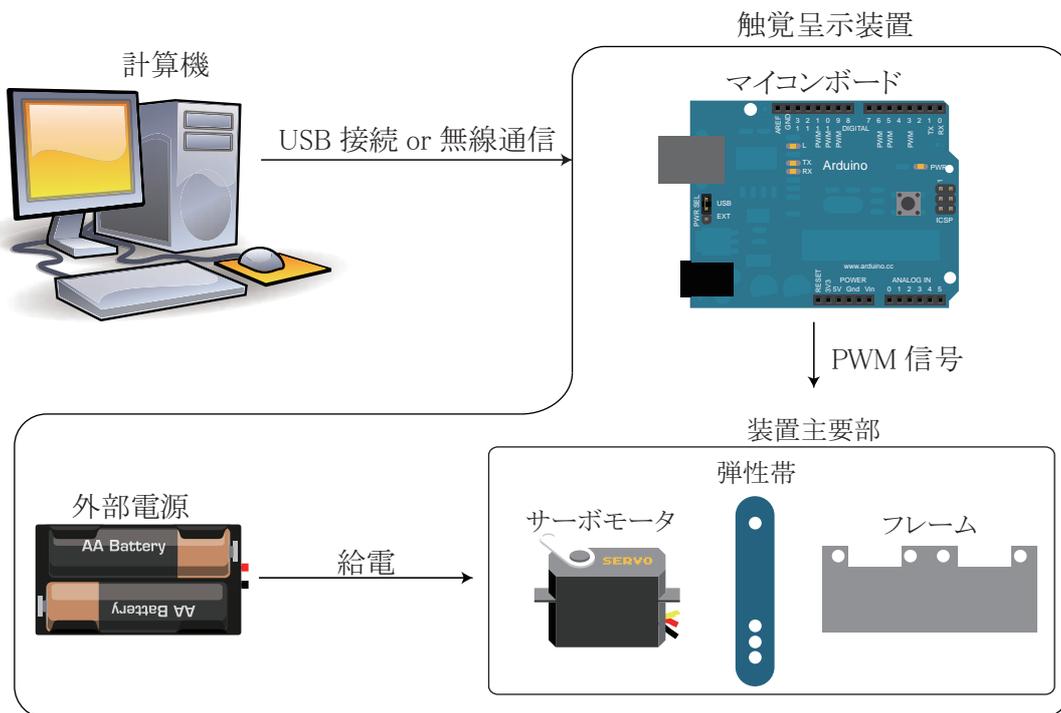


図 3.7: システム構成² . 上図 : システム構成の概要 . 下図 : 実際のシステム

表 3.1: 使用したハードウェアと部品

名称	規格	製造会社
弾性帯	焼き入れリボン鋼, JIS SK5-CSPH, 厚さ 0.15[mm]	GWS 社
サーボモータ	MICRO-MG(2BB)	
アルミのフレーム	厚さ 1[mm]	
アクリルのフレーム	厚さ 1[mm]	
マイコンボード	Arduino Duemilanove (ATmega328P 搭載)	MaxStream 社
無線モジュール	XBee 無線モジュール・チップアンテナ型 シリーズ 1, 802.15.4/ZigBee	
無線モジュール用シールド	Arduino XBee Shields	
無線モジュール USB 変換アダプタ	XBee Explorer USB	
充電式ニッケル水素電池	単 3 型, 1.2[V], min. 1000[mAh] 6P 型, 8.4[V], min. 170[mAh]	SparkFun 社

表 3.2: サーボモータの仕様

製造会社	GWS 社
型番	MICRO-MG (2BB)
トルク, 速度	4.8[V] 時:トルク 5.4[kg-cm], 速度 0.17[sec/60°] 6.0[V] 時:トルク 6.4[kg-cm], 速度 0.14[sec/60°]
重量	28[g]
サイズ	28.0 × 14.0 × 29.8[mm]

無線化した場合の装置

無線通信を行う際は Arduino へ専用シールドを用いて XBee 無線モジュールを装着し, 計算機には無線モジュール USB 変換アダプタによって XBee 無線モジュールを USB 端子に装着する。そして, 装置主要部に Arduino と外部電源 (6P 型電池) を装着する (図 3.10)。これにより全体の重量は 133[g] となる。

小型版の装置主要部

フレームを小型化し箱 (タッパー) に収めた装置主要部を図 3.11 に示す。この装置では箱の天板に上下稼働できる「コの字」型の金具を取り付けてある。この金具を弾性帯で「叩き上げる」ことで, 金具が鉛直上向きに可動し, ユーザへの接触する。この装置の重量は 134[g], サイズは 80 × 65 × 120[mm] である。

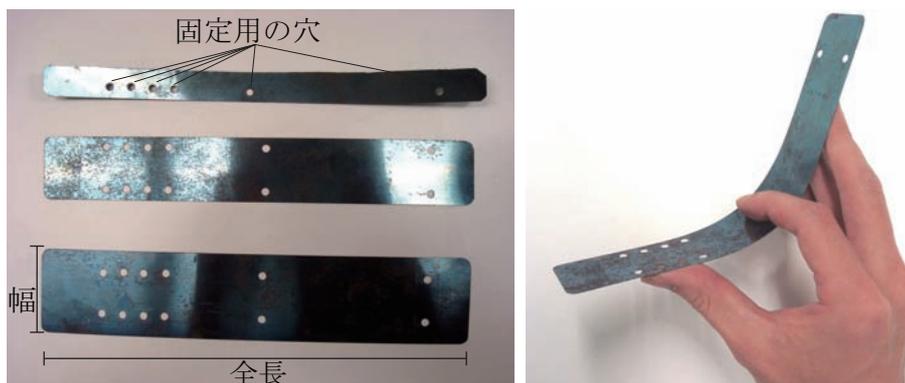


図 3.8: 本研究で弾性帯として使用した焼き入りリボン鋼．左図：幅の違う弾性帯．右図：手で簡単に曲げることができる

表 3.3: 開発環境

計算機	CPU	Intel Core2 Quad CPU Q9550, 2.83GHz
	メモリ	4.00GB 搭載 (3.00GB 使用可能)
	OS	Windows 7 Professional SP1, 32 ビット
Arduino IDE	開発元	Arduino Software
	Version	1.0
	公式サイト	http://www.arduino.cc/
Processing	version	1.5
	公式サイト	http://processing.org/

3.3.2 応答時間

入力に対し、座屈が起こるまでの応答時間を計測した(図 3.12)。弾性帯のもっとも変位する部位に加速度センサを取り付け、入力に対してセンサの値が反応するまでの時間を調べた。その結果、応答時間は約 0.1[sec]であった。実際に触覚呈示装置を利用する場合、触力覚呈示と視覚・聴覚呈示とを併用することが想定されるが、触覚と視覚・聴覚との時差が 40[msec]以下であると認識が一致するといわれている [27][28]。ゆえに、目標とするのは 40[msec]以下であるが、現時点でもある程度の実用には耐えうると考えられる。

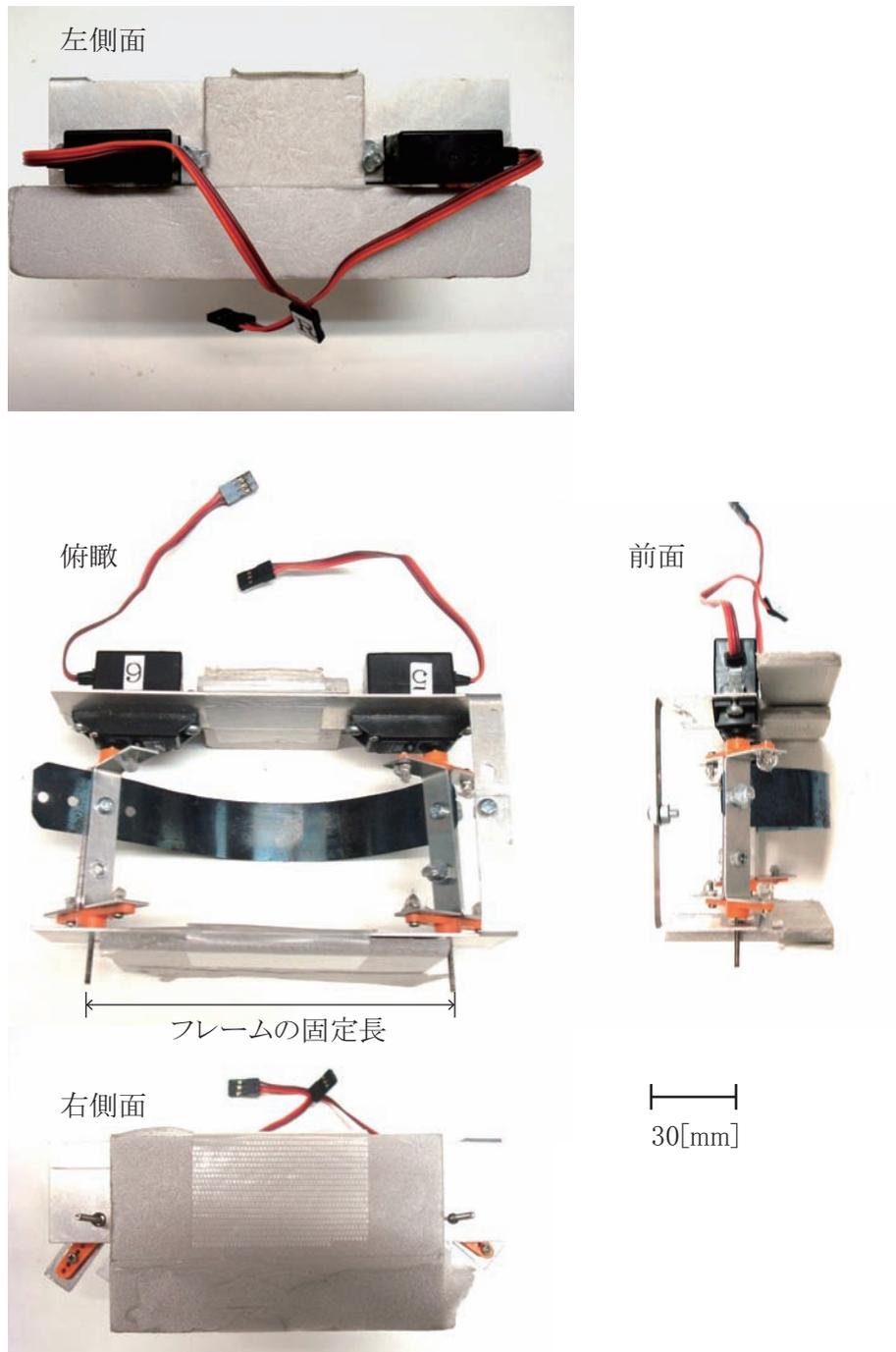


図 3.9: アルミフレームの装置主要部の外観 .

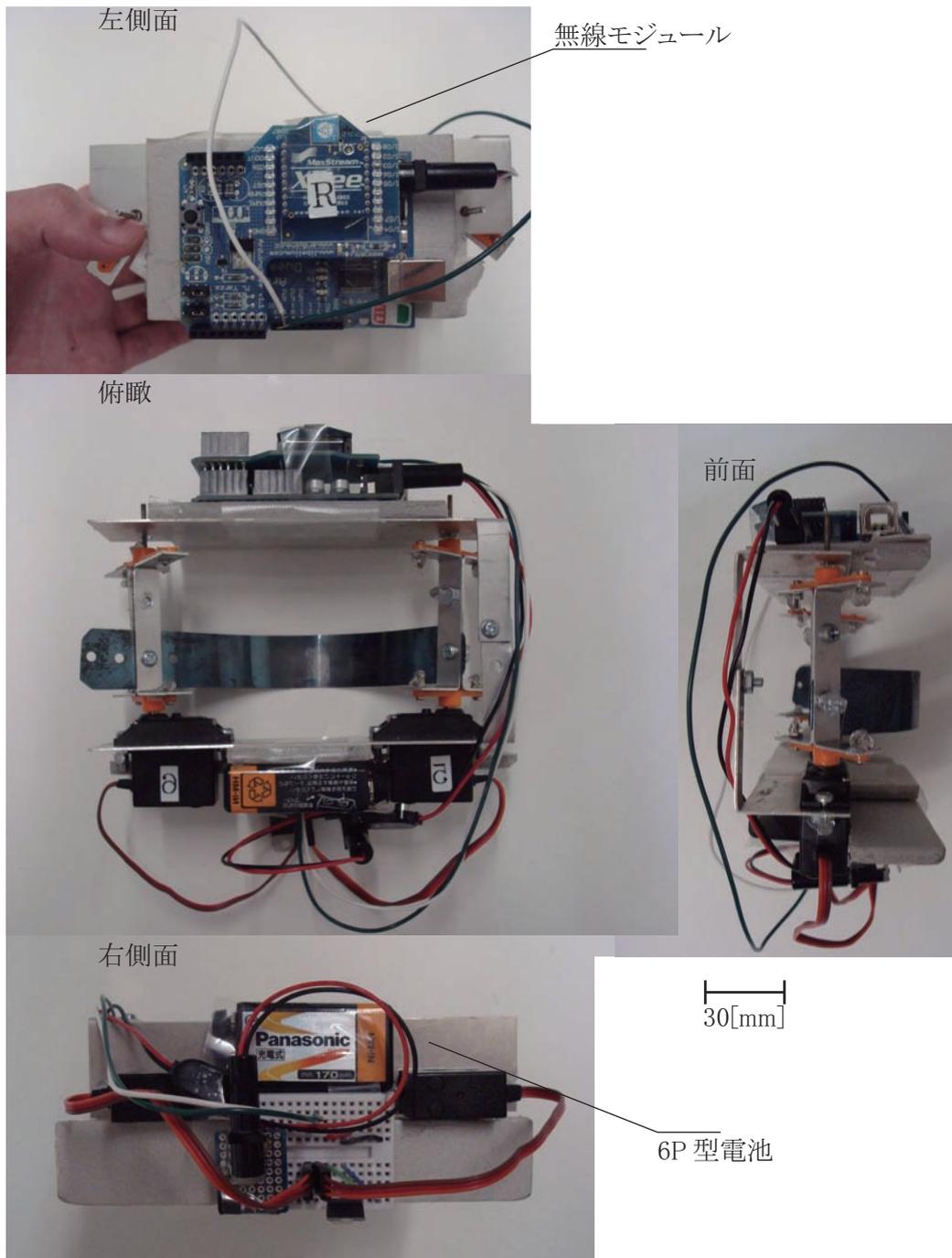


図 3.10: 無線化した場合の装置の外観 .

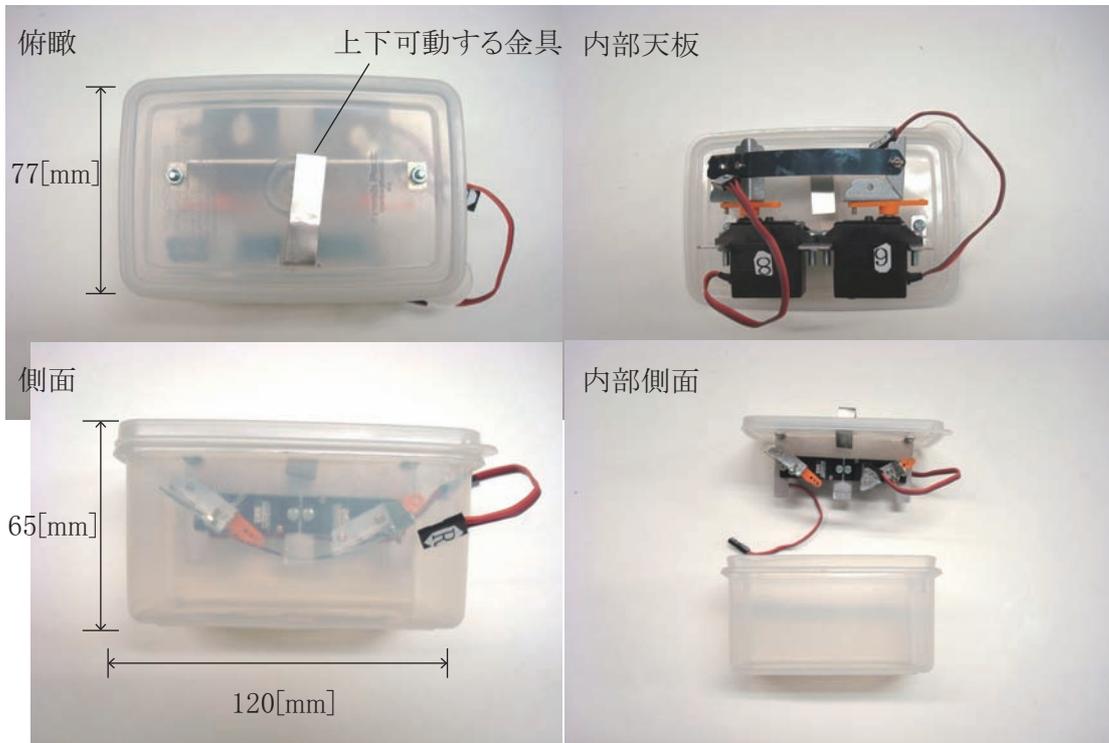


図 3.11: 小型版の装置の外観 .

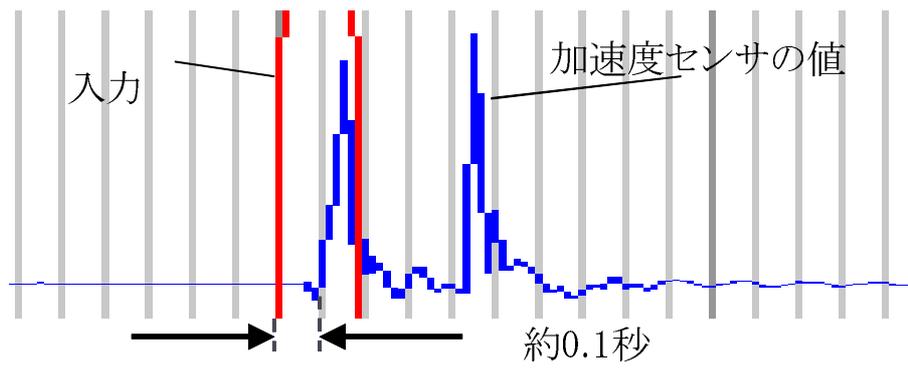


図 3.12: 応答速度の計測

3.3.3 繰り返し周期

座屈の繰り返し周期の一例を示す．幅 20[mm] × 固定長 135[mm] × 厚さ 0.15[mm] の弾性帯，フレームの固定長 105[mm] の装置で，片側回転方式の最大呈示強度（入力待ち状態へ移行するのに最も時間がかかる）の繰り返し周期を求める．サーボの角度は入力待ち状態で ($\theta_L = 30^\circ, \theta_R = 150^\circ$)，座屈が完了した状態で ($\theta_L = 40^\circ, \theta_R = 150^\circ$)，たわみをもとに戻した状態で ($\theta_L = -40^\circ, \theta_R = 220^\circ$) とした．状態遷移にかかる時間をプログラムで調節していった結果，図 3.13 が得られ，1 回目の座屈から 2 回目の座屈までは 410[msec] かることがわかった．

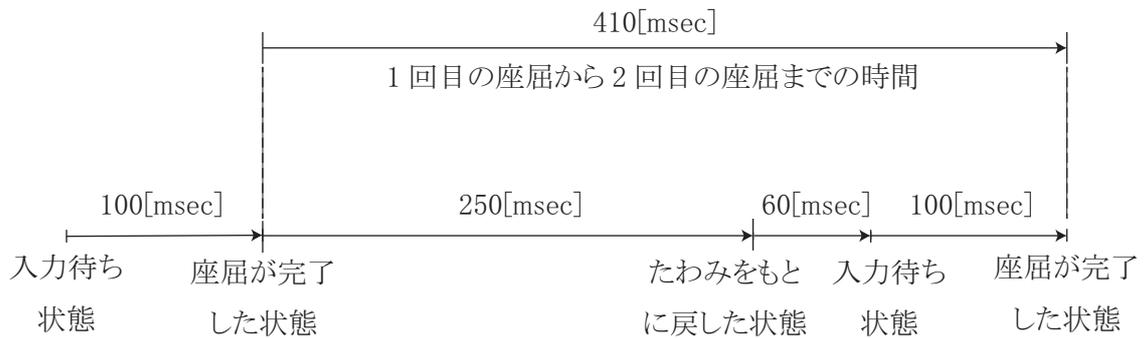


図 3.13: 繰り返しにかかる時間

第4章 評価

4.1 呈示強度変化に対する客観量の調査

3.2.2 では片側回転方式，両側回転方式という呈示強度の調整方法を説明した．これらの調整方法によって呈示強度の客観量が一体どのように変化するのか実験によって調査した．実験の様子を図 4.1 に示す．弾性帯に糸で重り（50[g]）を吊り下げ，座屈によって鉛直上向きに跳ね上げさせる．その跳ね上げ距離を測定することで発生する力を比較した．ただし，跳ね上げ距離は重りの変位から弾性帯の変位を差し引いた値とした．跳ね上げ距離の測定には高速カメラ（CASIO EXLIM EX-ZR100, 最大 1000[fps]）を用いて動画を撮影し，動画内の目盛を目視で読み取る方法を取った．一つの設定に対して 10 回の試行を行い（回転方式 2 パターン × 角度 6 パターン × 試行 10 回 = 120 回），その平均値を算出した．

実験で使用した装置の仕様は，幅 20[mm] × 固定長 135[mm] × 厚さ 0.15[mm] の弾性帯，フレームの固定長 105[mm] である．

片側回転方式での具体的なサーボの角度について説明する．まず入力待ち状態で $\theta_L = 30[^\circ]$ ， $\theta_R = 140 \sim 190[^\circ]$ とした．この時点での θ_R により発生する力を調整する． $\theta_R = 140[^\circ]$ のときに最大の力，また， $\theta_R = 190[^\circ]$ のときに最小の力を発生する． $\theta_R = 140 \sim 190[^\circ]$ で $10[^\circ]$ ずつ角度を変え 6 段階の変化を与える．そして，座屈を生起させる際は，左サーボを時計回りに $20[^\circ]$ 回転させる（ $\theta_L = 50[^\circ]$ ， $\theta_R = 140 \sim 190[^\circ]$ ）．

両側回転方式での具体的なサーボの角度について説明する．両側回転では入力待ち状態を $\theta_L = -60[^\circ]$ ， $\theta_R = 50[^\circ]$ とした．入力信号がくると左右のモータを同時に回転させる．左サーボは常に同じ回転をさせ（ $\theta_L = -60 \sim 50[^\circ]$ ），右サーボの最終角度によって発生する力を調整する．例えば， $\theta_L = -60[^\circ]$ ， $\theta_R = 50[^\circ]$ から $\theta_L = 50[^\circ]$ ， $\theta_R = 110[^\circ]$ へと回転させたとき，発生する力は最小となる．また， $\theta_L = -60[^\circ]$ ， $\theta_R = 50[^\circ]$ から $\theta_L = 50[^\circ]$ ， $\theta_R = 150[^\circ]$ と回転させたときに発生する力は最大となる．こちらも $\theta_R = 150 \sim 200[^\circ]$ で $10[^\circ]$ ずつの変化で 6 段階とした．

4.1.1 実験結果

図 4.2 に跳ね上げ距離の平均値のグラフを示す．エラーバーは標準偏差である．グラフをみると，回転制御により呈示強度を調整できたことがわかる．右側のサーボの角度に対して呈示強度はほぼ線形に変化している．右サーボの角度が同じ場合で片側回転と両側回転を比較すると両側回転の方が発生する力が大きい．

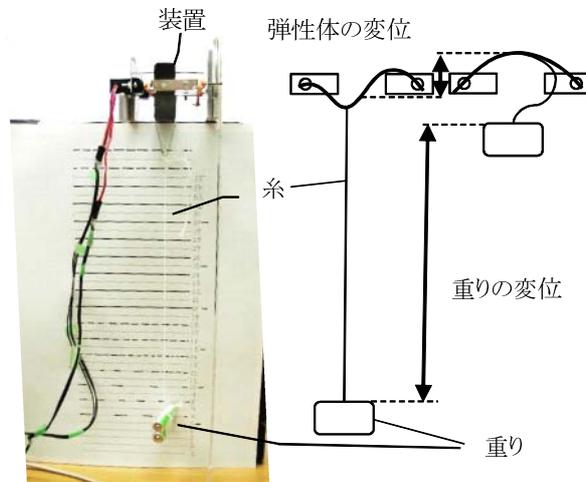


図 4.1: 重りの跳ね上げ実験の外観

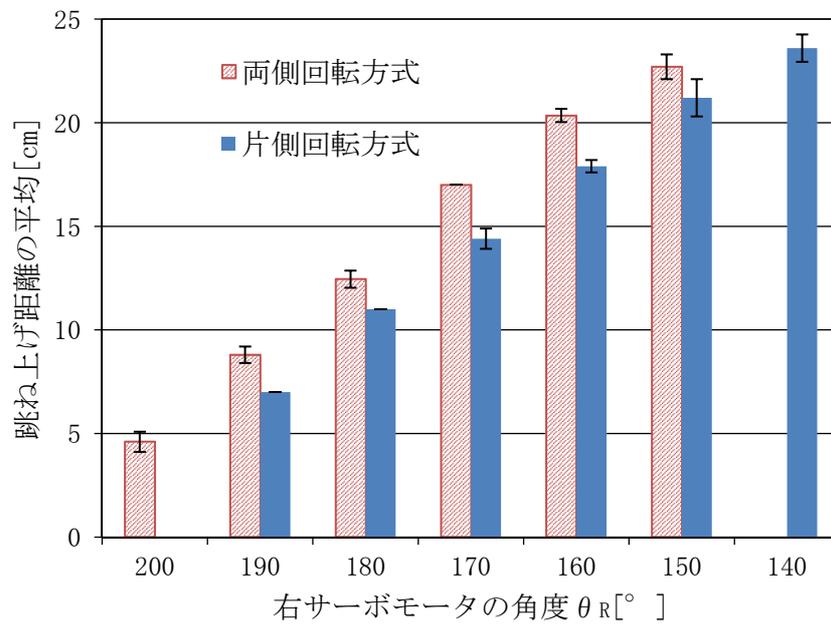


図 4.2: 重りの跳ね上げ実験の結果のグラフ

4.2 呈示強度変化に対する感覚量の調査

呈示強度を動的に変化させた場合の感覚量，つまりユーザの感じ方を調査するため，極限法により弁別閾の測定を行った．弁別閾とは，二つの刺激量に対して，それらを区別できる最小の差異をいう¹．極限法では，実験者は被験者に対し，まず基準となる刺激（標準刺激）を呈示しておき，次に比較対象となる刺激量（比較刺激）を一定間隔で変化させて，標準刺激と比較刺激との違いを被験者に回答してもらう．比較刺激の変化方法としては，徐々に刺激量を増加させる上昇系列と，逆に徐々に刺激量を減少させる下降系列とがある．上下系列の二つで測定することで刺激の呈示順序による影響を緩和させる．

閾値の測定法には，極限法の他に調整法や恒常法がある．調整法は，被験者自身が刺激量を調整することで閾値を測定していく．この方法の長所は実験時間が短時間であり，かつ，どの刺激量でどの程度 of 感覚量になるのかが被験者にわかりやすいといった点である．ただし，実験結果に被験者の意図が入りやすいといった欠点もある．恒常法は，実験者が被験者にランダムに刺激を呈示する方法である．これにより，被験者の慣れや呈示順序による予測の誤差を除外できる．しかし，実験時間が長くなるため，被験者の疲労による影響を受けやすい．調整法，恒常法に対し，極限法は上下系列の二つの呈示順序のため，調整法よりも被験者の意図に影響されにくく，恒常法よりも短時間で済み被験者の疲労による影響を受けにくい．そのため，今回の主観的感覚調査実験では極限法を選択した．

4.2.1 実験方法

実験で使用した装置は，4.1.1 で使用したものと同一の条件設定であり，幅 20[mm] × 固定長 135[mm] × 厚さ 0.15[mm] の弾性帯，フレームの固定長 105[mm] で，片側回転により呈示強度を変化させた．ここでの呈示強度は 4.1.1 の片側回転と対応した 6 段階であり，最弱を呈示強度 1，最強で呈示強度 6 と呼称する．被験者には，掌に弾性帯が衝突するように装置の上に掌を置いてもらった（図 4.3）．

被験者は情報系の大学院生で 22～30 歳の男女 4 名を対象とした．実験方法は，上昇系列と下降系列とで比較刺激を呈示し，標準刺激に対し「大きい」「等しい」「小さい」のうちどれか一つを回答してもらうといった形式とした．被験者が標準刺激の確認を要請してきた場合はその都度標準刺激を呈示した．一つの標準刺激に対する実験を 1 ユニットと数えると呈示強度は 6 段階なので 6 ユニットの実験を行うことになる．1 ユニット内では上昇系列 3 回，下降系列 3 回の計 6 系列の比較刺激呈示を行う．一つの系列内で，例えば標準刺激が呈示強度 1 のときの比較刺激の呈示強度 6 のような，明らかに不要であるような比較は行わなかった．そして一つの系列内で，上界の選択（上昇系列なら「大きい」，下降系列なら「小さい」）が 2 回起こった場合はそこでその系列の測定を打ち切る．例えば，上昇系列で「小さい」「等しい」「大きい」「大きい」の順で被験者が回答したときは上昇系列の上界である「大きい」が 2 回来たのでそこでその系列の測定を終了する．

¹弁別閾に対し，呈示された刺激への検出の有無，つまり「感じるか」「感じないか」の閾値を刺激閾または検出閾，絶対閾という

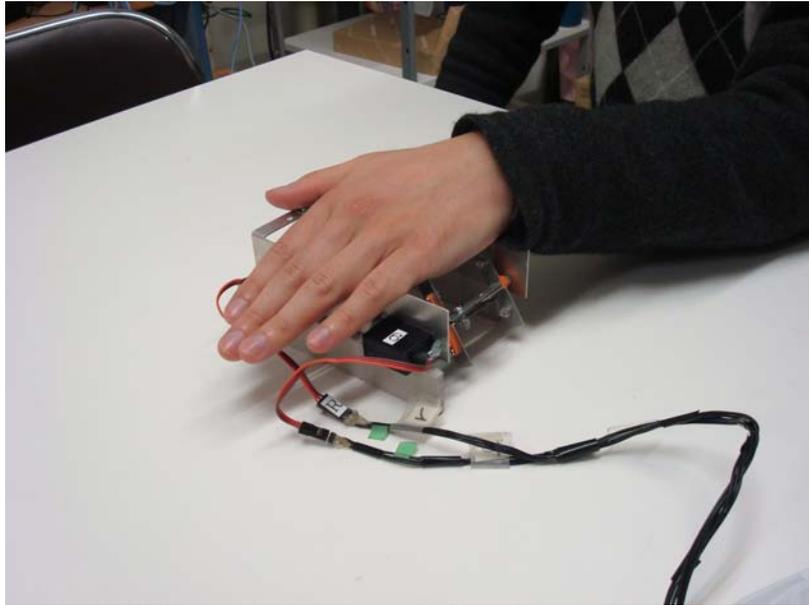


図 4.3: 弁別閾実験の様子 .

4.2.2 実験結果

4 人の被験者 a~d の回答のプロットを図 4.4~4.7 に示す . グラフの横軸は標準刺激の呈示強度を , 縦軸は比較刺激の呈示強度を示す . 縦に並んだデータ点群が 1 系列を表す . したがって , 一つの標準刺激に対し , 6 個のデータ点群がある .

図 4.8 に被験者ごとの平均上限閾 , 平均等価値 , 平均下限閾を示す . 上限閾とは , 1 系列内で「大きい」と回答したうちの最小値と「等しい」と回答したうちの最大値との中央値をいう . つまり , 標準刺激よりも大きいと確実に判断できる最小の比較刺激である . 逆に下限閾は , 1 系列内で「小さい」と回答したうちの最大値と「等しい」と回答したうちの最小値との中央値であり , 標準刺激に対して確実に小さいといえる最大の刺激である . 等価値は上限閾と下限閾の中央値である . そして , 上下限閾に挟まれた範囲を不確定帯という . また , 上限閾から標準刺激値を引いた値を上弁別閾 , 標準刺激から下限閾を引いた値を下弁別閾という . そして , 弁別閾 (または平均弁別閾) は上下弁別閾の中央値を指す . 表 4.1 にこれらの用語説明をまとめておく .

ただし , 標準刺激が呈示強度 1 のときの下限閾や , 標準刺激が呈示強度 6 のときの上限閾など , 閾に達しない場合がある . なぜなら呈示強度 0 や 7 は存在しないからである . 例えば , 標準刺激呈示強度 1 の際 , 下降系列で比較刺激が 1 のときに「等しい」と回答した後の次に「小さい」が出るまで比較刺激呈示をすることは当然できない . したがって , 上限閾または下限閾が測定できなかった場合 , 等価値には「等しい」と回答した刺激値の平均値を用いた .

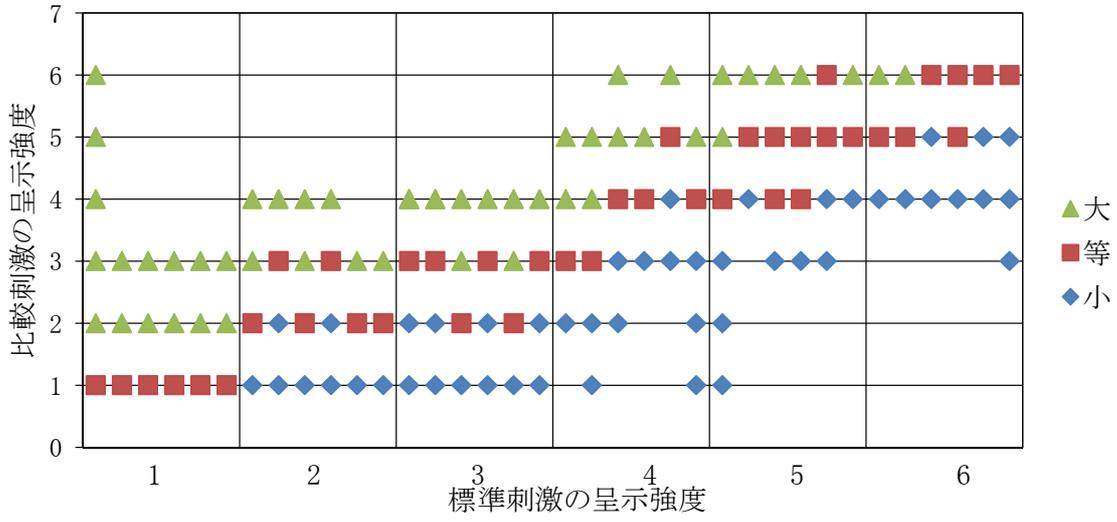


図 4.4: 被験者 a の弁別閾測定実験結果のグラフ .

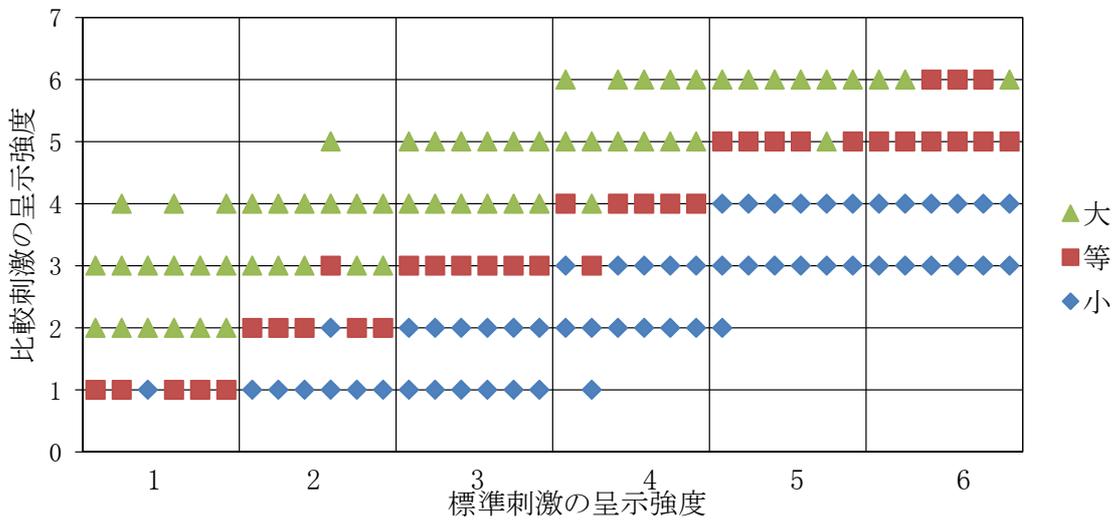


図 4.5: 被験者 b の弁別閾測定実験結果のグラフ .

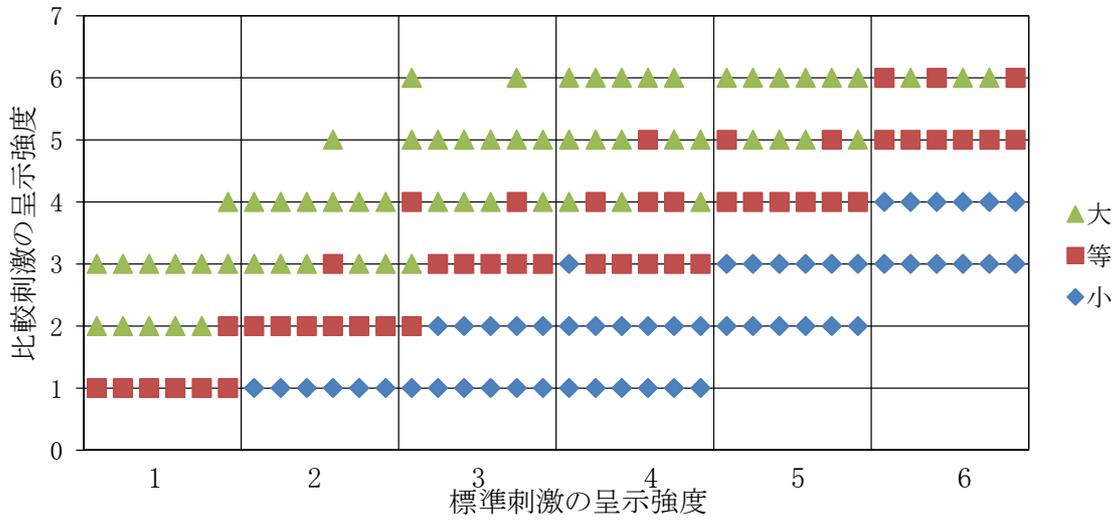


図 4.6: 被験者 c の弁別閾測定実験結果のグラフ .

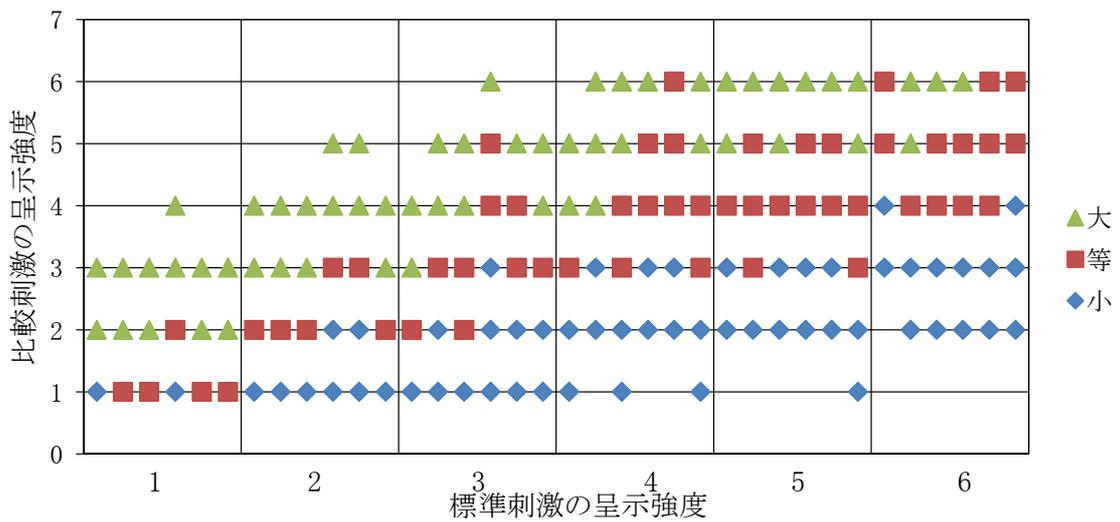


図 4.7: 被験者 d の弁別閾測定実験結果のグラフ .

表 4.1: 用語の説明

用語	説明
上限閾	「大きい」と「等しい」と境界値
下限閾	「小さい」と「等しい」との境界値
等価値	上限閾と下限閾との中央値
不確定帯	上限閾から下限閾までの範囲
上弁別閾	上限閾 - 標準刺激
下弁別閾	標準刺激 - 下限閾
弁別閾	上弁別閾と下弁別閾との中央値

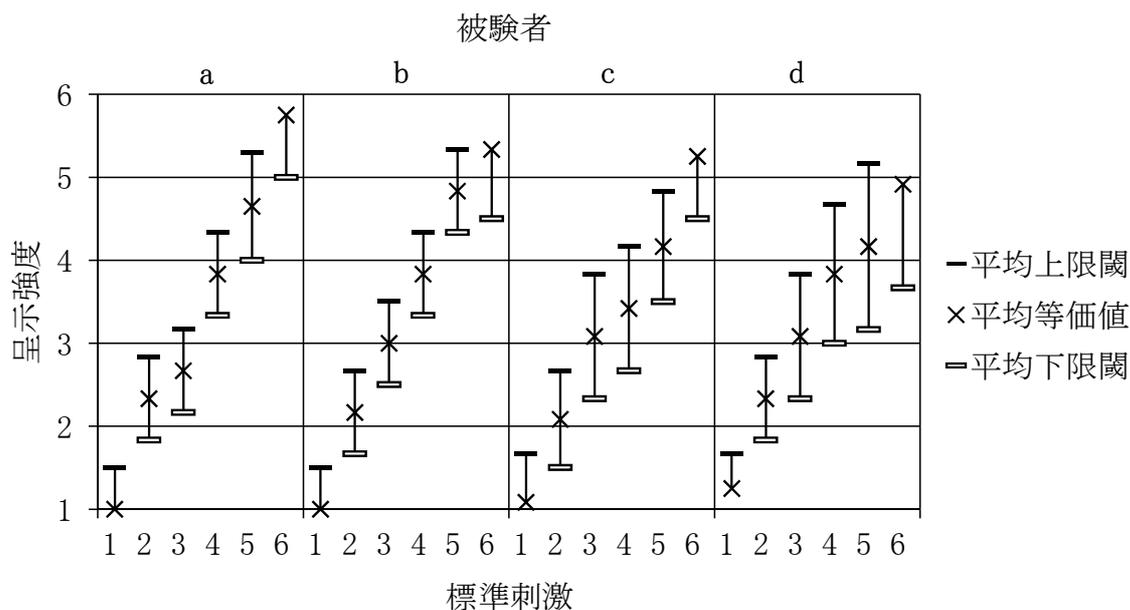


図 4.8: 被験者ごとの弁別閾の測定結果のグラフ。高低線で結ばれた範囲は不確定帯を示す。1人の被験者に対して六つの不確定帯があり、左から順に、標準刺激が呈示強度1, 2, 3, 4, 5, 6のときの弁別閾を示している。ただし、標準刺激1, 6の場合はそれぞれ下弁別閾と上弁別閾が測定できないことに注意。

4.2.3 考察

ここで、不確定帯の重なりを見ていく。説明の便宜上、 $\{x|x \in \text{呈示強度}\}$ という集合を定義する。図 4.8 の被験者 a を見てみると、 $\{1, 2, 4, 6\}$ や $\{1, 3, 4, 6\}$ 、 $\{1, 2, 5\}$ のような集合では要素同士の不確定帯が重ならず、弁別できることがわかる。同様にほかの被験者を見ていくと、被験者 b は $\{1, 2, 4, 6\}$ 、被験者 c は $\{1, 3, 6\}$ や $\{2, 4, 6\}$ 、被験者 d は $\{1, 2, 4\}$ が不確定帯が重ならない集合となる。つまり、呈示強度 6 段階に対し、3~4 段階の弁別が可能であることがわかる。

ここで注意しておきたいのは、完全にすべての呈示強度を弁別できるような理想的な実験結果の場合でも、連続した呈示強度同士では、大きい方の呈示強度の下限閾と小さい方の呈示強度の上限閾とが一致する（図 4.9）、という点である。そのため必ずしも不確定帯同士が少しも重なってはいけないわけではない。

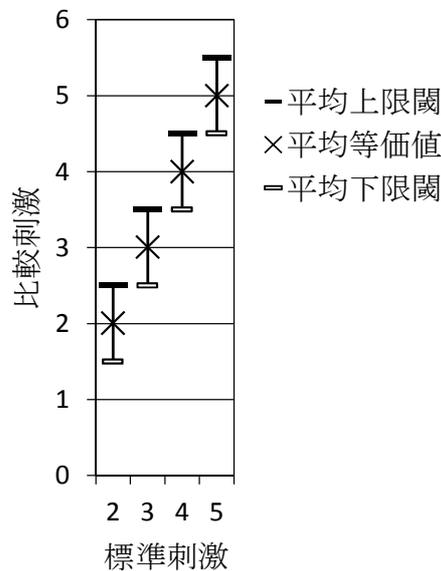


図 4.9: 理想的な弁別閾のグラフ。隣り合う不確定帯同士で上限閾と下限閾とが一致していることに注意。

また、ウェーバの法則が適用できるか考えてみる。これは「弁別閾は標準刺激に比例する」という法則である。標準刺激 s に対応する弁別閾を Δs とすると

$$\frac{\Delta s}{s} = c \quad (\text{ただし } c \text{ は定数}) \quad (4.1)$$

という式でウェーバ比 c が表される。この法則によれば c が一定になる。例えば、100[g] の重さに対して 5[g] を加えたときにその変化が感じ取れたなら、200[g] に対して変化を感じ取るためには最低でも 10[g] を加える必要がある。もともと、ウェーバは重さの知覚の研究でこの法則を発見したが、他にも明るさ、音の大きさ、線の長さなどの多くの知覚量に適用できる

ことがわかっている。ただし、この法則はどんな範囲の刺激量に対して必ずしも成立するわけではない。刺激量が小さすぎたり大きすぎたりすればウェーバ比が変化することが知られている。

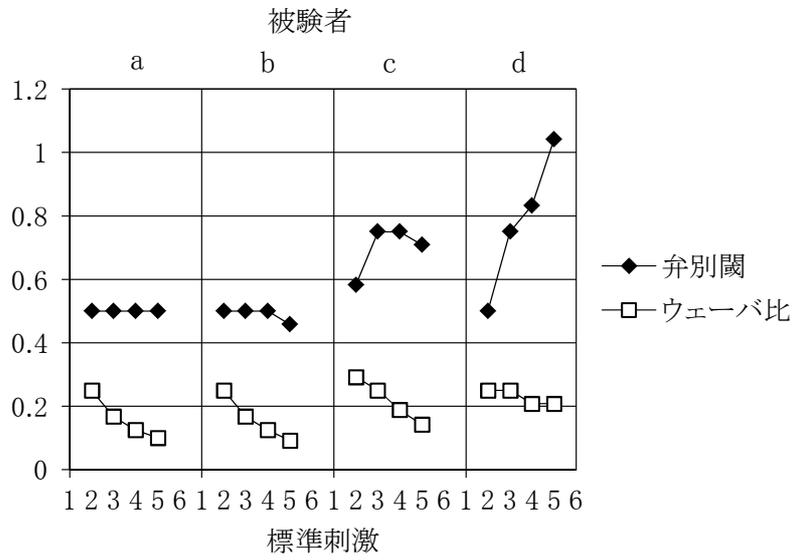
図 4.10 に被験者ごとの弁別閾とウェーバ比のグラフを示す。下の横軸は標準刺激を、上の横軸は被験者を表す。なお、前述したように標準刺激 1, 6 ではそれぞれ下限閾と上限閾が測定できないので弁別閾とウェーバ比も算出できない。弁別が完璧に行われた場合の弁別閾は 0.5 である (e.g. 標準刺激 3, 上限閾 3.5, 下限閾 2.5, では上弁別閾 = $3.5 - 3 = 0.5$, 下弁別閾 = $3 - 2.5 = 0.5$, 弁別閾 = $(0.5 + 0.5)/2 = 0.5$ となる)。

また、図 4.10(a) と図 4.10(b) の二つのグラフがあるが、図 4.10(a) は通常の「上限閾 - 標準刺激」「標準刺激 - 下限閾」という上下弁別閾から弁別閾を算出したが、図 4.10(b) は「| 上限閾 - 標準刺激 |」「| 標準刺激 - 下限閾 |」のように絶対値をとった上下弁別閾から弁別閾を算出した。これは上限閾 < 標準刺激 の際のように上下弁別閾が負の値を取る場合があり、このまま弁別閾を求めると正の値の上下弁別閾と打ち消しあってしまうことがある。例えば被験者 a の弁別閾を見ると図 4.10(a) では、直線になっているが、図 4.10(b) では増加傾向にある。まさに負の値と正の値で打ち消しあっているのである。そして二つのグラフを比較すると、当然であるが図 4.10(b) の方が全体的に弁別閾が大きい。さらに図 4.10(b) の弁別閾は、b 以外の被験者で標準刺激が増加するにつれて大きくなっている。したがって標準刺激の増加に伴い弁別閾が増加するという、ウェーバの法則の一部が成立しているようにも見える。ただ、呈示強度の客観量は線形に増加するが、これは座屈のポテンシャルエネルギーがほぼ完全に発揮できた場合であり、手と弾性帯との接触位置に関して呈示強度変化に応じた調整を施していない今回のような場合では、単に呈示強度が大きいときに持てるポテンシャルエネルギーが十分には伝達されなかった可能性もある。また、ウェーバ比はどちらのグラフでも下降傾向にあり、かつ被験者 b のように最大値と最小値との差が大きいときには 60% 程度あり、ウェーバ比が一定とは言い難い。

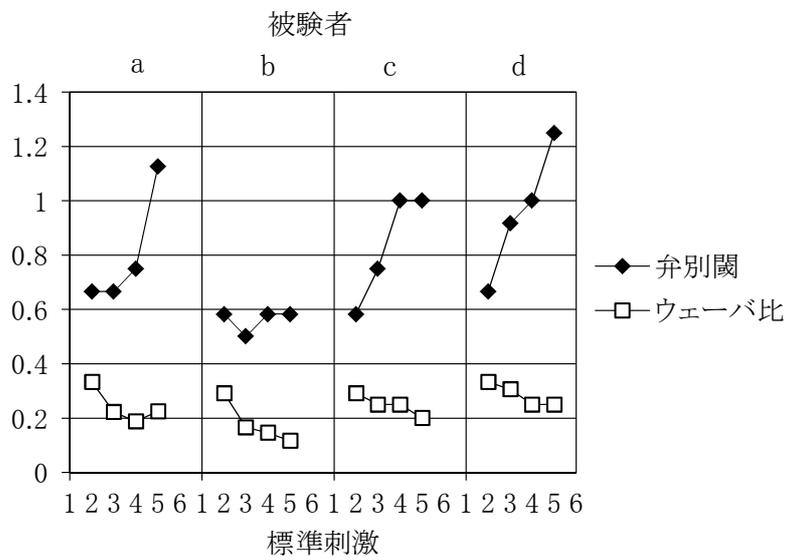
以上をまとめると呈示強度変化に対する感覚量において以下のことがわかった。

1. 実験で使用した条件では 3~4 段階の弁別が可能
2. ウェーバの法則が一部適用できる
 - (a) 標準刺激の増加に伴い弁別閾は増加傾向にある
 - (b) ただし、ウェーバ比は一定ではない

1. に関しては被験者数が 4 人なのでもっと多くの人数を対象とすれば、より弁別機能がよい人もいだろう。しかし弁別が 3 段階より少ないと考えにくい。呈示強度の最弱と最強とは明らかに違うし、その間に一つでも弁別できれば 3 段階になるのだから 2 段階しか弁別できないというのはまれであろう。また、弾性帯の幅や長さなど、装置の静的な条件を変更すれば、呈示強度の上限は引き上げることができるので、2. の弁別閾の増加傾向を克服してより良い弁別結果を期待できるだろう。そして、弁別性能の向上は触覚呈示装置としての表現の豊かさにつながるはずである。



(a) マイナスの上下弁別閾を含む場合



(b) 上下弁別閾の絶対値を採用した場合

図 4.10: 被験者ごとの弁別閾とウェーバ比のグラフ。

第5章 触覚呈示装置の応用例

実装した触覚呈示装置を基にいくつかのゲームアプリケーションを作成した。装置にはマウスや加速度センサを取り付け、入力機能を付与した。これにより、装置の上に手を置くという受動的な触覚だけでなく、手を動かしながら操作することでの動的な触覚運動知覚にも適用できると考えた。

5.1 障害物をよけるゲームアプリケーション

装置の呈示する感触をペナルティとして活用したゲームアプリケーションを作成した(図 5.1)。

障害物に接触しないように、マウスを統合した装置主要部で画面上の自機を移動させていく。自機が障害物に一定距離以内に接近すると装置が入力待ち状態になる。これはユーザへ圧迫感を与える効果を狙った。そして、障害物に接触すると座屈が生起する。この鋭い感触の呈示は、「ペナルティ」として自然な演出だと考えられる。

なおマウスは分解して箱型フレームの底面に装着しており、マウスのクリックボタンは基盤から導線を引き出し、箱の側面にタクトスイッチを付けることで使用できるようにしてある。

5.2 飛んでくる球をよけるゲームアプリケーション

飛んでくる球をよけるゲームアプリケーションを作成した(図 5.2)。計算機の画面上に画面奥から球が自機に向かって飛来してくるよう描画される(図 5.2 右下図)。自機は装置に取り付けた加速度センサ(株式会社秋月電子通商 KXM52-1050)によって操作する(図 5.2 左下図)。球が自機にあたると座屈を生起させるが、このとき球の速度に応じて、呈示強度を変化させる。つまり、拳の部分に弾性帯をあてることで球の速度に応じた鋭い感触をダメージとして触覚に呈示する。従来の単なる振動呈示とは異なり、ものが高速であたったという感触をそれらしく演出できると考えられる。

また、手を動かしながら操作するため、皮膚感覚だけでなく深部感覚にも影響を与えていると考えられる。これよりさらに深部感覚への刺激を強めるなら、手で球を弾き返すような動作をし、その際の反動を呈示するようにするといった方法が考えられる。この「手で何かを弾き返す」「何かを叩く」といった行為はある意味、「手で自由に触ることで対象を知覚する」という触覚運動知覚に含まれると言える。例えば、バレーボールとビーチホールとでは弾き返した感触は全く違う。したがって「殴る」や「叩く」といった行為も触覚運動知覚と言える。本

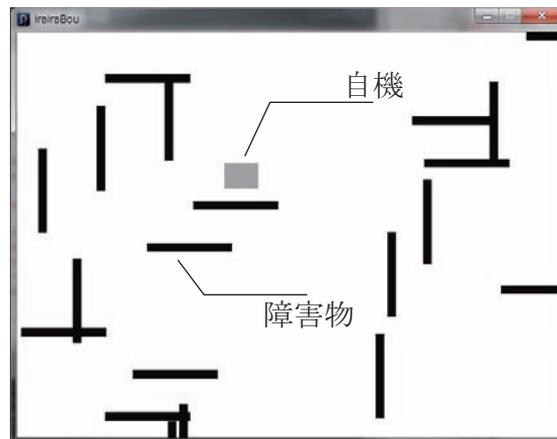
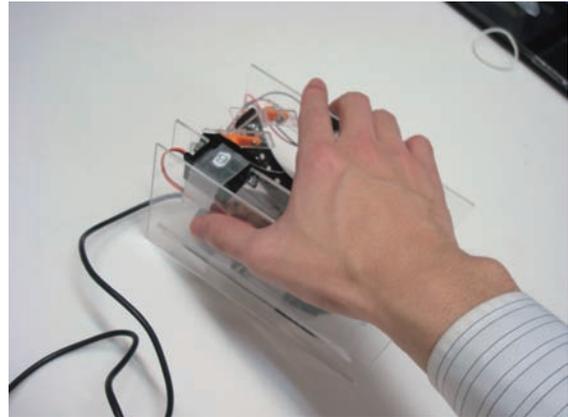
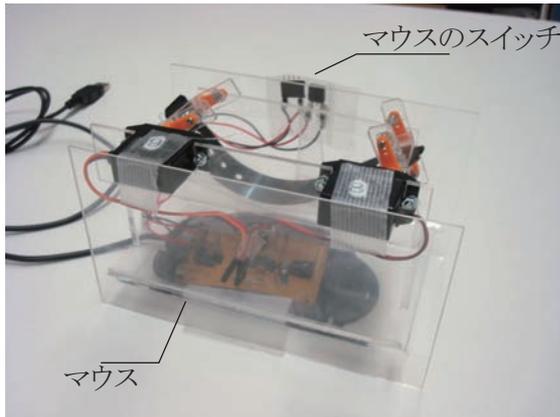


図 5.1: 「電流イライラ棒」を模したゲーム．自機が棒に当たると座屈を生起させる．左上図：マウスを統合した装置の外観．右上図：実際に操作している様子．下図：ゲーム画面．

研究の対象は皮膚感覚のみであったが，この点を突き詰めていけば，皮膚感覚と力覚を協調して用いる触運動知覚にも応用できると考える．

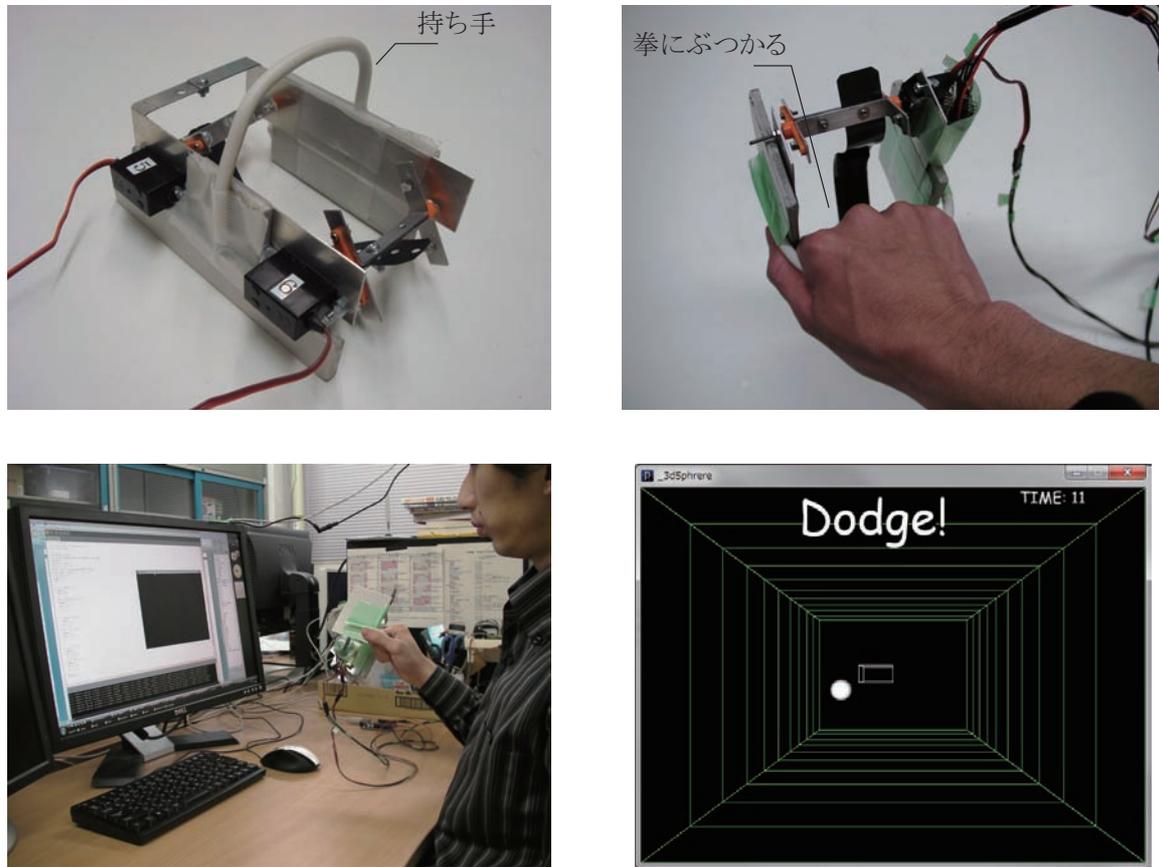


図 5.2: 飛来する球をよけるゲームアプリケーション．左上図：持ち手をつけた装置．左下図：操作している様子．右上図：弾性帯の接触位置．右下図：ゲーム画面

第6章 結論

本研究では、鋭い感触の呈示手法として弾性帯の飛び移り座屈機構を用いた装置を実装した。この装置はサーボモータの回転制御により、客観的な呈示強度を線形に変化させることに成功し、感覚量の評価実験では呈示強度の3~4段階の弁別が確認された。また、応答速度は約0.1[sec]、繰り返し周期は410[msec]であった。

そして、マウスや加速度センサを統合した装置を用いたゲームアプリケーションを作成した。一つは、設定された課題に対してミスをした際に鋭い感触を呈示することで「ペナルティ」を演出した。もう一つは飛んでくる球をよけるゲームであり、球の速度に応じて強度を変化させることで、球がぶつかった際の感触をそれらしく演出できたと考えられる。また、単なる受動的な呈示方法だけでなく、手を動かしながら使うという能動的な呈示方法により、皮膚感覚のみの触覚知覚に限定されず、皮膚感覚と深部感覚とを協調して用いる触運動知覚行為への可能性を示した。

謝辞

本研究を行うにあたり，指導教員である高橋伸准教授には丁寧なご指導と多大なご助言を頂きました．無事に論文を執筆できたのは先生のご指導のおかげです．厚く御礼申し上げます．

田中二郎教授をはじめとする，三末和男准教授，志築文太郎講師，Simona Vasilache 助教には，研究室全体での発表練習や英文校正など，数多くの場面で適切な指導と貴重なご意見を頂きました．大矢晃久准教授には副査を引き受けて頂きました．装置に実装に関して，動作機構では望山洋准教授に，金属加工ではシステム情報工学研究科装置開発班の技官の方々にご助力頂きました．皆様に心より感謝を申し上げます．

また，研究室の皆様にはチームの垣根を超え，研究について議論を交わしたり，食事を一緒にしたりと研究室生活を共に歩め大変うれしく思います．ここに日頃の感謝の意を表したいと思います．

そして，家族には金銭面，精神面にとともに多大なご援助を頂きました．本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] 前野隆司. ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000.
- [2] T H Massie. Virtual touch through point interaction. *Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'96)*, 1996.
- [3] T H Massie and J K Salisbury. *The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects*, Vol. 55, pp. 295–300. ASME, 1994.
- [4] Laroussi BOUGUILA, Yi CAI, and Makoto SATO. New haptic device for human-scale virtual environment: Scaleable-spidar. *Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'97)*, pp. 93–98, 1997.
- [5] P. Lemmens, F. Cromptvoets, D. Brokken, J. van den Eerenbeemd, and G.-J. de Vries. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. In *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pp. 7–12, 2009.
- [6] TN Games. Fps gaming vest. <http://tngames.com/products>.
- [7] iRoboticist. Tactile gaming vest. <http://iroboticist.com/2010/03/26/tgv/>.
- [8] T. Tsuda, H. Mochiyama, and H. Fujimoto. A compact kick-and-bounce mobile robot powered by unidirectional impulse force generators. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3416–3421, 2009.
- [9] 岩村吉晃. タッチ 神経心理学コレクション . 株式会社 医学書院, 2001.
- [10] 梶本裕之. 触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ. PhD thesis, 東京大学大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻, 2004.
- [11] 東山篤規, 谷口俊治, 宮岡徹, 佐藤愛子. 触覚と痛み. 株式会社おうふう, 2009.
- [12] 篠田裕之. 皮膚デバイス技術の応用事例. 計測と制御, Vol. 47, No. 7, pp. 611–615, 2008.
- [13] Takuya Maekawa, Yuichi Itoh, Keisuke Takamoto, Kiyotaka Tamada, Takashi Maeda, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino. Tearable: haptic display that presents a sense of tearing

- real paper. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '09, pp. 27–30, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [14] 小島雄一郎, 橋本悠希, 梶本裕之. 鉛筆削りに着目した触覚的心地良さ提示デバイス. *エンターテインメントコンピューティング* 2008, 2008.
- [15] 國安裕生, 福嶋政期, 古川正紘, 梶本裕之. 液体を注ぐ際の心地よさに着目した触覚ディスプレイの提案. *エンタテインメントコンピューティング* 2010, 2010.
- [16] Rory McCloy and Robert Stone. Virtual reality in surgery. *British Medical Journal(BMJ)*, Vol. 323, No. 7318, pp. 912–915, 10 2001.
- [17] 嵯峨智, 川上直樹, 舘暲. 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究(「複合現実感3」特集). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 10, No. 3, pp. 363–369, 2005.
- [18] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [19] 應和春香, 佐賀野正行, 吉村康弘, 小村仁美, 山崎仁之, 渡邊大輔, 仲野嘉信, 白澤卓, 辻村壮史, 川嶋賢二, 福嶋昌子, 井村誠孝, 千原國宏. Invisible : 影を追う者(特集 アート&エンタテインメント 2). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 15, No. 3, pp. 315–324, 2010.
- [20] 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 鍵山善之, 大城理. 空間透明型電気触覚ディスプレイの開発と道具操作支援への応用. *生体医工学*, Vol. 49, No. 1, pp. 54–61, 2011.
- [21] Fabian Hemmert, Susann Hamann, Matthias Löwe, Josefine Zeipelt, and Gesche Joost. Weight-shifting mobiles: Two-dimensional gravitational displays in mobile phones. In *CHI'10: Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 10–15, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [22] Sidhant Gupta, Tim Campbell, Jeffrey R. Hightower, and Shwetak N. Patel. Squeezeblock: using virtual springs in mobile devices for eyes-free interaction. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '10, pp. 101–104, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [23] Yuichiro Sekiguchi, Koichi Hirota, and Michitaka Hirose. Haptic interface using “estimation of box contents ” metaphor. *Proceedings of the 13th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'03)*, 2003.
- [24] 株式会社エー・アール・アイ. 映像と振動体感システム : bassshaker. <http://www.ari-web.com/aurasound/bassshaker/index.htm>.

- [25] 大島沙也佳, 橋本悠希, 渡邊淳司, 梶本裕之. 仮現運動を利用した“ばっさり感”提示の研究. 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, 2007.
- [26] 和宇慶朝邦. 携帯電話の触覚呈示用アクチュエータの触覚デザイン: アクチュエータの触覚デザインの現状と今後について. 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 156–159, 2009.
- [27] Shogo Okamoto, Masashi Konyo, Satoshi Saga, and Satoshi Tadokoro. Detectability and perceptual consequences of delayed feedback in a vibrotactile texture display. *EEE Trans. Haptics*, Vol. 2, pp. 73–84, April 2009.
- [28] 松井信也, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 直動式ソレノイドを用いた撃力提示デバイス. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 8, pp. 29–32, 2003.