

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	岸野 博明	学籍番号	1250011
論文題目	錯触覚による硬軟感提示における視覚刺激の検討		
<p>要 旨</p> <p>人間にとって触覚は非常に重要な感覚である。現実世界において、人間は周囲に存在する物体の特性を知るために手を用いて対象物体を掴み、物体の材質や形状、硬さや重さなどを触覚として知覚する。このような触覚情報をバーチャルな環境とのインタラクションに用いるため、様々な触力覚ディスプレイが研究・開発されている。</p> <p>触力覚ディスプレイは接地型と非接地型に大別でき、PHANToM や SPIDAR などのデバイスが開発されているが、これらの多くは力の正確な再現を動作原理としており、精度や分解能を向上させるためにはワイヤなどによって構成される機構が複雑になるというトレードオフの関係にある。そのため、手術シミュレータやロボットの遠隔操作など限られた用途への応用にとどまっている。</p> <p>これに対し本研究では錯触覚を利用することで、ユーザに触力覚提示を行う手法に着目した。錯触覚による触感覚は、力の再現をコンセプトとしたデバイスに比べて微弱なものしか発生させることができないという欠点はあるが、デバイス構成が簡素になるという利点もある。</p> <p>錯触覚の中でも、視覚刺激によって触覚的な知覚が生起される現象を視覚誘導性錯触覚と呼ぶ。これは、ユーザの動作に対して適切にコントロールされた視覚刺激を提示することにより、錯触覚を生起させるものである。木村はこの手法を用いた非接地型の錯触覚提示システムとして、把持動作を利用した硬軟感提示手法を提案した。これは小型ディスプレイの側面に圧力センサを設置し、手中のディスプレイ上に握力に応じた視覚刺激を提示することで、ユーザに硬軟を知覚させるものである。</p> <p>本論文では、木村が開発したハンドヘルド型錯触覚提示システムにおける視覚刺激と現実世界との差分に着目し、</p> <ol style="list-style-type: none">(1) 矩形に対して力を及ぼしている要素(2) 矩形の変形形状 <p>の2点について新たな視覚刺激を作成し、検証実験を通して硬軟感知覚への影響を評価する。</p>			

平成 25 年度修士論文

錯触覚による硬軟感提示における視覚刺激の検討

大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1250011
氏 名 : 岸野博明
主任指導教員 : 野嶋 琢也 准 教 授
指 導 教 員 : 小池 英樹 教 授
指 導 教 員 : 工藤 俊亮 准 教 授
提出年月日 : 平成 26 年 2 月 21 日(金)

目次

第1章 序論.....	1
1.1. 背景.....	1
1.2. 本論文の目的.....	4
1.3. 本論文の構成.....	5
第2章 関連研究.....	7
2.1. 力を作用させるディスプレイ.....	7
2.1.1. 力覚フィードバックによる硬軟感提示.....	8
2.1.2. 硬さが変化可能なディスプレイ.....	10
2.2. 錯触覚.....	14
2.2.1. ベルベットハンドイリュージョン.....	15
2.2.2. サーマルグリルイリュージョン.....	16
2.2.3. ファントムセンセーション.....	17
2.3. 視覚誘導性錯触覚.....	18
2.3.1. 重さに関する錯触覚.....	18
2.3.2. 凹凸感に関する錯触覚.....	20
2.3.3. 物体形状に関する錯触覚.....	22
2.3.4. 硬軟感に関する錯触覚.....	24
2.4. 関連研究との差異および本研究の位置付け.....	29

第3章	ハンドヘルド型錯触覚提示システムとその問題点.....	31
3.1.	デバイス構成.....	31
3.1.1.	入出力デバイス.....	32
3.1.2.	制御用マイコン.....	33
3.2.	視覚刺激の生成.....	35
3.3.	ハンドヘルド型錯触覚提示システムのまとめ.....	41
3.4.	視覚刺激による硬軟感知覚への影響.....	43
3.4.1.	変形する矩形に対して力を及ぼしているものの表示.....	43
3.4.2.	矩形の変形形状.....	46
3.4.3.	問題点の検討.....	47
第4章	指マーカを追加した視覚刺激による比較実験.....	48
4.1.	比較対象となる実物体.....	48
4.2.	指マーカを追加した視覚刺激.....	51
4.2.1.	視覚刺激のパターン.....	52
4.3.	実験手順.....	53
4.4.	実験結果.....	55
4.5.	考察.....	58
第5章	変形形状を変化させた視覚刺激による比較実験.....	59
5.1.	変形形状を変化させた視覚刺激.....	60
5.1.1.	視覚刺激のパターン.....	60
5.2.	実験手順.....	62
5.3.	実験結果.....	64
5.4.	考察.....	67

第6章 考察.....	68
6.1. 指マーカによる硬軟感知覚への影響	68
6.2. 変形形状による硬軟感知覚への影響	69
6.3. 総評	70
6.4. 今後検討すべき事項	71
6.4.1. 視覚刺激の検討	71
6.4.2. 提示デバイスに関する検討	73
6.4.3. その他検討すべき事項.....	74
第7章 結論.....	77
参考文献.....	79
付録.....	84
謝辞.....	93
発表文献.....	95

図目次

図 1.1	システムの概要	4
図 2.1	デバイス概観	9
図 2.2	接触面積制御部 ((a)構造, (b)外観, (c)力覚提示装置に装着した状態)9	
図 2.3	システム構成	10
図 2.4	ClaytricSurface (図左: 表面が軟らかいとき, 図右: 表面が硬いとき).11	
図 2.5	デバイス構成	12
図 2.6	Hedgehog による硬軟提示の様子	12
図 2.7	SqueezeBlock	13
図 2.8	デバイス構成	14
図 2.9	ベルベットハンドイリュージョン	15
図 2.10	デバイス概要	16
図 2.11	絵に対する温度マップ	16
図 2.12	貫通感提示システム	17
図 2.13	重量感提示システム	19
図 2.14	凸提示の概要	21
図 2.15	凸感覚の提示パターン	22
図 2.16	物体の形状変化の提示	23
図 2.17	システムを体験する様子	23
図 2.18	ピストンを用いた硬軟感提示システム (左: 提示デバイス, 右: 視覚刺激).....	24
図 2.19	押し込みによる硬軟感錯触覚提示システムの構成.....	25

図 2.20	ユーザによる体験の様子	26
図 2.21	システム概要図	27
図 2.22	CG のひずみモデル	27
図 2.23	Kooboh.....	28
図 2.24	システム概要図 (左: 提示デバイス, 右: 振動刺激生成手順).....	29
図 3.1	デバイス構成.....	32
図 3.2	握力測定に用いる圧力センサ	33
図 3.3	プロトタイプシールド.....	34
図 3.4	デバイスに力を加えた際の視覚刺激の様子	35
図 3.5	ばね定数の値による視覚刺激の違い (ただし $A > B > C$).....	37
図 3.6	デバイスにかかる圧力を計測するためのセンサ	38
図 3.7	ゲイン調節ダイヤルによるばね定数の設定例	39
図 3.8	視覚刺激の提示パターン	40
図 3.9	ハンドヘルド型錯触覚提示システムのサイクル	42
図 3.10	現実世界における物体の変形	44
図 3.11	手の表示 ((a)画像処理前, (b)画像処理後)	45
図 3.12	バーチャルフィンガーによる硬軟感提示	45
図 3.13	物体変形時の力分布(イメージ).....	46
図 4.1	実物体の変形の様子.....	49
図 4.2	実物体の概要	49
図 4.3	本実験で使用した実物体.....	50
図 4.4	指マーカを追加した視覚刺激 (ただし, $S1 < S2 < S3$).....	51
図 4.5	使用する視覚刺激のパターン	52

図 4.6	実験概要図.....	54
図 4.7	指マーカの有無による各被験者の実験結果.....	55
図 4.8	各視覚刺激の回答結果.....	56
図 4.9	各視覚刺激の回答結果(詳細).....	57
図 5.1	変形形状を変化させた視覚刺激.....	60
図 5.2	本実験で使用した視覚刺激のパターン.....	61
図 5.3	実験手順概要図.....	63
図 5.4	各被験者の正答数.....	64
図 5.5	各視覚刺激の正答数.....	65
図 5.6	ダミーに対する回答結果.....	66

第1章

序論

本章では本研究の背景，本論文の目的及び概要について記述する．

1.1. 背景

人間にとって触覚は非常に重要な感覚である．現実世界において，人間は周囲に存在する物体の特性を知るために手を用いて対象物体を掴み，物体の材質や形状，硬さや重さなどを触覚として知覚する．このような触覚情報をバーチャルな環境とのインタラクションに用いるため，様々な触力覚ディスプレイが研究・開発されている．

触力覚ディスプレイは，接地型と非接地型(装着型)に大別できる．PHANTOM[1]やSPIDAR[2]のような接地型の触力覚ディスプレイでは地面を支点とし，モータやワイヤによって手との接触点であるペンやボールが駆動されるため，手に対する力を正確に再現できる．しかし地面への固定が必要であるため，ポータブルあるいはウェアラブルにすることは難しい．一方で，CyberGrasp[3]やRutgers Master[4]のような，非接地(装着)型のものも開発されている．前者はグローブの各指に取り付けられたワイヤを，後者は空気圧アクチュエータを制御することで指腹部への反力を

コントロールし，指先に力を提示するものであるが，デバイスの重量やグローブの脱着が煩雑であるなどの問題がある．また，これらのデバイスの多くはアクチュエータによる力の正確な再現を動作原理としており，精度や分解能を向上させるためには，ワイヤなどによって構成される機構が複雑になるというトレードオフの関係にある．そのため，手術シミュレータやロボットの遠隔操作など限られた用途への応用にとどまっている．

これに対し本研究では，触覚における錯覚(以下，錯触覚)を利用することで，ユーザに触力覚提示を行なう手法に着目した．錯触覚とは，いわゆる錯覚として触覚的な知覚が生起される現象のことである．この現象を利用した触力覚ディスプレイとしては，例えば雨宮らのぶるナビがある[5]．これは刺激認知の非線形性を利用し，急激な加速度と知覚閾値以下の加速度を交互に組み合わせることで，非対称的な加速度パターンを生成し，急激な加速度が生じている方向へ引っ張られているような感覚を提示するデバイスである．この手法は，実際の現象とは物理的に異なる現象に錯覚を生じさせることで，意図した力覚提示を行っている．この錯触覚による触力覚提示手法の特徴として，力の正確な再現をコンセプトとした触力覚ディスプレイに比べて，デバイス構成が簡素になるという点が挙げられる．

錯触覚の中でも，視覚刺激によって触覚的な知覚が生起される現象を視覚誘導性錯触覚(Pseudo-haptic, visuo-haptic 等)と呼ぶ．これは，ユーザの動作に対して適切にコントロールされた視覚刺激を提示することにより，錯触覚を生起させるものである．この手法は，ユーザの動作を計測する装置(マウスやカメラ，圧力センサなど)と，ディスプレイ等の視覚情報を提示する装置のみで触覚提示が可能であるという特徴がある．すなわち，これまでに紹介した触力覚ディスプレイと違い，物理

的な力や代替となる振動などを用いずに触覚提示を行うことができる。例えば Lécuyer らはマウスとディスプレイを用いて、ディスプレイに表示された画像の凹凸感を提示する手法を提案している[16]。また、Ban らは物体を指でなぞる動作を観察し、画像処理によってなぞっている物体と手指の位置を変化させて提示することで、物体形状が変化したように感じられることを報告している[17]。

他方、視覚誘導性錯触覚による硬軟感提示手法についてもいくつか提案されている[18][19]。しかし、従来の提示手法は物体を押し込む動作に対して視覚刺激を提示するものであり、錯触覚を効果的に提示するために手指と映像を視覚的に分離するものや、手指周辺に CG を重畳するために接地型のシステム構成となっていた。これに対し、木村は非接地型の錯触覚提示システムとして、把持動作を利用した硬軟感提示手法の提案を行い、提案手法を実現するプロトタイプシステムを開発している[6]。これは小型ディスプレイを握った際に、手中のディスプレイ上に握力に応じた視覚刺激を提示することで、デバイスの硬さが変化したとユーザに知覚させるものである。この手法は非接地型のシステム構成であり、手指と映像を分離することなく錯触覚提示を行なうことができる。木村はプロトタイプシステムを用いて、任意の被験者に対して錯触覚による硬軟感提示が可能であることを確認し、デバイスの素材などによる知覚への影響について調査を行ってきた[7]。しかし、視覚誘導性錯触覚による触覚提示において影響の大きい要素の一つである視覚刺激については、1種類の視覚刺激による影響しか評価していない。

本論文では、木村が開発したハンドヘルド型錯触覚提示システムにおける視覚刺激と現実世界における物体の変形との差分に着目し、視覚刺激が硬軟感知覚に与える影響について調査したため記述する。

1.2. 本論文の目的

ハンドヘルド型錯触覚提示システムにおける視覚刺激は単色の矩形画像を用いており，握力に応じて矩形全体が拡張するものとなっている(図 1.1)．しかしながら，従来の視覚刺激には錯触覚を提示する上でいくつかの問題点が考えられる．そこで，本論文ではシステムにおける視覚刺激の改良を目的とする．

具体的な手法としては，

- 矩形に対して力を及ぼしている要素
- 矩形の変形形状

以上の二点について新たな視覚刺激を作成し，視覚刺激による矩形の変形と現実世界における物体の変形との差分を軽減することで，より効果的に錯触覚提示を行えるか，検証実験を通して明らかにする．

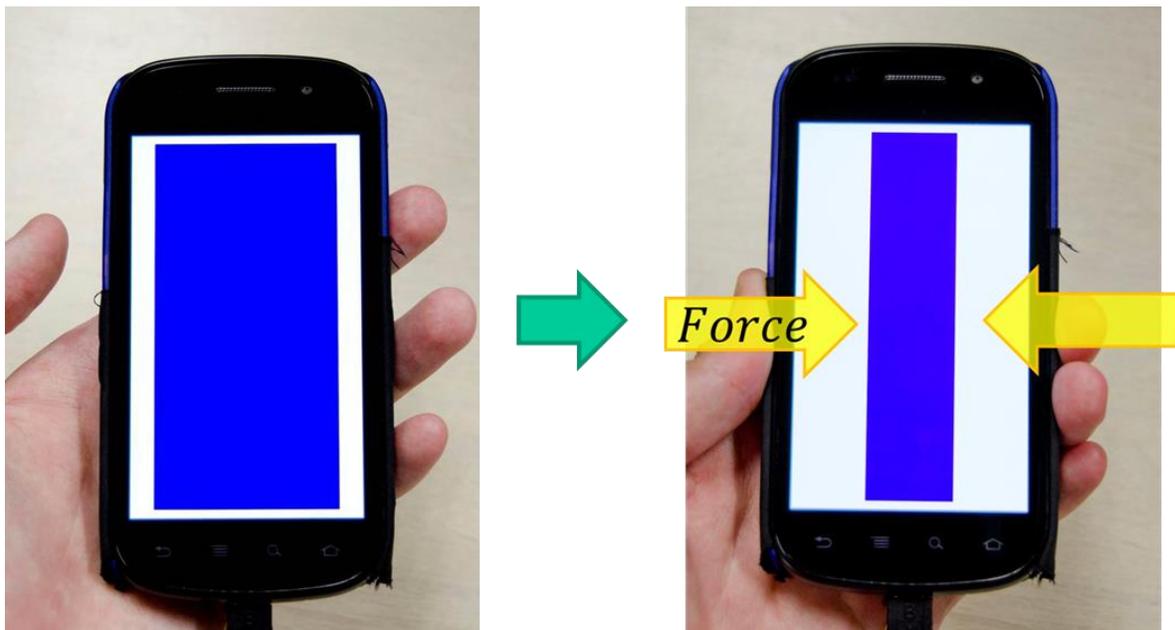


図 1.1 システムの概要

1.3. 本論文の構成

本論文は以下の章により構成される。

第2章 関連研究

本研究に関連する、硬軟感を提示するシステムに関する研究について、従来型の触力覚ディスプレイおよび錯触覚による提示手法についての研究を紹介する。また、本研究と関連研究との差異を述べる。

第3章 ハンドヘルド型錯触覚提示システムとその問題点

木村によって開発されたシステムについて、デバイス構成などの概略を説明する。また、現行のシステムにおける視覚刺激の問題点を整理し、本論文で提案する視覚刺激の概要を説明する。

第4章 指マーカを追加した視覚刺激による硬軟感知覚への影響

第3章で検討した問題点のうち、矩形に対して力を及ぼしている要素について検討を行い、作成した視覚刺激による硬軟感知覚への影響についての評価実験の結果を示す。

第5章 変形形状を変化させた視覚刺激による硬軟感知覚への影響

第3章で検討した問題点のうち、矩形の変形形状について検討を行い、作成した視覚刺激による硬軟感の影響についての評価実験の結果を示す。

第6章 考察

第4章および第5章で得られた実験結果から，本研究で提案した視覚刺激についての考察と，今後改善または検証すべき点を記述する．

第7章 結論

本論文で提案した視覚刺激による硬軟感知覚への影響についての結論と今後の展望について記述する．

第2章

関連研究

硬軟感を提示する手法としては、大きく分けて実際に『力』を発生させる触力覚ディスプレイを用いるものと、錯触覚を利用したものが挙げられる。本章では硬軟感を提示する研究として、まず従来型の触力覚ディスプレイによる手法について紹介する。その後、本研究と関わりの深い視覚誘導性錯触覚に関する研究について紹介する。

2.1. 力を作用させるディスプレイ

従来の触力覚ディスプレイを用いた硬軟感提示手法は、これまで多くの研究者により様々な提案が行われてきた。本節では、以下の2種類の手法に大別し、それぞれの研究例を紹介する。

- ユーザに対して力覚フィードバックを行なうことで、硬軟感を提示する手法
- 硬さが変化可能なディスプレイを制作し、ユーザが触れることで硬軟感を提示する手法

2.1.1. 力覚フィードバックによる硬軟感提示

力覚フィードバックによる手法は PHANToM[1]や SPIDAR[2]などの接地型ディスプレイと, CyberGrasp[3]や Rutgers Master[4]などの非接地(装着)型ディスプレイに大別できる. これらのデバイスは, アクチュエータによって実際に力を発生させることでユーザに触力覚を提示するものとなっている. その中でも, 物体把持時の硬軟感提示に着目したものとして池田らが開発した装着型ディスプレイがある[8]. これは図 2.1 のように, 力覚提示が可能なグローブの示指及び拇指部分に指先接触面積を制御する装置が装着されている. 指先接触面積の制御機構はアクリル板とゴム膜によって構成されており(図 2.2), ゴム膜内部の空気圧を変化させることによって接触面積の制御を実現している. システムはまず, ポテンションメータから指先位置を取得して対象物体との接触を判定し, ばねモデルを用いて指先への反力を算出するとともに, 接触面積は反力からヘルツ理論を用いて算出する. これらの結果から, モータによって反力の提示を行うと同時に, エアコンプレッサによって接触面積制御部を膨らませることで, 把持動作を行なうユーザに対して軟らかさを提示することが出来る(図 2.3). しかし, 指先の接触面積を計算するためにユーザの指のモデルが必要であり, 個体差に応じて指モデルの再計算を行わなければならない.

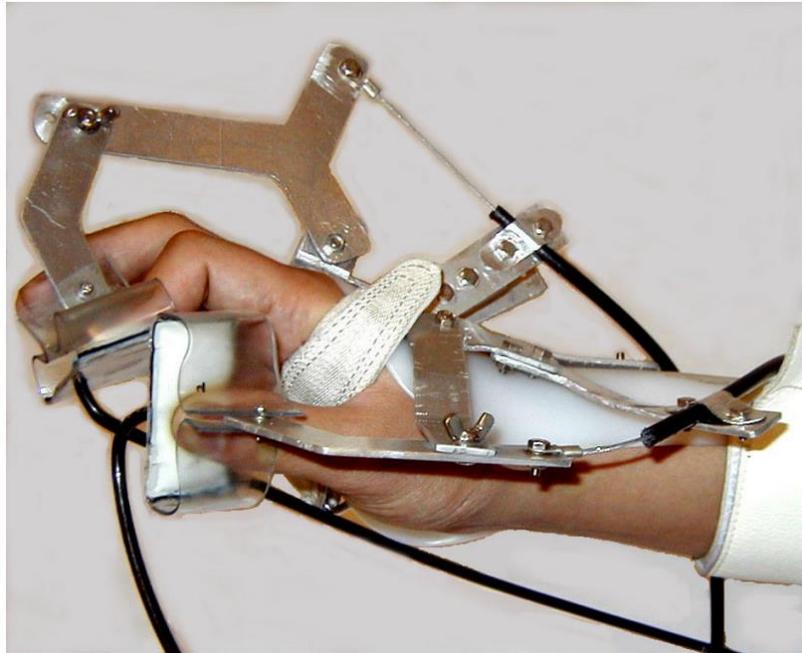


図 2.1 デバイス概観

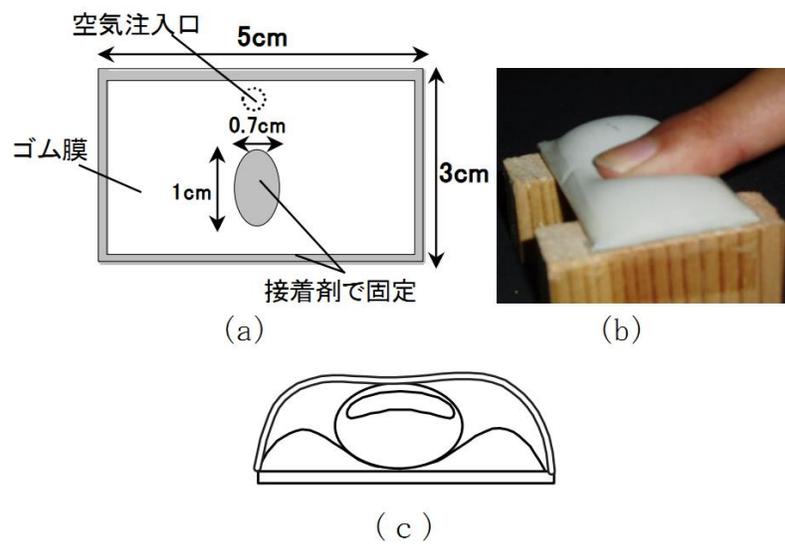


図 2.2 接触面積制御部

((a)構造, (b)外観, (c)力覚提示装置に装着した状態)

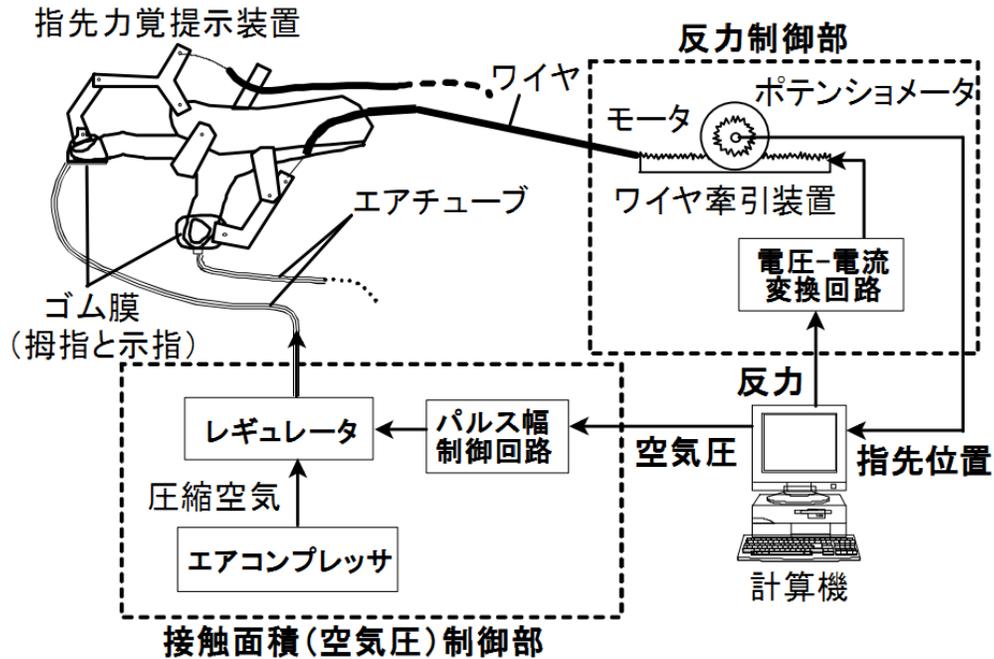


図 2.3 システム構成

2.1.2. 硬さが変化可能なディスプレイ

的場らは、ディスプレイ表面の硬さを動的に変化可能な ClaytricSurface を提案している[9]。これは、発泡ポリスチレンビーズのような細かい粒子素材を気密性・柔軟性の高い素材に密閉したものをディスプレイとして用いており、ディスプレイ内部の気圧を制御することで、硬さを変化させている(図 2.4)。

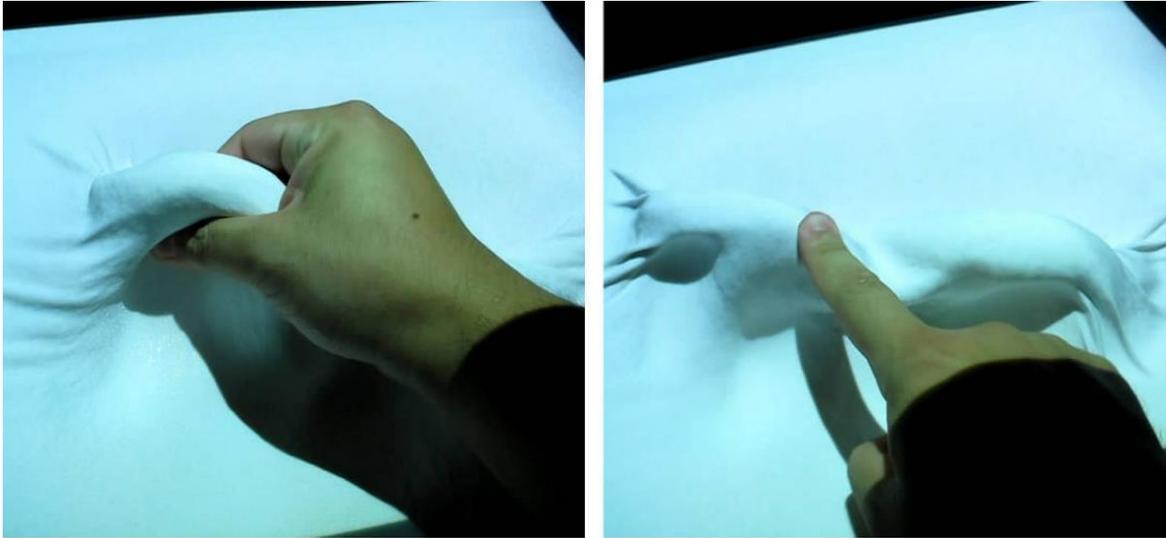


図 2.4 ClaytricSurface

(図左: 表面が軟らかいとき, 図右: 表面が硬いとき)

菰池らは Hedgehog と呼ばれる毛状の硬軟感提示ディスプレイを開発している [10]. ディスプレイの構成要素として図 2.5 のように, 糸にビーズとシリコンゴムを交互に通して接続形状の毛をディスプレイ表面に敷き詰め, ソレノイドによって糸を引っ張ることで, 毛一本一本の硬さを変化させている. 糸を引っ張っていない場合, 図のように毛は軟らかく, 寝ている状態となるが, 強く引っ張ることでビーズとシリコンゴムが密着した状態になるため, 毛は直立し硬くなる(図 2.6).

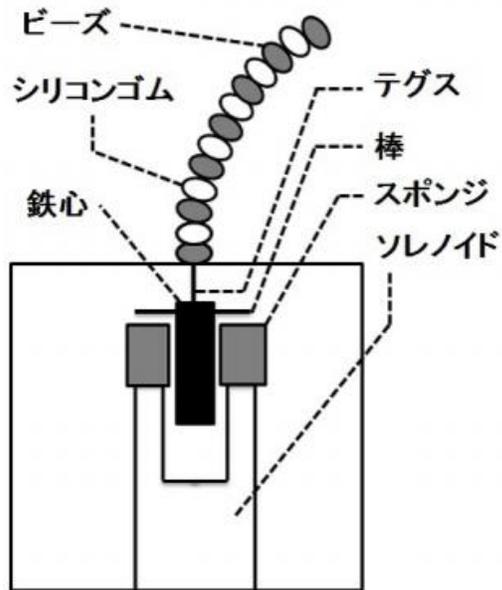


図 2.5 デバイス構成

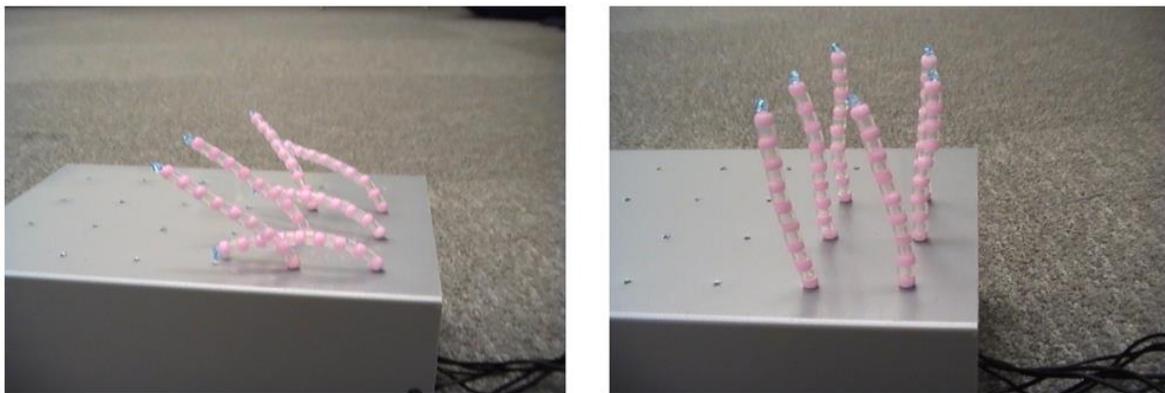


図 2.6 Hedgehog による硬軟提示の様子

Gupta らは SqueezeBlock と呼ばれる把持型のデバイスを開発している[11](図 2.7). これは図 2.8 に示すように, 小型のモータやギア, 力センサで構成されており, センサから得られた値を基にモータとギアを制御することで, デバイスの硬軟感を提示するものである. 変形方法はフックの法則に従っており, 設定したばね定数によって, デバイスの硬さを任意に変化させることが出来る.



図 2.7 SqueezeBlock

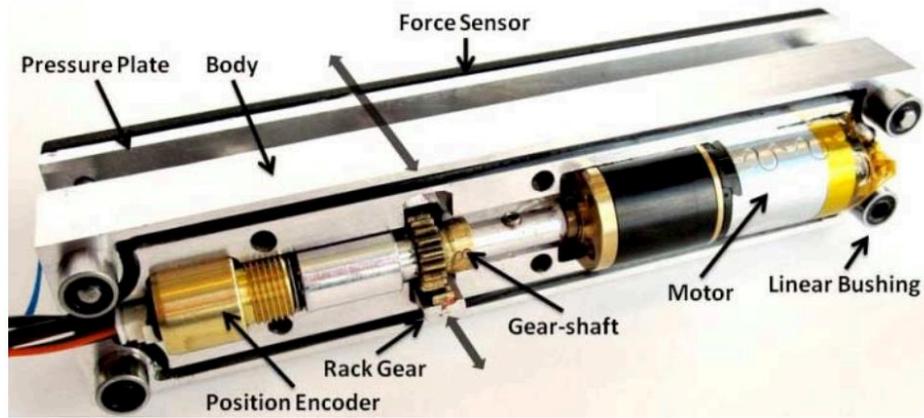


図 2.8 デバイス構成

2.2. 錯触覚

錯触覚とは、触覚における錯覚現象のことである。錯覚というと、だまし絵や錯視などと呼ばれる、視覚に関する錯覚現象が広く知られている。例えば『静止画であるはずだが、動いているように見える』ものや『同じ長さであるはずだが、違う長さに見える』ものなど、これまでに数多くの現象が発見されている[12]。錯触覚もこの現象と同様に『物体の重さは変わっていないはずだが、重くなったように感じる』ものや、『物体の硬さは変わっていないはずだが、軟らかくなったように感じる』ものなどのように、ある環境下において視覚的な刺激や振動などを提示することで、錯覚として触力覚が生起する現象である。

この錯触覚の一つに視覚誘導性錯触覚がある。これは、視覚刺激によって錯触覚が生起されるものであり、アクチュエータによる力の再現や、力の代替となる振動を用いずに触覚提示をすることができる。

本節ではまず、錯触覚について代表的な事例を紹介する。その後、本研究に関わ

りの深い視覚誘導性錯触覚について説明し、いくつかの触覚提示手法について紹介する。また、硬軟感については振動による錯触覚提示の研究も紹介する。

2.2.1. ベルベットハンドイリュージョン

ベルベットハンドイリュージョンとは、一辺が 50[mm]程度の六角形パターンの金網を両手で挟んで前後にこすることで、金網の当たっていない手と手の間に、ベルベットに触れたときのような感覚が生起されるという現象である[32](図 2.9)。この現象は網の目のパターンではなく、運動方向に対して垂直な2本の線を用いて発生することが報告されており、錯触覚が生起される条件や現象の解明が現在も続けられている[33]。



図 2.9 ベルベットハンドイリュージョン

2.2.2. サーマルグリルイリュージョン

サーマルグリルイリュージョンとは、皮膚上に温刺激と冷刺激を近距離で同時に提示すると痛覚や灼熱感が知覚されるという現象である[34]。この現象は皮膚に損傷を与えない温度でも痛覚の生起が可能であるという特徴があり、串山らはこの現象を利用した触力覚ディスプレイ「Thermo-Drawing」を開発している[35]。これは図 2.10 のように、電流によって冷温を制御することのできるペルチェ素子によって構成されており、ユーザが描画から冷温のマップを作成し、提示するものである(図 2.11)。

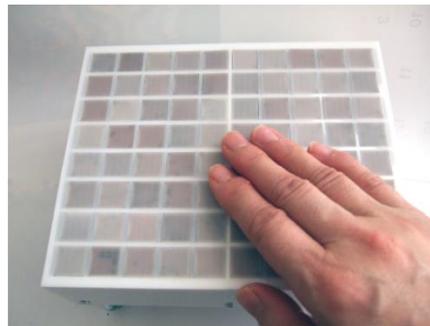


図 2.10 デバイス概要

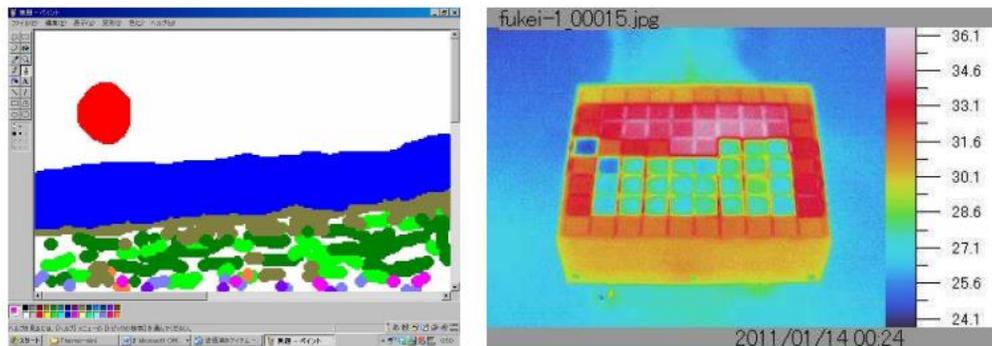


図 2.11 絵に対する温度マップ

2.2.3. ファントムセンセーション

ファントムセンセーションとは、皮膚上の異なる2点に振動刺激を同時に提示すると、振動刺激間に物理的には提示されていない刺激を知覚する現象である[30]。また、この現象は振動の強度を変化させることで知覚する位置が変化するという特性があり、石井らはこの現象を利用して、手掌部を物体が貫通する感覚を提示するシステムを開発している[31]。これは、図 2.12 のように手の平と手の甲に振動子を装着し、手の平から手の甲へ刺激の知覚される位置を変化させることで、物体が貫通したような感覚を提示するものである。

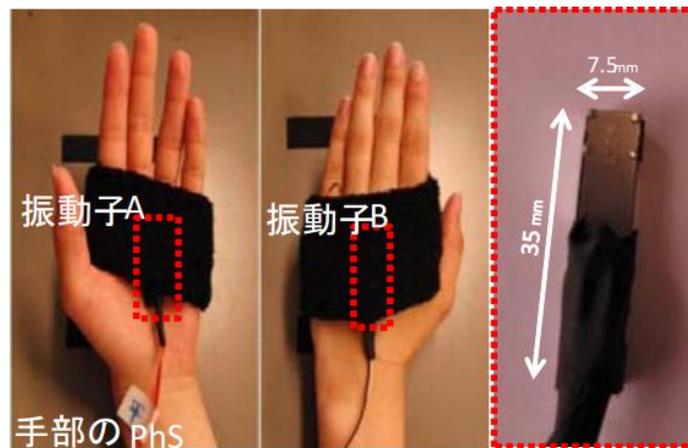


図 2.12 貫通感提示システム

ここまでで紹介した錯触覚は、触覚に対して特定の刺激を与えることで、与えた刺激とは物理的に異なる知覚が生起されるものだった。これらの現象は現在も発生要因の解明が進められるとともに、現象を利用した触力覚ディスプレイが開発されている。これらに対し本研究では、視覚に対して特定の刺激を与えることで触覚を錯覚させる現象(視覚誘導性錯触覚)を利用した触力覚ディスプレイを提案している。

次節では視覚誘導性錯触覚について説明するとともに、この現象を利用した研究を紹介していく。

2.3. 視覚誘導性錯触覚

人間は視覚から物体の形状や材質など多くの情報を得ている。例えば物体の硬さは、物体に力を加える事で触覚的に認識することが出来るが、力が加わることによって発生する物体の変形を視覚的に認識することで、その物体の硬さを推測することが出来る。物体の重さについて考えてみると、触覚的に認識するためには物体を持ち上げるなどの動作が必要となるが、他者が物体を持ち上げているときの物体の移動速度や移動量などから、その物体の重さを推測することが出来る。このような物体の視覚的な変形や移動をコンピュータ上で再現することで、錯触覚による触覚提示を行なう研究が数多く行われている[13]。

2.3.1. 重さに関する錯触覚

Dominjon らはバーチャルな物体の重さに関する錯触覚現象を発見している[14]。システムは図 2.13 のようになっており、ユーザは球体が装着された変位測定デバイスの球体部分を把持して操作を行なう。デバイスを上下に動かすと、その変位量に応じてディスプレイに上に CG で描画された球体が移動する。このとき、C/D ratio(Control/Display ratio : ユーザの操作する入力デバイスの変位量と、それと同期して変化するディスプレイ上のオブジェクトの速度の比率)を変化させることで、CG の重量の変化を錯触覚としてユーザに提示することが可能である。例えば C/D ratio を小さくする、すなわちユーザの操作量に対して球体の変位量を大きくすると、

ユーザは実際の重量より軽く感じることができる。このシステムは、入力デバイスをユーザの視界に入らないようにしており、ユーザをディスプレイ上のCGに注視させることで感覚を効果的に提示している。



図 2.13 重量感提示システム

また、Keller らはディスプレイ表面に加わる圧力を測定できるタッチパネルを用いることで、平面ディスプレイ上にCGで描画されたオブジェクトの重さを提示する手法を提案している[15]。タッチパネルのように、ユーザの操作する手指と視覚刺激を空間的に分離できない場合、C/D ratio を変化させるだけでは手指に注意が向

いてしまうため、視覚刺激のみから錯触覚を発生させることは困難である。そこで、Keller らはタッチパネル上の操作の一つであるドラッグ動作に着目し、CG で描画されたオブジェクトに『重さ』パラメータを設け、オブジェクトに設定された重さ以上の圧力がディスプレイ表面に加わらない限りオブジェクトの移動を行えないようにすることで、オブジェクトの重さを表現した。このシステムを用いて表現される感覚が重量感であるか確認するため、Keller らは大きさの変わらない青い矩形をディスプレイ上に4つ表示し、被験者に左から昇順に並べてもらう実験を行っている。実験に参加した被験者らには、システムによって提示されるものを教示せず、実験終了後に被験者らがどのような基準で昇順に並べたかを調査した。その結果、実験に参加した被験者らの多くが『圧力』や『摩擦』などの、オブジェクトを動かすために必要な感覚を基準に並べたことがわかった。その後、被験者らに基準となる要素はオブジェクトの『重さ』ではないかと提案したところ、全ての被験者から賛成を得られたことを報告している。

2.3.2. 凹凸感に関する錯触覚

Lécuyer らはマウスとディスプレイを用いて、ディスプレイ上のオブジェクトの凹凸感を提示する手法を提案している[16]。これは、ユーザがマウスによって画面上のポインタを操作する際に、C/D ratio を変化させることでディスプレイ上に表示されたCGの凹凸を表現するというものである。マウスの動作とポインタの動作の関係を図 2.14 に示す。図中において、ポインタが円の外部にいる場合には特別な変化はなく、C/D ratio も通常通りである。しかし、円の内部に進入すると、円の中心方向にポインタが近づくに従ってC/D ratio が大きくなる、すなわちポインタの速度は通常よりも遅くなっていく。そして、中心を越えて円の外側方向へポインタが

進むに従って C/D ratio が小さくなる, すなわちポインタの速度は通常よりも早くなる. 円の外部に出た時点で C/D ratio の値は通常に戻るため, ポインタの速度も最初の状態に戻る. すなわちポインタの速度が変化するののは円の内部のみであり, この円をポインタでなぞることで, ユーザは円錐や半球, 釣鐘形状のような物体を上からなぞっているような感覚を覚える. すなわち, ポインタの加減速によって凹凸を探索した際に生じるような力覚が生成されるといった手法である. Lécuyer らはこのシステムを用いて, 図 2.15 に示す 3 パターンの凸形状で凸感覚が生起されるか被験者実験によって検証したところ, 実験に参加したすべての被験者が凸を感じる事ができるという結果を得ている.

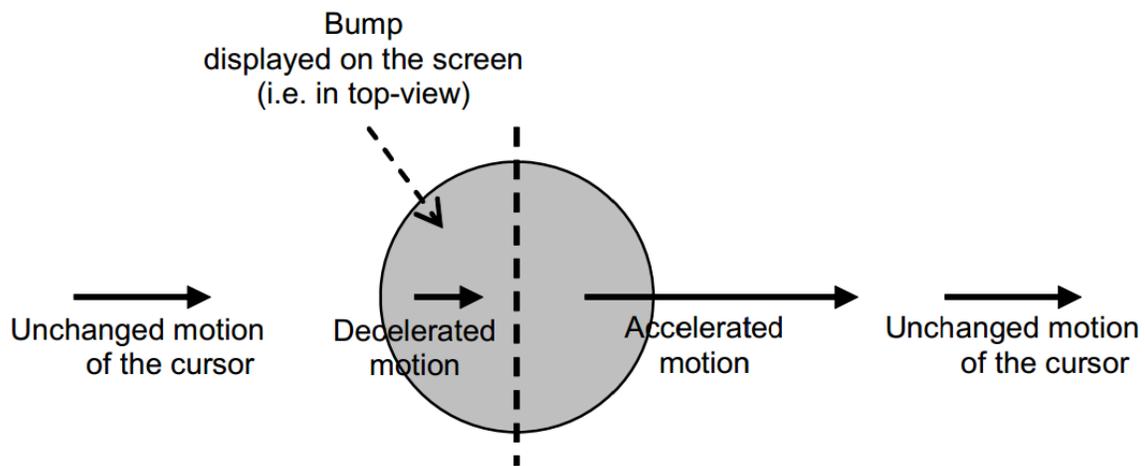


図 2.14 凸提示の概要

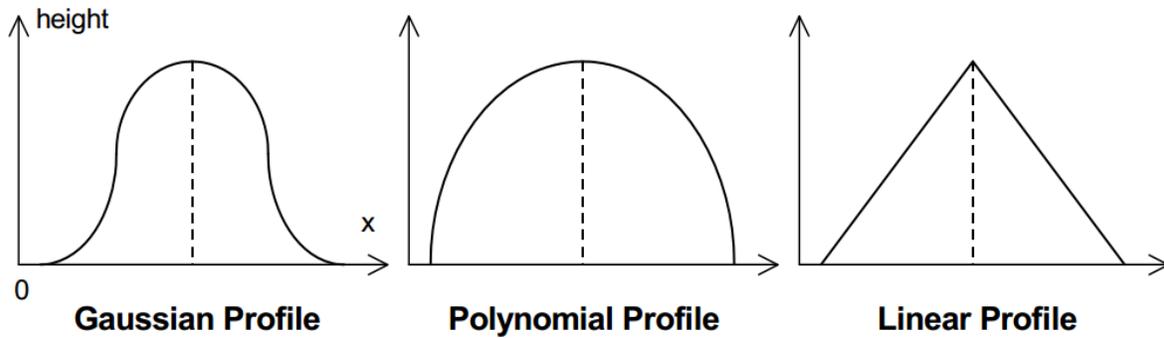


図 2.15 凸感覚の提示パターン

2.3.3. 物体形状に関する錯触覚

Ban らはバーチャル物体の形状に合わせて手指位置を再配置することで、錯触覚によって多様な形状のバーチャル物体を提示する手法を提案している[17]。このシステムでは、ユーザが図 2.16 左に示すような円柱上の実物体をなぞる際に、ユーザの手指の動きを映像として取得し、実物体とユーザの間に設置されたディスプレイ上でバーチャルな物体と、その形状に合わせて手指位置を再配置した映像(図 2.16 右)が表示される。これにより、ユーザは形が不変な円柱状の物体をなぞっているにも関わらず、表示された映像を注視することで、表示されている物体と同じ形状のものをなぞっているという知覚を錯触覚によって与えることができる。

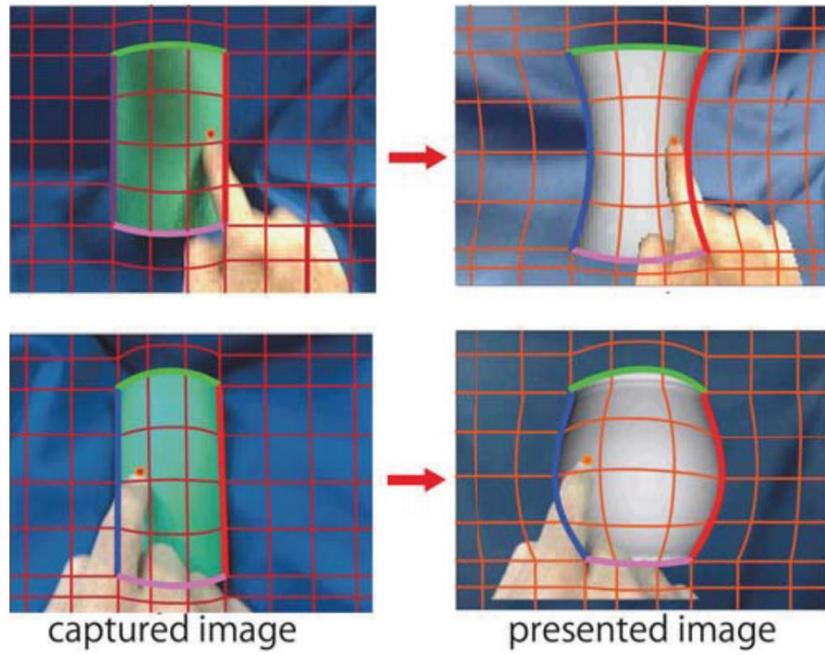


図 2.16 物体の形状変化の提示



図 2.17 システムを体験する様子

2.3.4. 硬軟感に関する錯触覚

Lécuyer らは Spaceball とよばれる力センサを内包した 6 自由度の三次元入力デバイスを利用して、物体をスティックで押し込んだときに硬さの変化を知覚させる手法を提案している[18]。デバイスは図 2.18 に示すように Spaceball にピストンを装着したものを利用しており、ピストンによって Spaceball を押し込んだときの力に応じて、ディスプレイに表示されたばねの付いたピストンが変位するシステムとなっている。CG のピストンのばね定数を変更することで、ピストンの変位量が変化し任意の硬さを提示することができる。



図 2.18 ピストンを用いた硬軟感提示システム

(左: 提示デバイス, 右: 視覚刺激)

Hirano らは MR 技術を用いて硬軟感の錯触覚提示を試みている[19]。これは、物体を指で押しこむ際に出来る影を CG で作成し、HMD を用いてユーザの指の周辺に重畳することで、視覚刺激に誘導された硬軟感の認識を促すものである。システムは図 2.19 のようになっており、ユーザがウレタンを押し込んだ際の力をウレタ

ンに設置した曲げセンサによって取得し，得られた値を基に生成したCGをリアルタイムに重畳するものとなっている．実験では複数の硬さのウレタンフォームを用いており，例えば硬いウレタンを押しこむ際に凹みの大きい影のCGを提示することで，軟らかく感じるという結果を報告している．

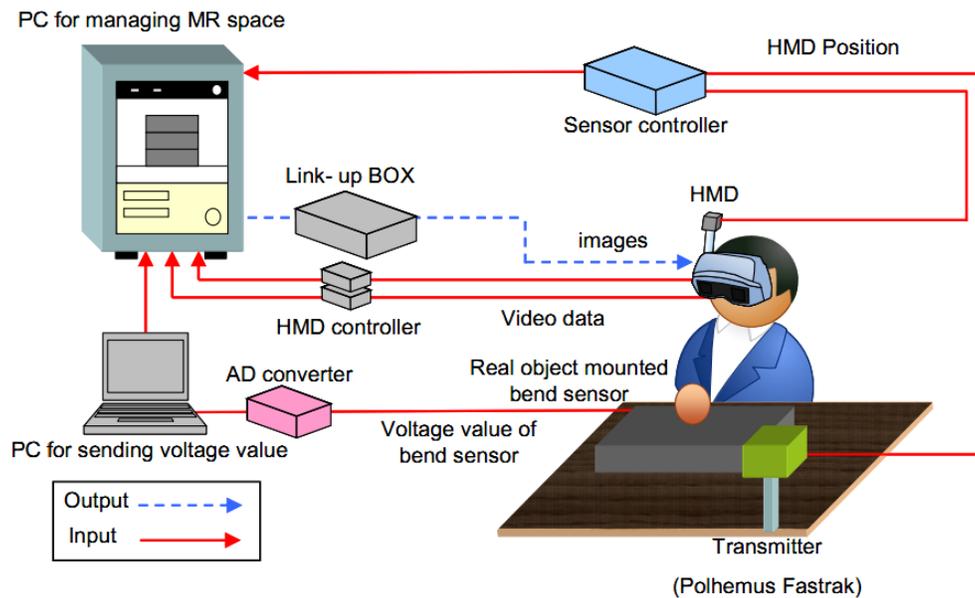


図 2.19 押し込みによる硬軟感錯触覚提示システムの構成

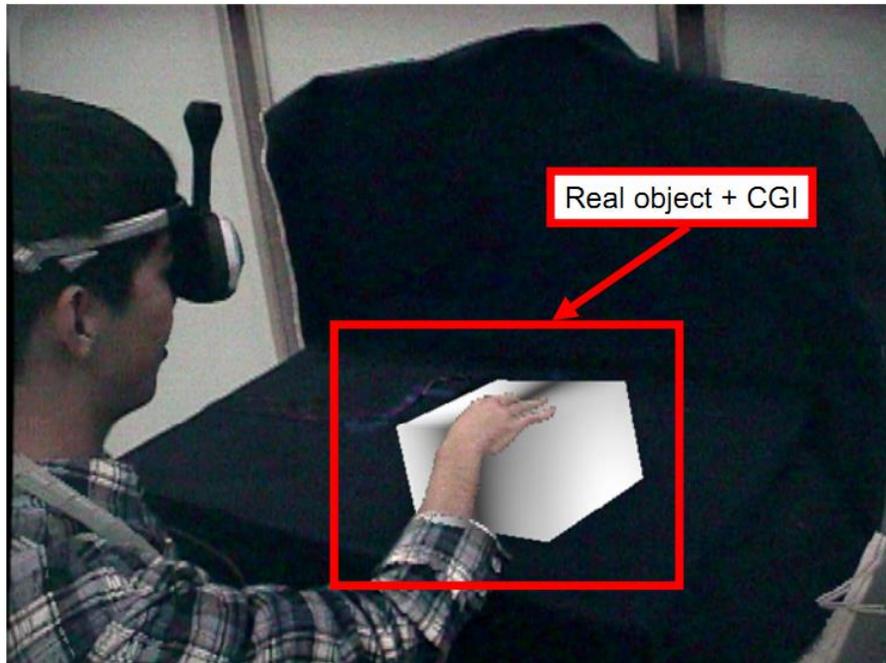


図 2.20 ユーザによる体験の様子

Kokubun らはモバイル環境における硬軟感の錯触覚提示手法を提案している[20]. これは図 2.21 のように、モバイル端末を 2 台重ねたデバイスの中に圧力センサを設置しており、システム背面を押し込んだ力に応じて図 2.22 のように画面上の CG を歪ませることで、硬軟感の提示を行っている。ユーザの手指の位置は背面に設置された鏡に映したものを、背面側のモバイル端末のカメラによって取得し、手指の形を模した影としてユーザに提示している。

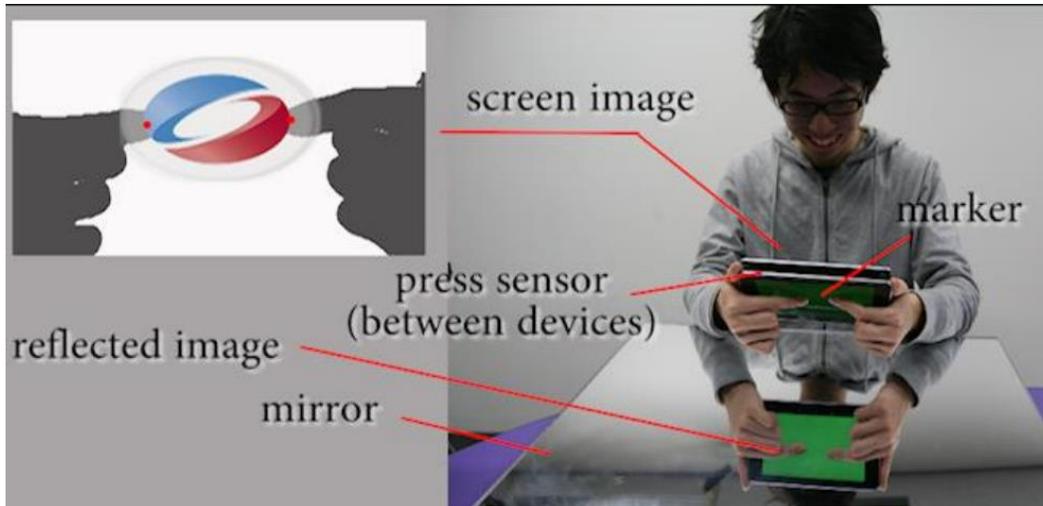


図 2.21 システム概要図

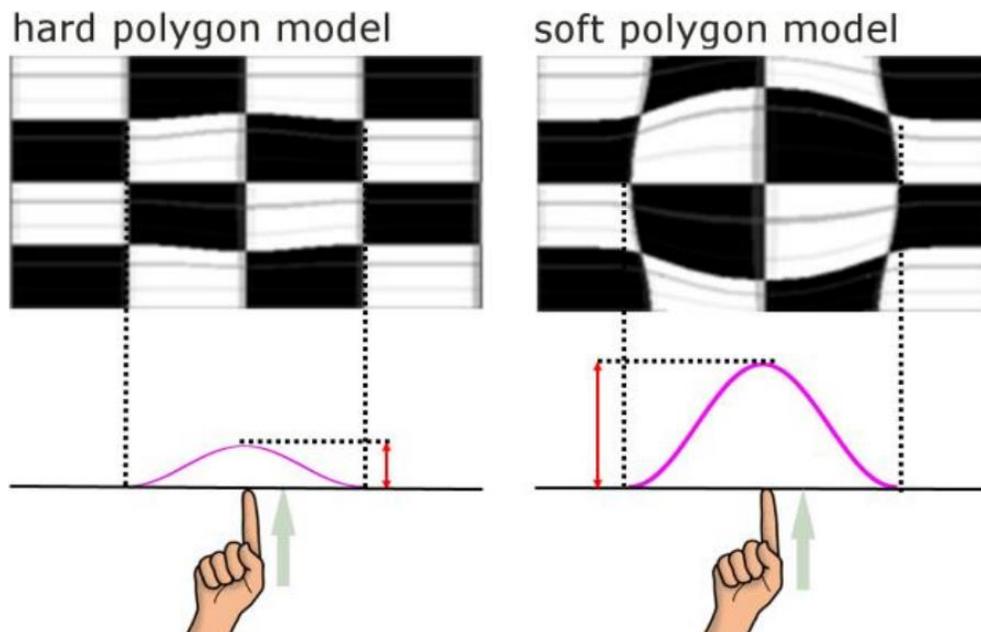


図 2.22 CG のひずみモデル

また、振動刺激を利用することで錯触覚による硬軟感提示を実現している研究例もいくつか報告されている。Kildal らは Kooboh というハンドヘルド型デバイスを開発し、錯触覚によって物体の硬軟感を提示する手法を提案している[21]。これは図 2.23 に示すような、力センサと振動子が内部に設置された箱型のデバイスであり、指先によってつままれた際の力に応じた振動刺激を提示することによって、錯触覚による硬軟感提示を行なうものである。変形モデルはフックの法則に従っており、ばね定数を変更することで任意の硬さを提示することができる。

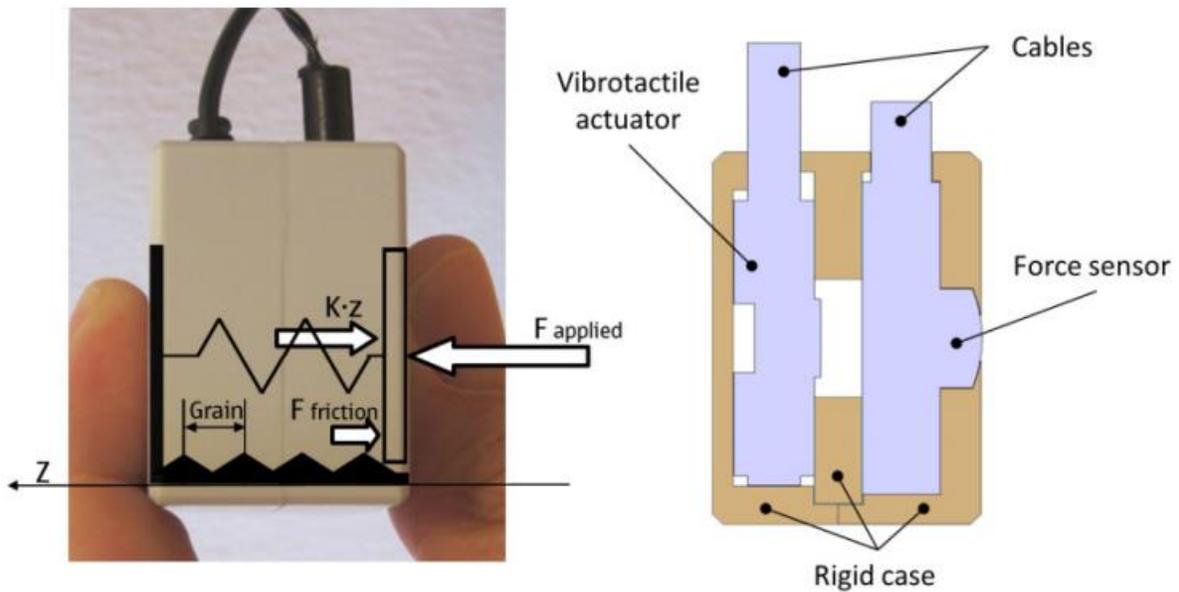


図 2.23 Kooboh

Kildal らはデバイスの開発に主眼を置き、いくつかのアンケート形式による実験しか行っていないが、提示する振動による影響について検証した研究として鈴木らによる報告がある[22]。これは図 2.24 左のようなデバイスを用いて、矩形波や三角波、鋸波、正弦波の4種類の振動刺激と3種類のホワイトノイズによる振動刺激を用意し、各振動刺激について実物体との比較実験を通して、被験者が知覚する硬軟感の傾向を調査したものである。鈴木らは比較実験の結果、振動波形として2.5[Hz]のバンドパスフィルタを通したホワイトノイズを用いることで、最も効果的に硬軟感が提示可能であることを報告している。

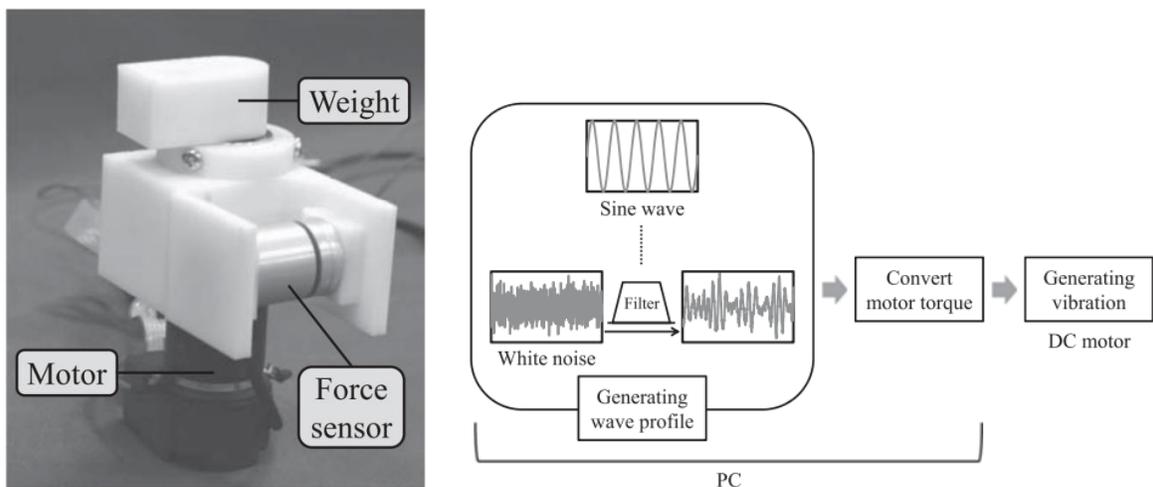


図 2.24 システム概要図

(左: 提示デバイス, 右: 振動刺激生成手順)

2.4. 関連研究との差異および本研究の位置付け

本研究で取り扱うシステムは手中に小型ディスプレイを設置し、ユーザがディスプレイを把持した力に応じた視覚刺激を提示することで、錯触覚による硬軟感提示

を行なうものである。従来の視覚誘導性錯触覚における研究では、視覚刺激への注目を促すために、手指と映像を視覚的に分離する手法を取られる場合が多かった。しかし、スマートフォンなどのモバイル環境において、手指と視覚刺激を提示するディスプレイを分離することは困難である。本手法は、把持動作を利用することによって手指とディスプレイを分離することなく錯触覚提示を行なうことができるため、従来の手法に比べて優位であると考えられる。

本論文では、視覚誘導性錯触覚において現実世界との差分を解消することによる知覚への影響を検証する。従来の研究では、錯触覚によって任意の触力覚が提示できるか検証するものは見られたが、視覚刺激を変更することによる影響について検証した論文はほとんど見られない。

力を作用させる触力覚ディスプレイとの差分については、感覚提示手法として視覚誘導性錯触覚を用いている点や、デバイスが小型軽量である点などが挙げられる。

第3章

ハンドヘルド型錯触覚提示システムとその問題点

木村は視覚誘導性錯触覚による硬軟感提示手法として，ユーザの把持動作に応じて変化する視覚刺激を手中に表示する手法を提案した．本章では，提案されたシステムの概略を説明するとともに，システムにおける視覚刺激の問題点についてまとめる．

3.1. デバイス構成

本手法はユーザがデバイスを握った際の力を検出し，検出された値に応じた画像をユーザの手中に表示するものである．この手法を実現するため，デバイスは図 3.1 に示すような Android スマートフォン(Samsung Nexus S)[23]，Arduino RT-ADK(RT Accessory Demo Kit)，圧力センサによって構成されている．本節では，これまでに提案されたデバイス構成について入出力デバイスと制御用マイコンに分けて，それぞれの概略を説明する．

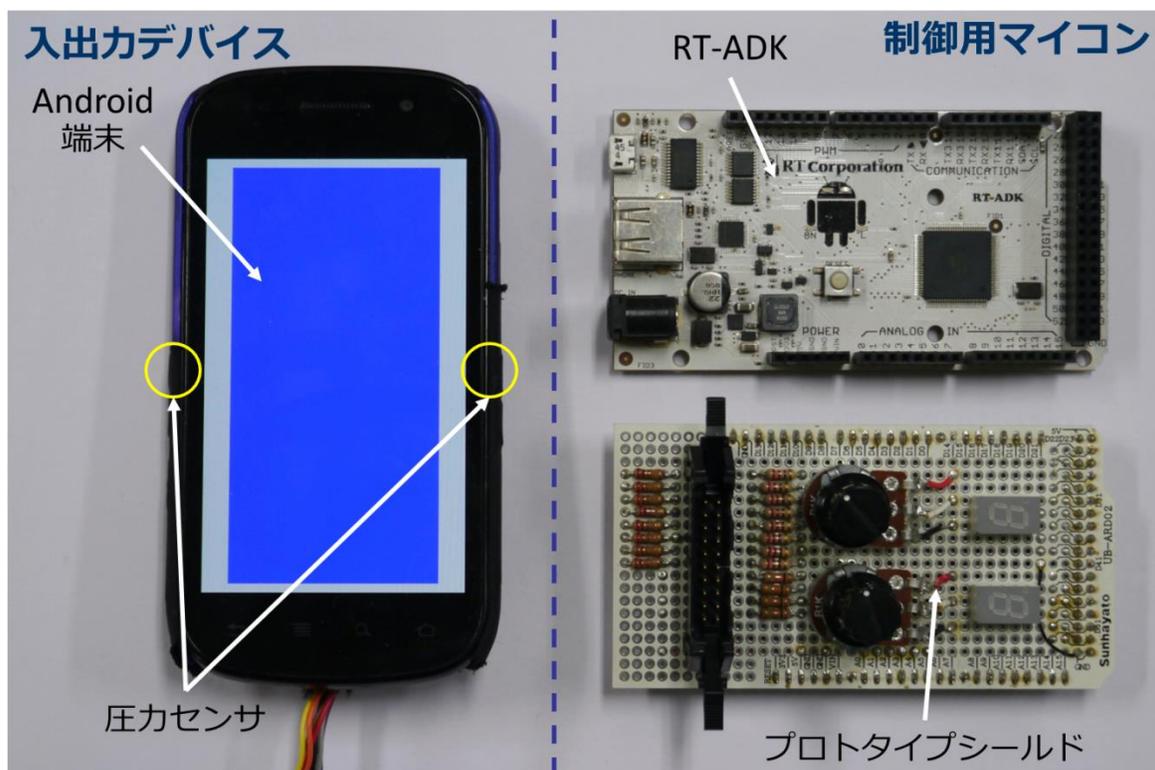


図 3.1 デバイス構成

3.1.1. 入出力デバイス

入出力デバイスは Android スマートフォンとその両側面中央部に設置された圧力センサによって構成されている。スマートフォンの利用は、一般に広く普及しているということから汎用的なデバイスでシステムが使用できるという点や、開発が容易であるといった利点を含んでいる。ユーザの握力を取得するためのセンサは、フィルム型の圧力センサである FSR-400(Interlink Electronics Inc.)[25]を使用した(図 3.2)。デバイス使用時は、センサの故障防止及び握った際の配線による不快感を軽減するため、薄い布でカバー全体を覆っている。

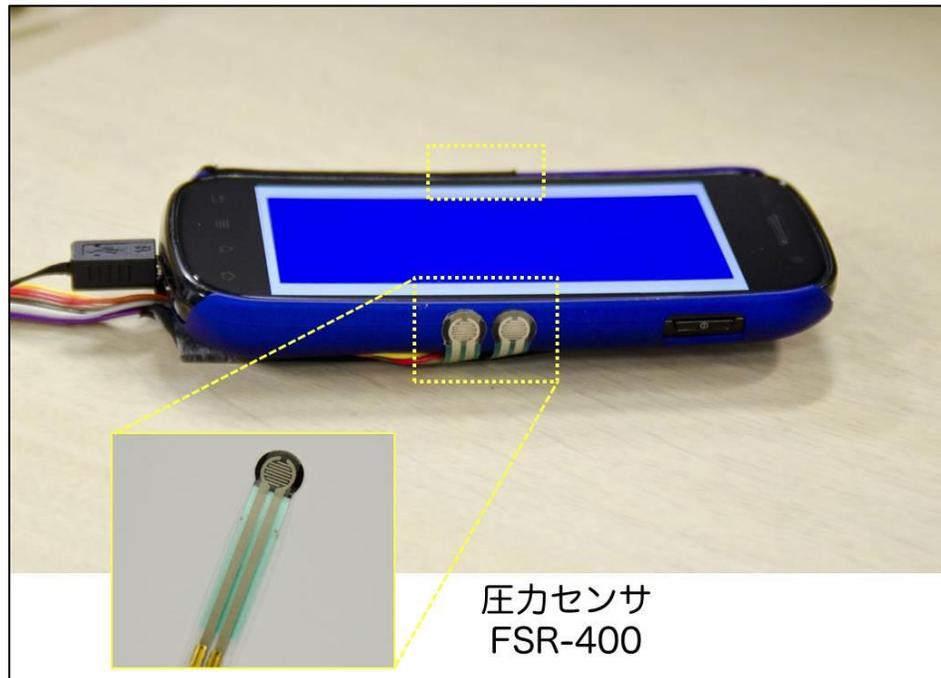


図 3.2 握力測定に用いる圧力センサ

3.1.2. 制御用マイコン

Android 端末及び圧力センサの連携には RT 社が開発した RT-ADK を利用した[24]. これは Android OS 搭載のスマートフォンと USB 接続が可能な I/O ボードである. ボードには AVR マイコンが搭載されており, Arduino Mega に準拠した仕様となっている.

本システムはこのボードに製作した専用のシールドを接続することで, 圧力センサの検出及び視覚刺激の変化率の調整を行なう. プロトタイプシールドの概要は図 3.3 のとおりである. 回路基板には圧力センサを RT-ADK ボードに接続する回路, 視覚刺激の変化率を調整するためのゲイン調整ダイヤル及び, ダイヤルがどのレベ

ルに設定されているかを確認するための7セグメントLEDが2つずつ設置されている。ダイヤルを利用することで、ばね定数をリアルタイムに変更することができるようになっており、現在は最大20段階のばね定数をセットできるようになっている。これは錯触覚提示を行う上では必ずしも必要な機能ではないが、被験者実験を円滑に行うために設置されている。なお、ゲイン調節ダイヤルによる視覚刺激の変化は後述する。

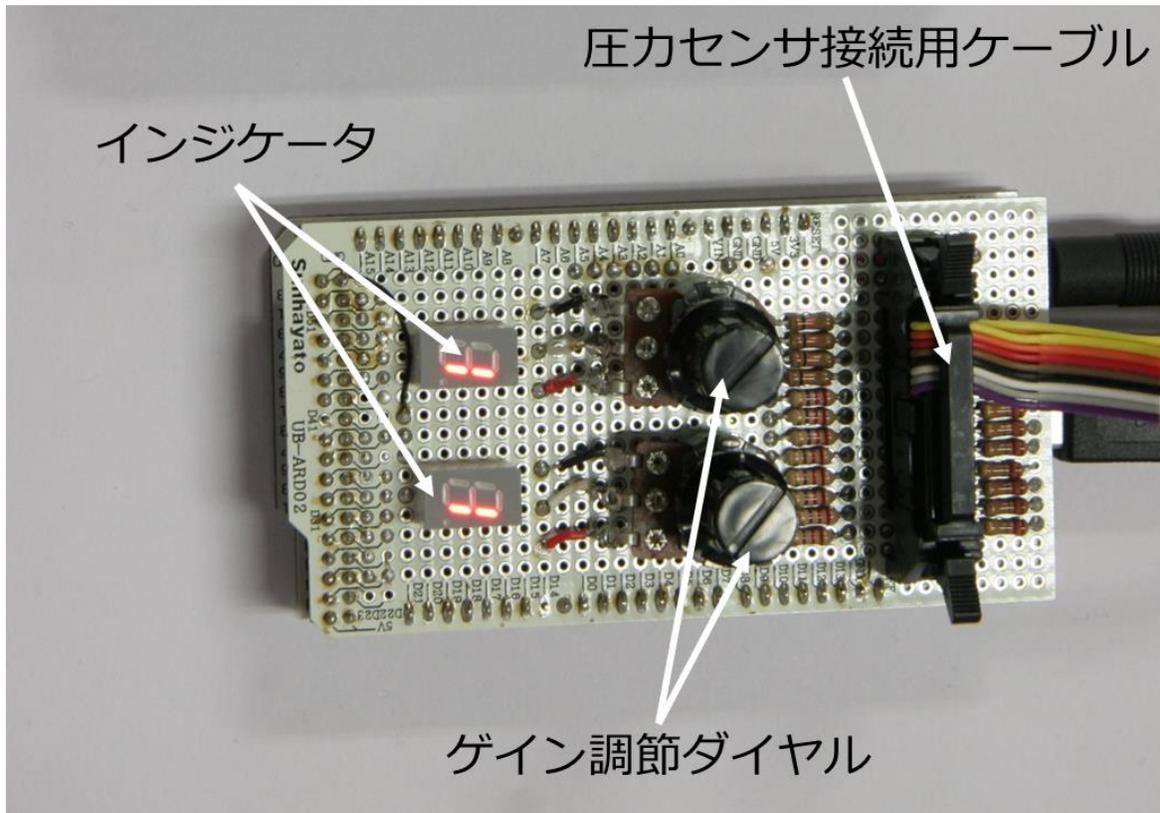


図 3.3 プロトタイプシールド

3.2. 視覚刺激の生成

現行のシステムではディスプレイに表示する視覚刺激として、図 3.4 のような青色の単色矩形画像を用いている。これは、デバイス側面に加えられた圧力によって画像の幅が変動するようになっており、すなわち握りの強弱に応じて拡張縮する画像をユーザに提示することで、錯触覚による硬軟感提示を行うものである。

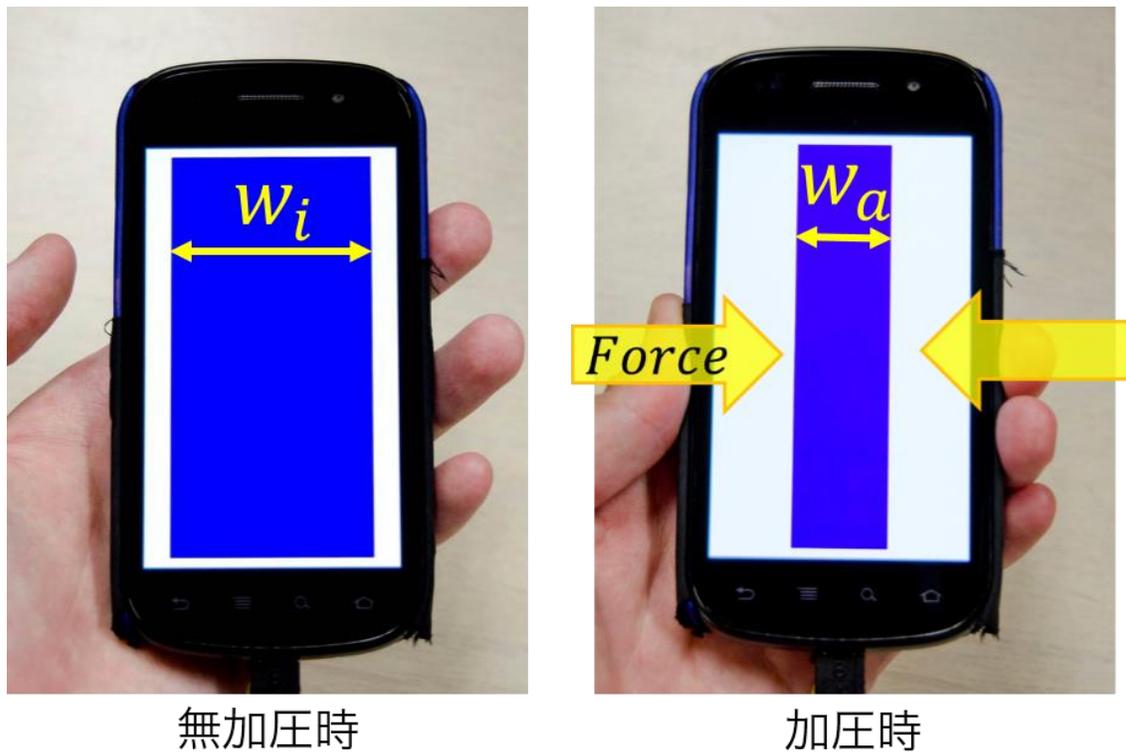


図 3.4 デバイスに力を加えた際の視覚刺激の様子

- 視覚刺激の変形式

本システムにおける視覚刺激はフックの法則に従った変形，すなわちばねのような弾性変形をする．図のように，デバイスに力を加えていない状態での視覚刺激の画像幅を w_i ，デバイスに力 F を加えた時の幅を w_a とすると， w_a はフックの法則を用いて以下のように記述できる．

$$F = k \cdot (w_i - w_a) \quad (1)$$

$$\frac{F}{k} = w_i - w_a \quad (2)$$

$$w_a = w_i - \frac{F}{k} \quad (3)$$

ただし，式中の k はばね定数である．プロトタイプデバイスでは $w_i = 1000$ としており，ばね定数 k によってCGの変形を制御することが出来る．例えば図3.5のばね定数A,B,Cがあるとき，それぞれのばね定数の大きさは $A > B > C$ の順となり，その順番で硬いということを表す．なお，以降ではばね定数 k が大きいものを【硬い視覚刺激】，小さいものを【軟らかい視覚刺激】などと表現する．

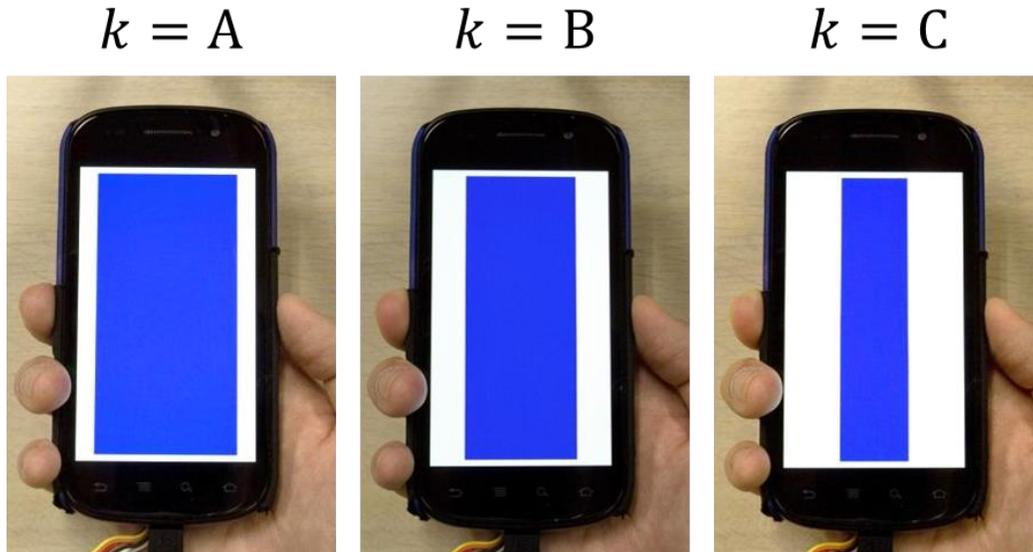


図 3.5 ばね定数の値による視覚刺激の違い

(ただし $A > B > C$)

- デバイスにかかる力の計測

先述のように、デバイスを握った際の力はデバイス両側面に設置された圧力センサによって測定される。デバイス自体に設置されている圧力センサの数は、ユーザによって圧力がかかる場所にずれが生じる可能性を考慮して、片面に2枚ずつの合計4枚としているが、本論文の実験では実験者から圧力を加える場所を被験者に指定しているため、実際に機能している圧力センサは図 3.6 の枠線内のみである。圧力センサで計測された値は、Arduino Mega に準拠した RT-ADK ボードでアナログ値として読み取られるが、Arduino では 5V の入力電圧を 10bit 幅(0 ~ 1023)の分解能で値を読み取っている。すなわち 0 - 5V の入力電圧は、0 - 1023 の値となるが、本システムではこれを力[N]に変換する必要がある。FSR-400 のデータシートより、電

圧値[V]から力[N]への変換方法は付録にて記述している。



図 3.6 デバイスにかかる圧力を計測するためのセンサ

- ゲイン調節ダイヤル

プロトタイプシールドに実装されているゲイン調節ダイヤルは、ばね定数をリアルタイムに変更することができる。ダイヤルはボリューム抵抗によって構成され、つまみを回すことで抵抗値を変えることができる。ボリューム抵抗で計測された電圧値は圧力センサと同様に、10bit 幅(0 ~ 1023)で取得される。従って、理論上は1024段階のばね定数をプリセットできるが、現在はインジケータの表示パターン限界から、最大20段階のばね定数をプリセットすることができる。図はゲイン調節ダイヤルが「5」のときにばね定数 $k = 16$ 、「3」のとき $k = 4$ 、「1」のとき $k = 2$ とプリセットした際に、同じ力を加えたときの視覚刺激の変化の様子である。

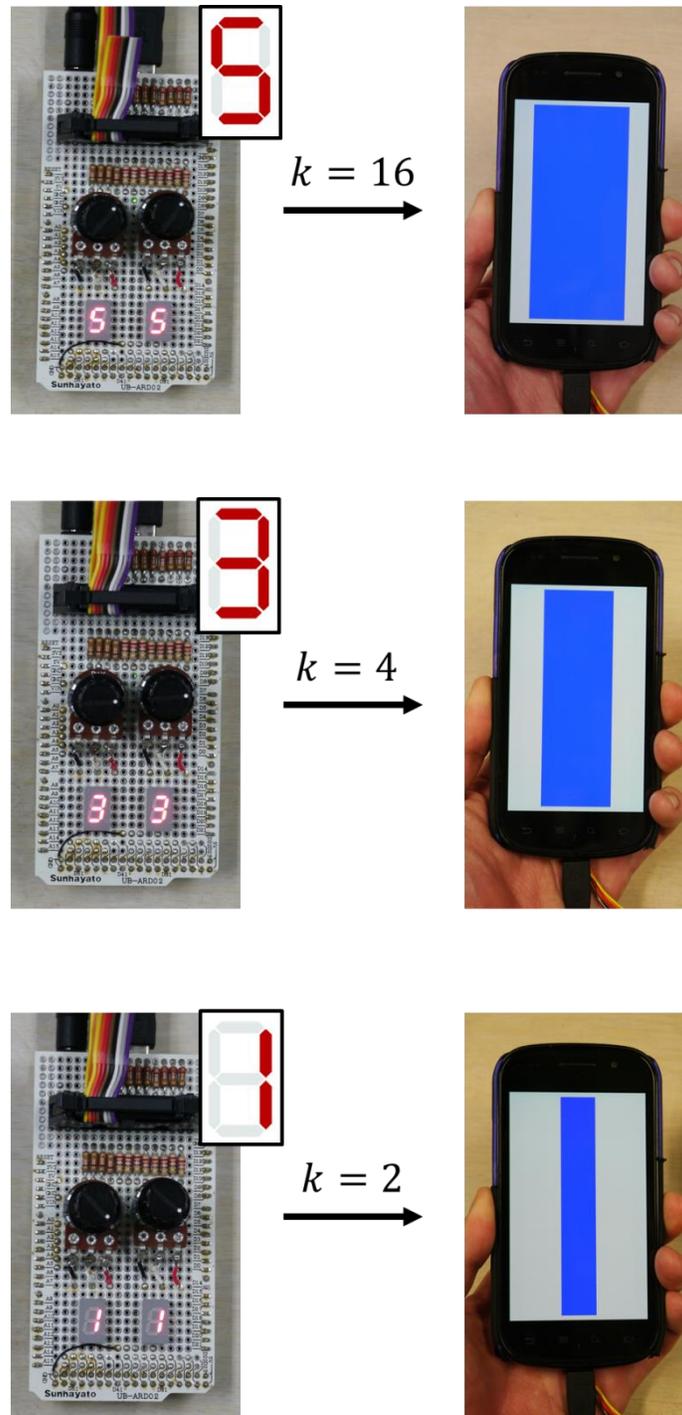


図 3.7 ゲイン調節ダイヤルによるばね定数の設定例

- 視覚刺激の提示パターン

現行のプロトタイプシールドにはゲイン調節ダイヤルが2つ設置されており，図 3.7 中ではどちらも同じ値にしているが，異なる値を設定することもできる．異なる値を設定した場合，握っている途中で別のばね定数へ瞬間的に変化する視覚刺激が生成される．これは図 3.8 のように，力を加えていない状態から力を加えて映像を変化させ，再び力を加えていない状態に戻るまで1周期とすると，最初の n 周期はダイヤル左側で設定されたばね定数の視覚刺激が提示されるが， $(n+1)$ 周期目からはダイヤル右側で設定された視覚刺激へと変化するものである．周期 n の回数は明確に定めていないが，3 ～ 7 回程度で変化するように設定されている．

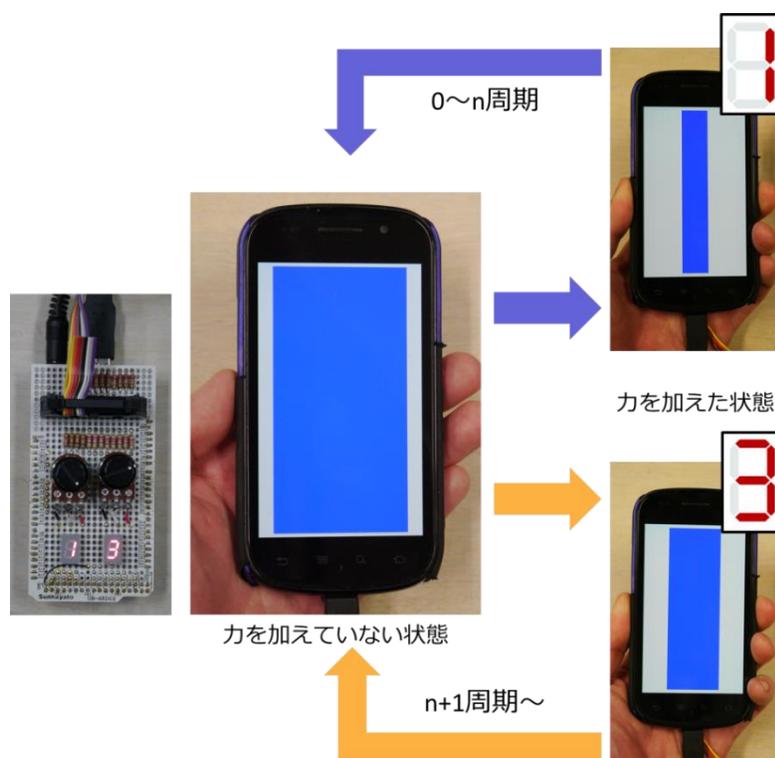


図 3.8 視覚刺激の提示パターン

3.3. ハンドヘルド型錯触覚提示システムのまとめ

本研究のシステムは、視覚刺激を表示した小型ディスプレイを握らせ、把持動作に応じて視覚刺激を変化させることで、デバイスの硬さが変化したと錯覚させるものである。デバイス構成は

- Android スマートフォン(Nexus S)
- 圧力センサ(FSR-400)
- マイクロコンピュータ(RT-ADK)

となっており、把持動作による握力の測定はデバイス両側面に設置された圧力センサによって行なう。システムのサイクルは図 3.9 のように、まずマイコンによって圧力センサの値をリアルタイムに取得する。このとき取得した値はセンサで計測された電圧値のため、これを適切な変換式によって力の値に変換する。変換した値を基に、生成する視覚刺激の画像幅を計算し、スマートフォンに送信する。スマートフォンでは、受信した値から矩形画像の生成を行なう。

これまでに木村は、本システムによって任意の被験者に対して硬軟感を提示できることを確認し、デバイスの素材による影響などについて調査を行ってきた[7]。しかしながら、本システムにおける視覚刺激については、提示される視覚刺激のパターンによる影響しか検証されていない。そこで、次節にて現状の視覚刺激について整理し、錯触覚提示を行う上での問題点について検討する。

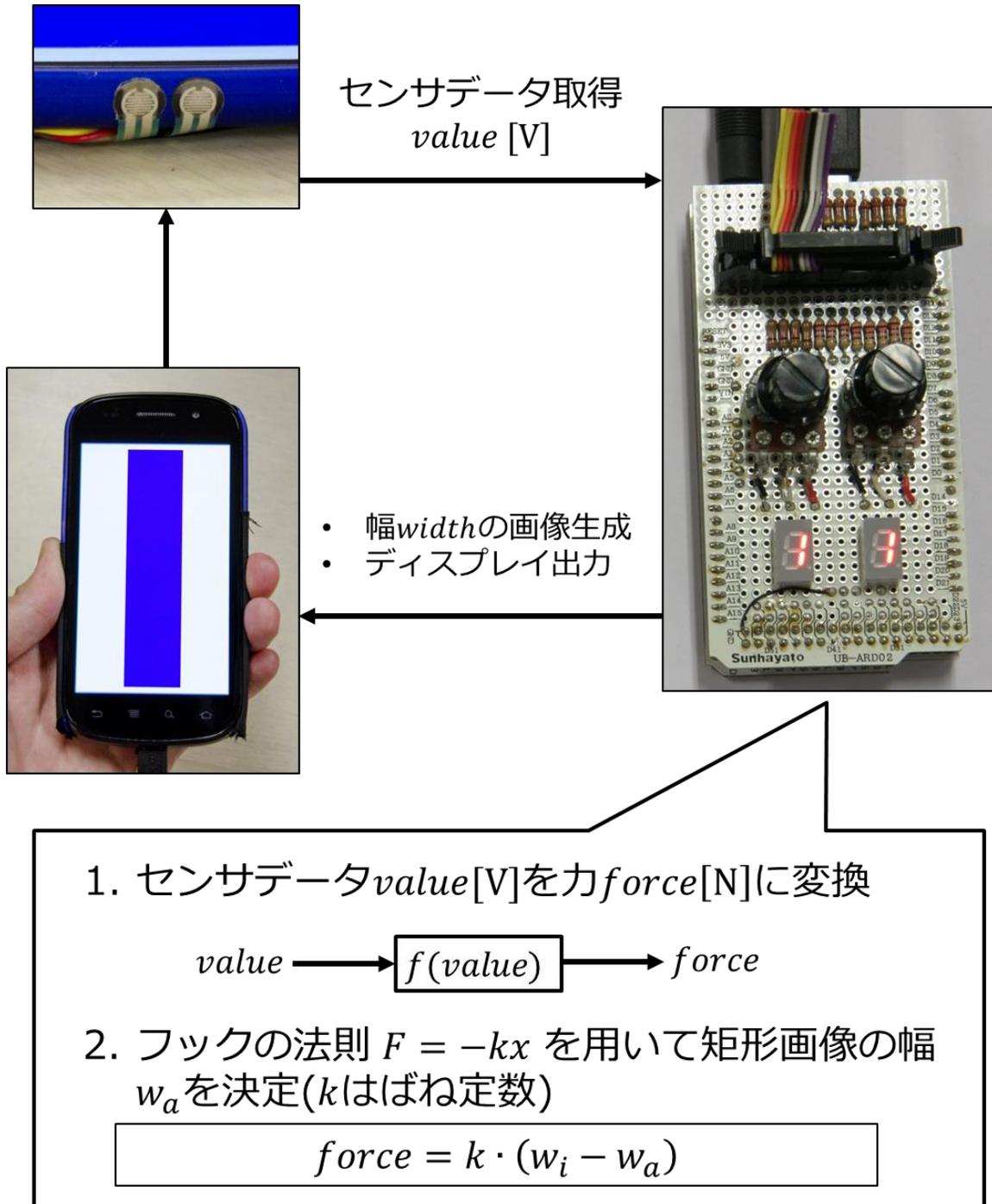


図 3.9 ハンドヘルド型錯触覚提示システムのサイクル

3.4. 視覚刺激による硬軟感知覚への影響

本手法によって錯触覚提示を行うことを考えたとき、硬軟感知覚に与える影響の大きい要素の一つとして視覚刺激が挙げられる。これは本手法が錯触覚提示を行う上で、主に視覚刺激を利用しているためである。ハンドヘルド型錯触覚提示システムで用いてきた視覚刺激は、単純でありながら硬軟感を提示することが可能であったが、いくつかの問題点が考えられる。本節ではまず、従来の視覚刺激における問題点について記述する。その後、それぞれの問題について解消するために作成した視覚刺激の概略を説明する。

3.4.1. 変形する矩形に対して力を及ぼしているものの表示

現実の世界において物体を変形させるとき、指など、その物体に対して直接力を及ぼしているものが見えるはずである(図 3.10)。しかし、本システムの構成では、変形する矩形に対して直接力を加えているように見える映像は表示されていない。すなわち、映像だけを見れば四角い物体が勝手に変形するように見える状態となってしまう。この現実世界との間の不整合がユーザへの違和感となり、錯触覚の効果に影響を及ぼしている可能性が考えられる。



図 3.10 現実世界における物体の変形

例えば、Hirano らはユーザの手が見えるように画像処理を施しており、ウレタンに対して力を加えている様子が確認できる(図 3.11)。また、Ridzuan らはタッチパネルに表示されたオブジェクトとのインタラクションとして、指が接地しているディスプレイ表面からバーチャルフィンガーを表示している(図 3.12)[26]。この手法は、ディスプレイに表示されているオブジェクトの奥行き方向の位置を表現するために用いられているが、Ridzuan らはこのシステムと視覚刺激を利用することで、ディスプレイ表面の硬さ知覚を変化させることができるという報告をしている。これらの研究において、矩形に対して力を及ぼすものの表示と硬軟感知覚の関係については明らかにされていない。しかし、どちらも手指と視覚刺激を分離せず錯触覚提示を行なう研究であり、手指が見えていない場合では物体を触っているという感覚が得にくくなると考えられる。本研究においても、矩形の拡縮が自身の握力によって起こっているということを視覚的に明確化することで、硬軟感知覚へ何らかの影響を与える可能性が考えられる。

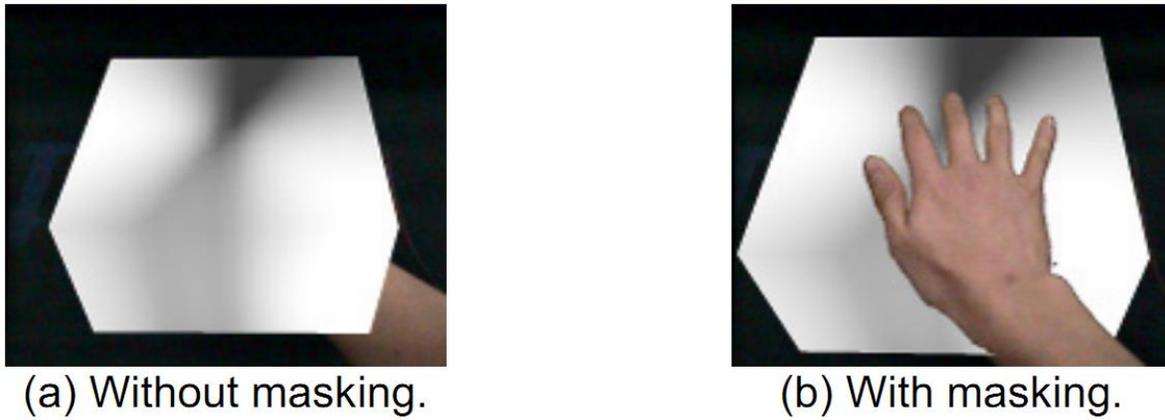


図 3.11 手の表示

((a)画像処理前, (b)画像処理後)

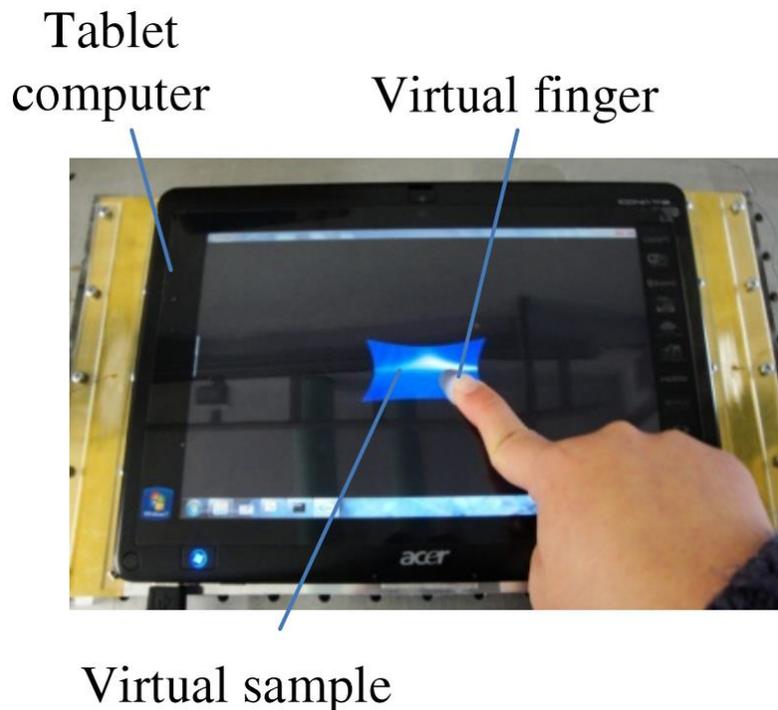


図 3.12 バーチャルフィンガーによる硬軟感提示

3.4.2. 矩形の変形形状

現実世界において、物体の変形は力を加えた部分及び、その周辺のみが発生する(図 3.13)。また、現状のシステムにおいて、力が加えられる部分は両側面に一点ずつであり、加えた点を中心に変形する映像を提示するのが自然であると考えられる。しかし、従来の視覚刺激は矩形全体が変形するものとなっており、現実世界との間に不整合が生じている。この不整合が錯触覚提示を行う上で、ユーザに対して影響を及ぼしている可能性が考えられる。例えば、Kokubun らや Ridzuan らは押しこみ位置を頂点とした正弦波形状に画像を変形させている。このような、現実世界の変形形状と近い形状を視覚刺激として提示することで、矩形変形に比べて自身の力による変形であるということがわかりやすくなり、結果として硬軟感知覚に影響をおよぼす可能性が考えられる。

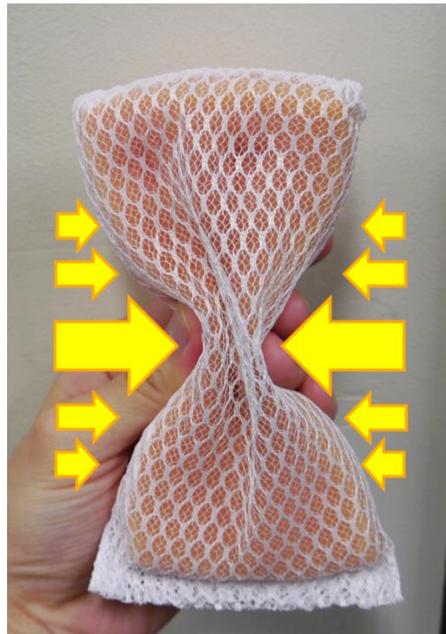


図 3.13 物体変形時の力分布(イメージ)

3.4.3. 問題点の検討

これらの問題について検証するため、まず矩形に対して力を及ぼしているものの表示を試みた。つまり、現実世界における指先に相当する映像を付与することで、現実世界との差分を解消し、錯触覚への悪影響を回避する狙いがある。次に、矩形の変形形状を矩形全体が変形するものから、力を加えている部分を中心に変形するものに変更した。こちらも、現実世界における物体の変形に近い映像を提示することで、現実世界との差分を解消する狙いがある。次章から、それぞれの視覚刺激の詳細と、硬軟感知覚への影響について説明していく。

第4章

指マーカを追加した視覚刺激による比較実験

第3章では本研究で用いるハンドヘルド型錯触覚提示システムにおける概略と、従来の視覚刺激における問題点について記述した。本章では、第3章で取り上げた問題のうち、矩形に対して力を及ぼしている要素について検討を行い、新たな視覚刺激を作成したため記述する。また、作成した視覚刺激によって硬軟感知覚に影響が生じるか、被験者実験を通して検証したため、それについても記述する。

4.1. 比較対象となる実物体

本節ではまず、錯触覚を用いた本手法との比較対象となる実物体について記述する。作成した実物体は図4.1に示すように、中心にバネが通された一軸方向に移動するものである。実物体の大きさはバネが自然長のときにプロトタイプデバイスと同等の大きさになるように設計し(幅約65mm, 高さ約120mm), 中心に装着するばねのばね定数を変化させることで、様々な硬さの実物体を実現している(図4.2)。

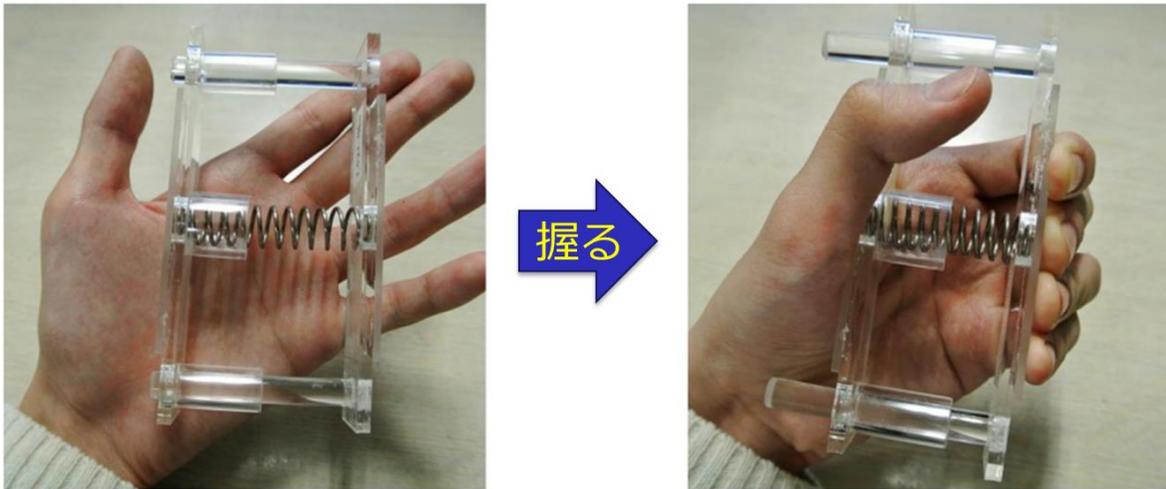


図 4.1 実物体の変形の様子

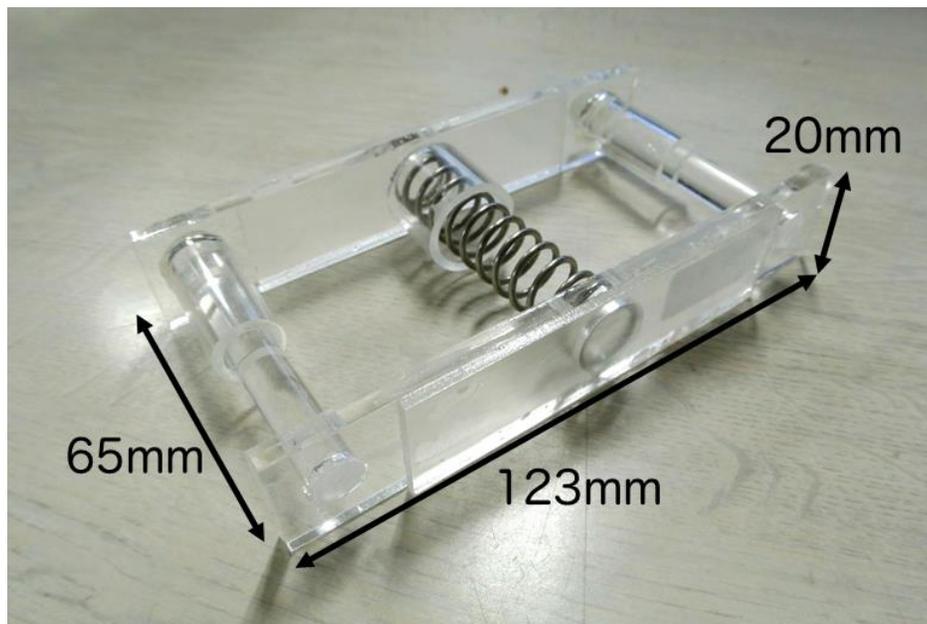


図 4.2 実物体の概要

本実験で使用した実物体は計4つであり、使用したばねのばね定数はウェーバーフェヒナーの法則に基づき、図4.3の左からそれぞれ0.647, 1.01, 2.785, 4.737[N/mm]とした。

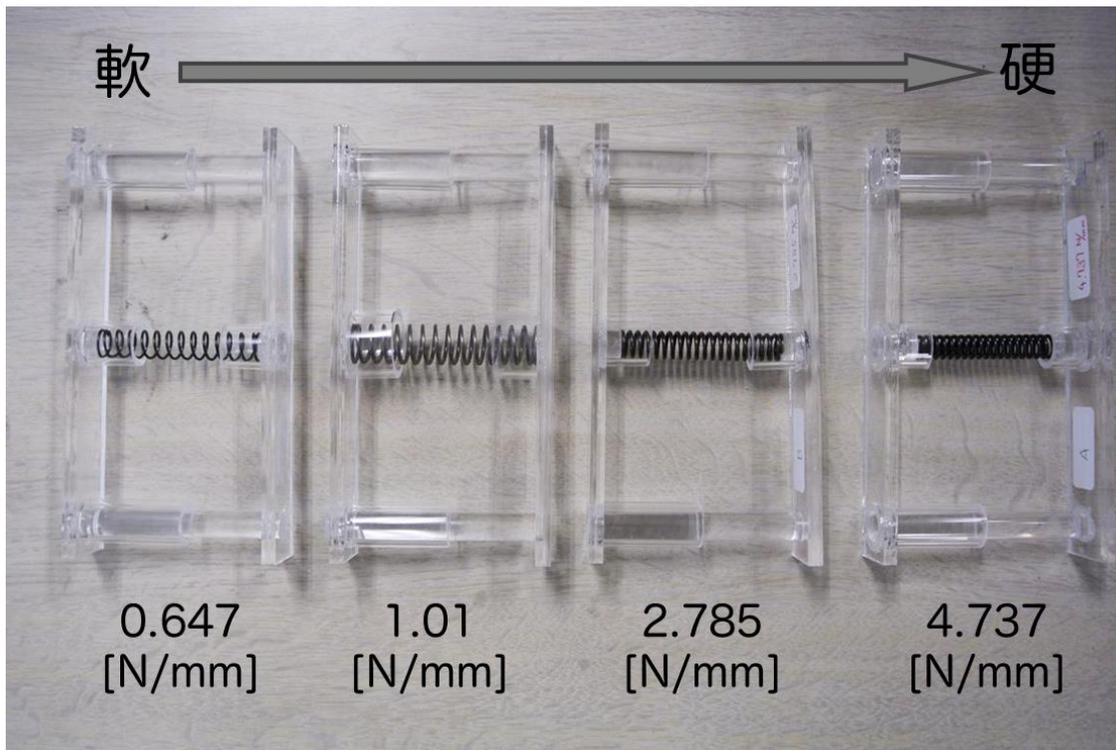


図 4.3 本実験で使用した実物体

4.2. 指マーカを追加した視覚刺激

従来刺激における現実との差分を解消するため、把持動作時の指の動きに相当するマーカ（以下、指マーカとする）を追加した。これは図 4.4 に示すように、デバイスを把持することで画面内に表示され、力を加える事で矩形の変形に追従するものである。これにより、物体を変形させているものが視覚的に確認できるため、現実世界との不整合が緩和されるのではないかと考えられる。なお、今回は黒の単色画像で提示しているが、これは当初人間の肌に近い色で実装したところ、指マーカが視認しづらくなってしまったため、視認性の良さを考慮したものである。

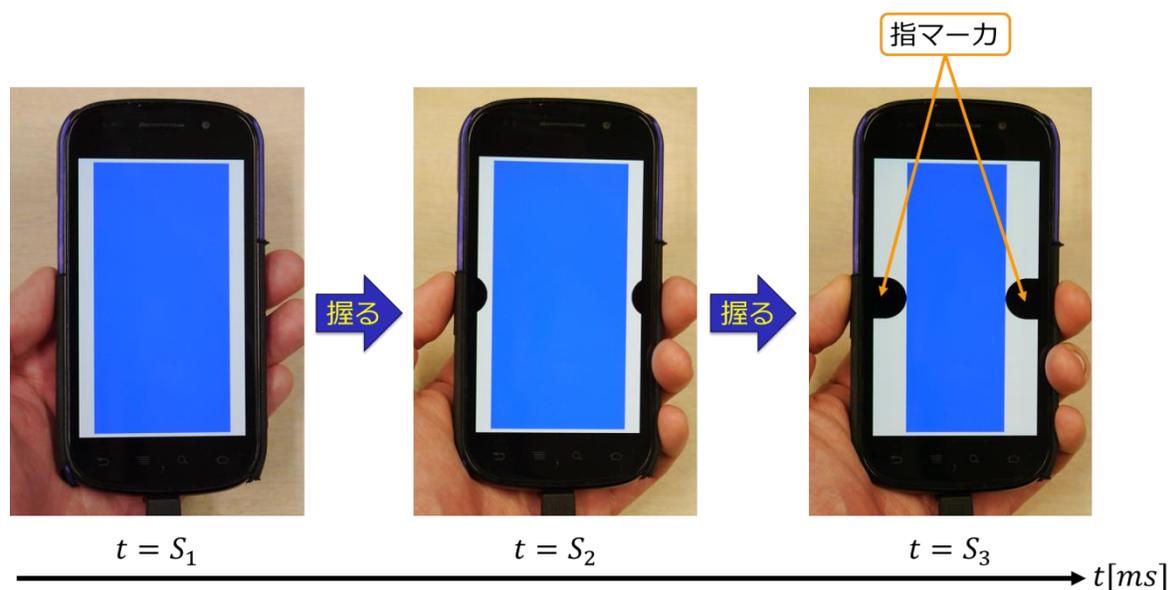


図 4.4 指マーカを追加した視覚刺激

(ただし, $S_1 < S_2 < S_3$)

4.2.1. 視覚刺激のパターン

今回実験で用いる視覚刺激は、変化を実物体に合わせた4種類と、各硬さの刺激に指マーカの有無を与えた、計8種類である。各実物体および視覚刺激は図4.5のように軟らかい順に、軟、中軟、中硬、硬とラベル付けしている。なお本実験では、本システムによって最も硬軟を提示できると考えられる変位制限60%を採用し、視覚刺激の作成を行った。なお、変位制限を設ける手法については付録に記述する。

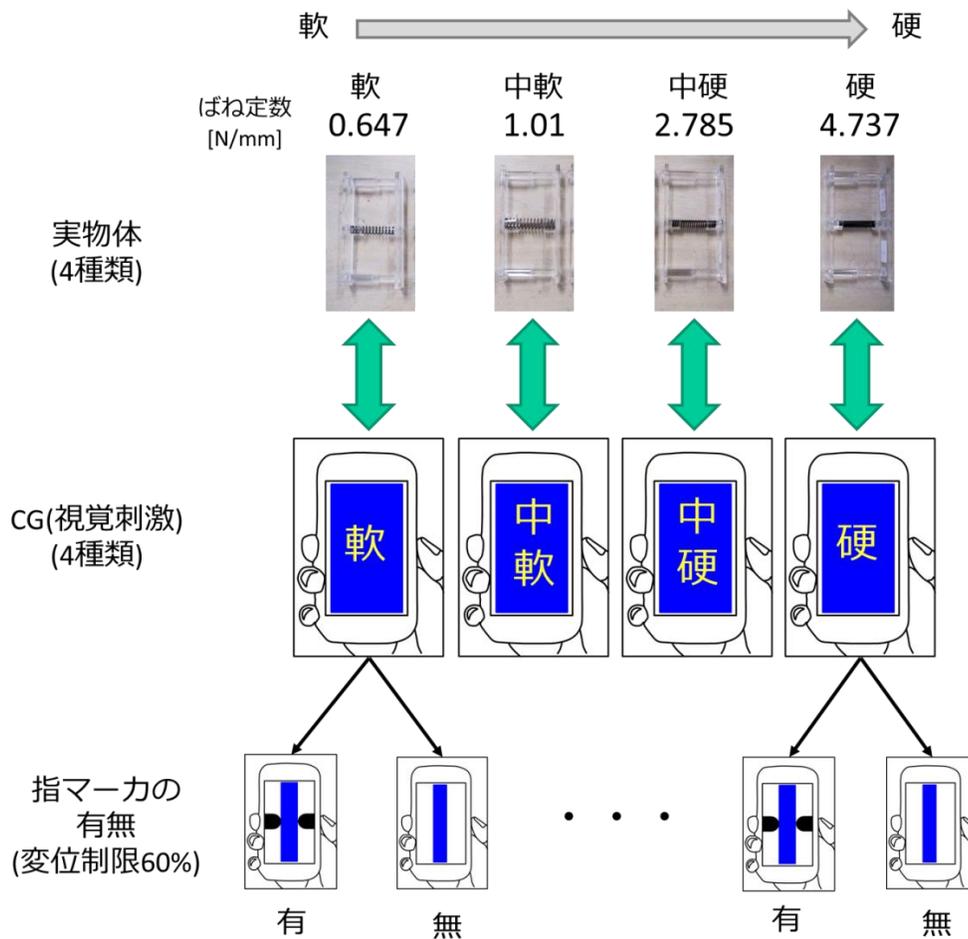


図 4.5 使用する視覚刺激のパターン

4.3. 実験手順

実験手順は以下の通りである。実験手順の概要を図 4.6 に示す。

1. 4種類のCG(CG(軟), CG(中軟), CG(中硬), CG(硬))のうち, ランダムに選び出した1つを視覚刺激として用い, プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さを被験者に記憶してもらう。なお, 指マーカの有無については被験者ごとに設定した。
2. 被験者に目隠しをさせた状態で, 4つの実物体をランダムな順番で握らせる。目隠しをするのは, 実物体の見た目による硬さの推測を避けるためである。
3. プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さと最も感覚が似ている実物体を被験者に回答させる。
4. 1~3の手順を計16回, 各CGでそれぞれ4回の回答が得られるようにCGをランダムに変えて試行する。
5. 別日に, 指マーカの有無を変更して1~4の手順を行う。別日程で実施するのは, 記憶による推測をなるべく避けるためである。

なお, すべての試行において被験者は自身の利き手でデバイスを握り, かつ体験中は姿勢を大きく変えないように指示した。

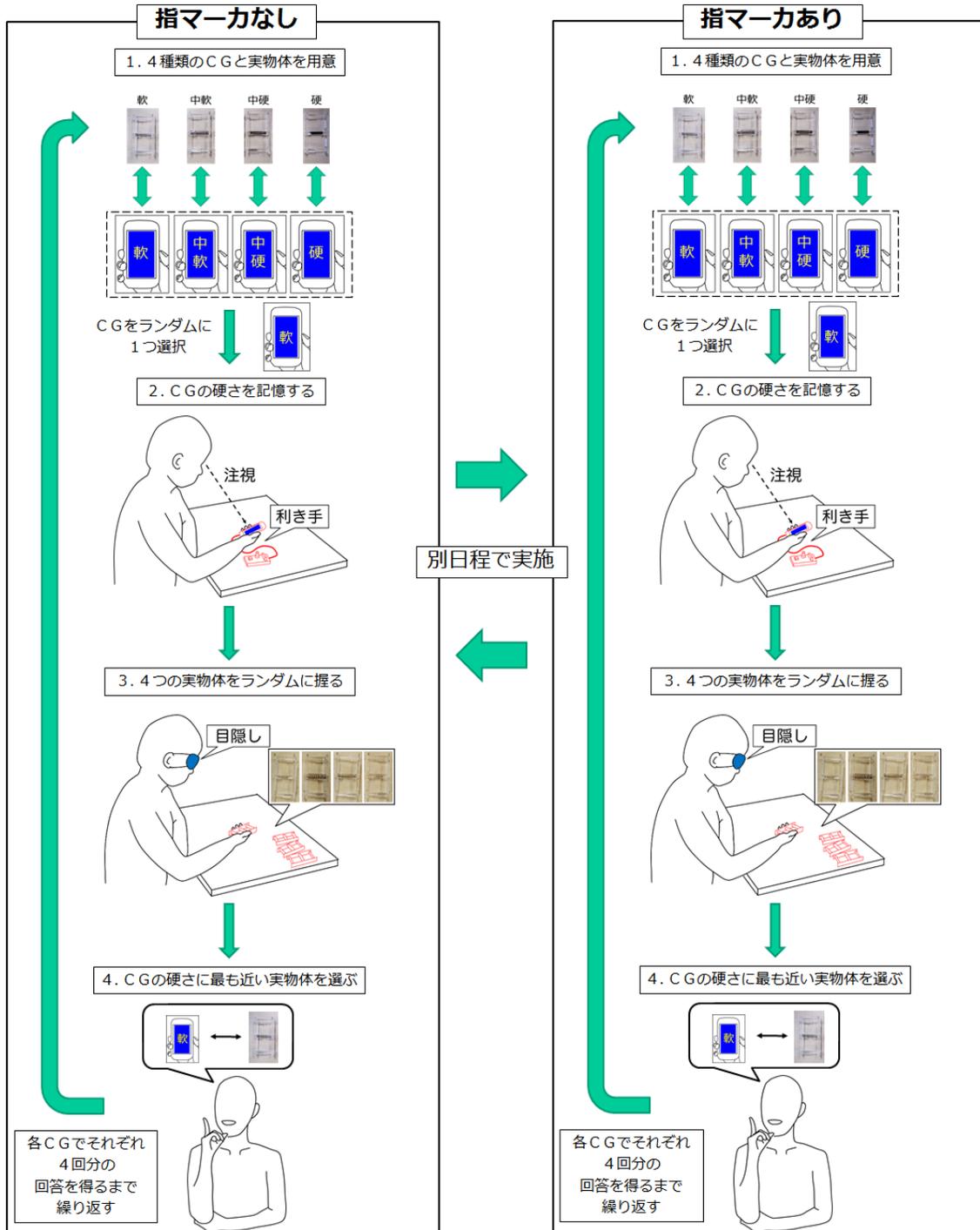


図 4.6 実験概要図

4.4. 実験結果

実験は20代男性5名(右利き4名, 左利き1名)で行った. 図4.7に各被験者の指マーカの有無による正答数を示す. 指マーカを追加することで, 5名中2名は正答数が向上し, 3名は正答数が変化しなかった.

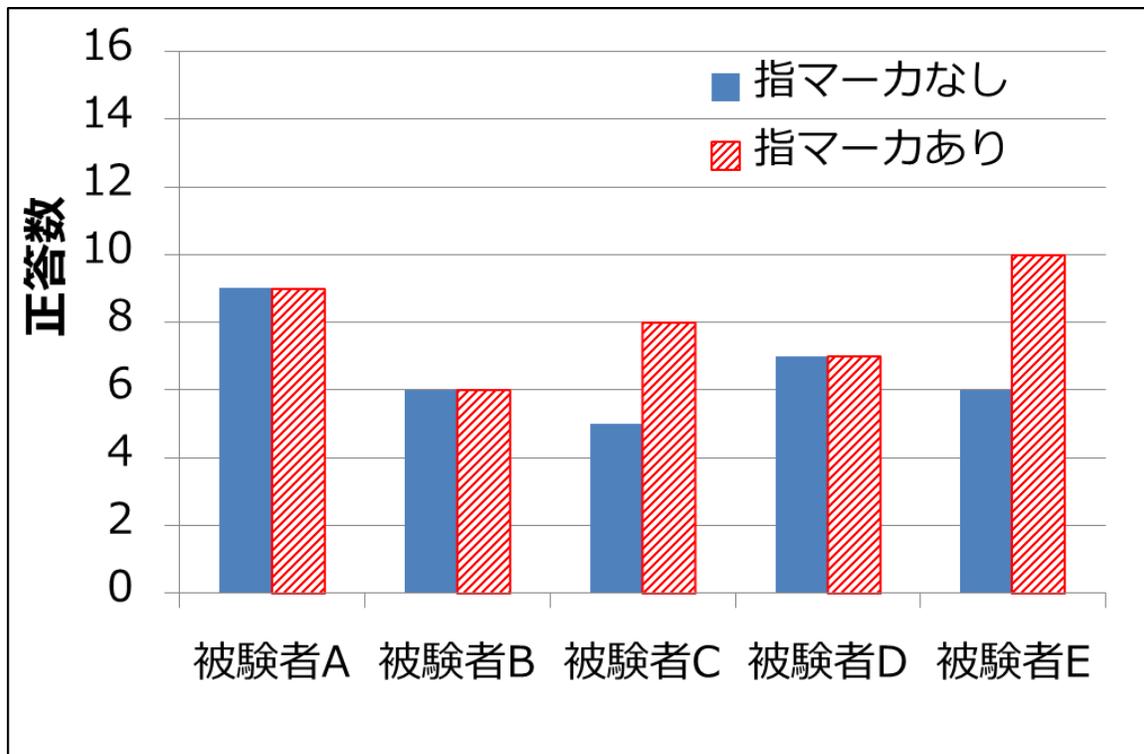


図 4.7 指マーカの有無による各被験者の実験結果

また、各視覚刺激における被験者の回答結果を図 4.8 に示す。この結果から、指マーカ無しの刺激では CG(軟)および CG(中軟)の正答に難を要していたが、指マーカありの刺激ではどちらも正答しやすくなっていることが伺える。一方で、CG(硬)の正答数は下がっている。この結果について詳細に解析するため、各視覚刺激に対する全回答をまとめたものを図 4.9 に示す。

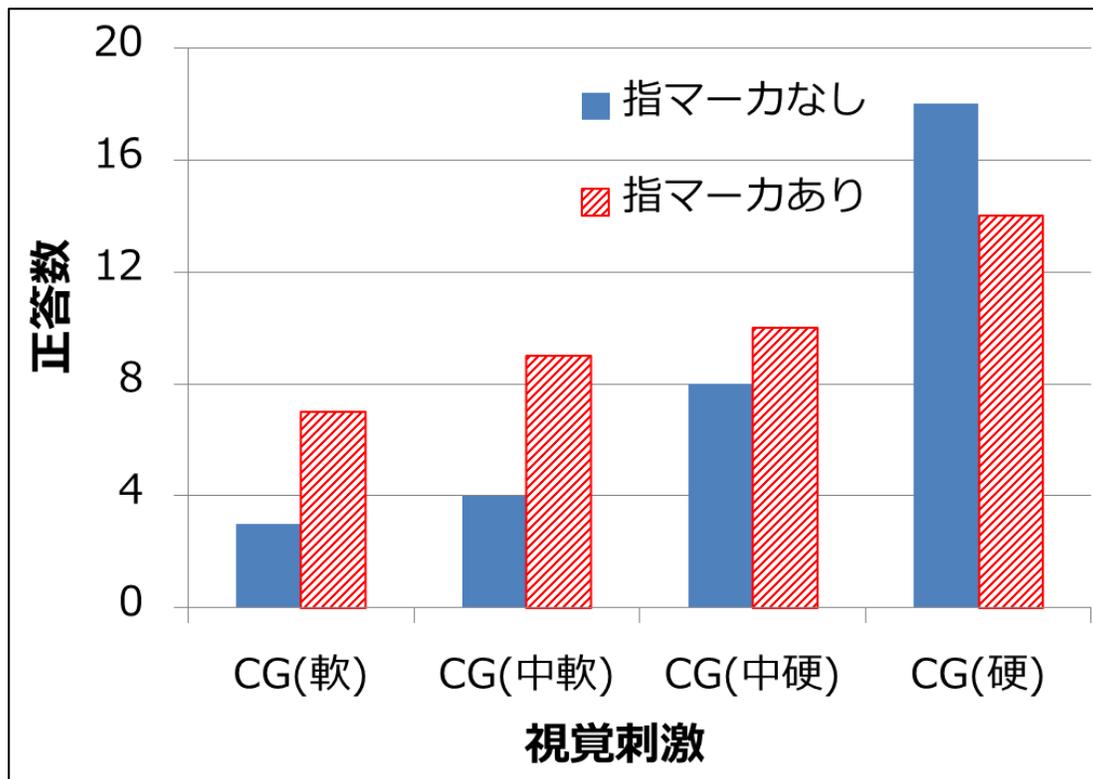


図 4.8 各視覚刺激の回答結果

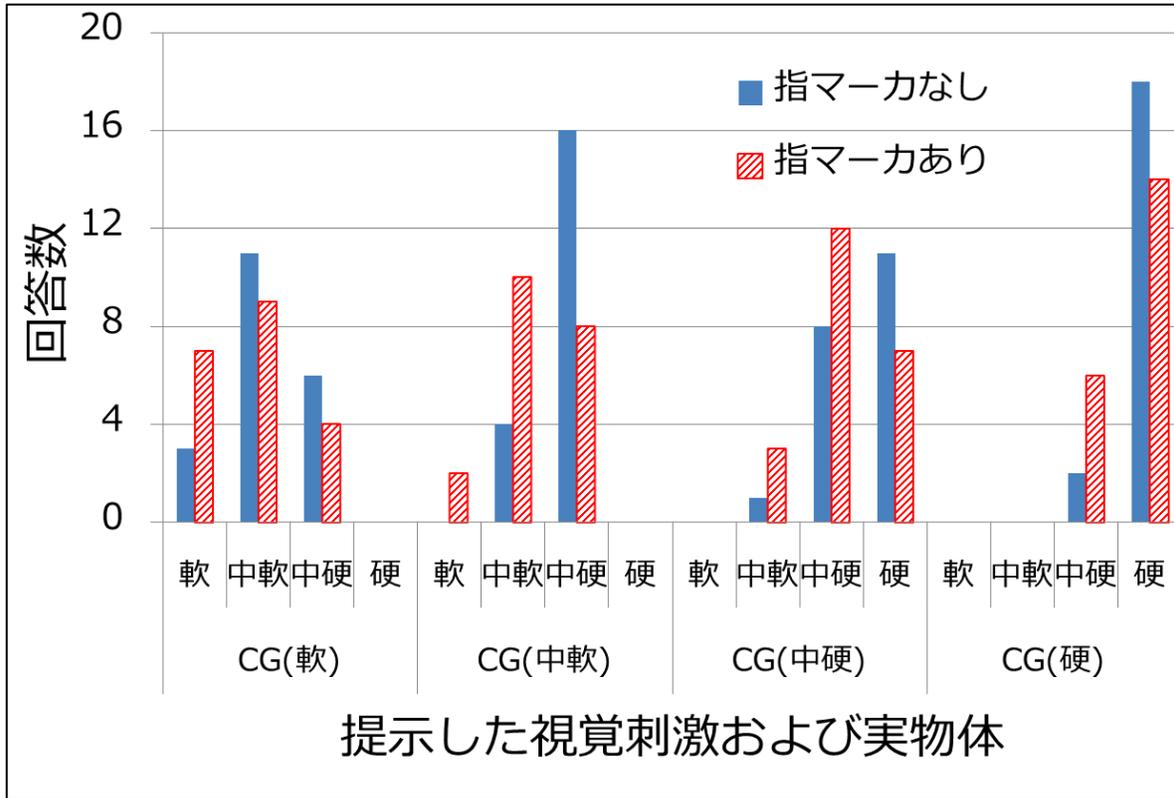


図 4.9 各視覚刺激の回答結果(詳細)

図 4.9 を見ると、指マーカなしの視覚刺激では提示した CG よりも硬い実物体を選ぶ傾向があるが、指マーカありの視覚刺激の場合ではその傾向が軽減され、提示した実物体よりも軟らかいものを選択する場合も多少増加していることがわかる。

4.5. 考察

本実験の結果から、指マーカによる硬軟感知覚への影響について考察する。まず、図 4.7 を見ると各人の錯触覚の発生に多少の影響が考えられるが、その効果については大きくないように見える。しかし、図 4.8 を見ると指マーカを付加することで、CG(軟)および CG(中軟)の正答数が増加し、CG(硬)の正答が減少していることがわかる。これらを総合して考察すると、正答数で比較した際に効果があまり見られなかったのは正答する CG が変化したことによるものであると考えられる。すなわち CG(軟)や CG(中軟)の正答数が向上したのに対し、CG(硬)の正答数が減少したことにより、実験を通しての正答数には変化が表れなかったということである。

また、回答を詳細にまとめた図 4.9 を見ると、従来の視覚刺激では提示した CG よりも硬い実物体を選ぶ傾向があったが、指マーカを追加することによってその傾向が軽減されており、提示した CG よりも軟らかい実物体を選択する回数も増加していることわかる。これらのことから、指マーカを追加することによって従来の視覚刺激よりも軟らかく知覚されることが考えられる。被験者からは、矩形の変形前に指マーカが表示されるため変形の瞬間がわかりやすくなり、従来の視覚刺激よりも軟らかく感じた、という指マーカによる影響が示唆されるコメントも得られた。

第5章

変形形状を変化させた視覚刺激による比較実験

前章では、指マーカの追加した視覚刺激による硬軟感知覚への影響について検証した。その結果、従来の視覚刺激よりも軟らかく知覚される可能性が示唆された。本章では、第3章で述べた問題点のうち、矩形の変形形状について検討したため記述する。また、従来の視覚刺激とは異なる形状に変形させた視覚刺激を用いることによって、硬軟感知覚に影響が生じるか検証する。検証は実物体との比較によって行い、実験に使用した実物体は前章と同様のものを用いた。以下、作成した視覚刺激と検証手法について記述する。

5.1. 変形形状を変化させた視覚刺激

従来刺激における現実との差分を解消するため、変形形状を変化させた視覚刺激を作成した。作成した視覚刺激は図 5.1 のようになっており、力を加えた点を頂点として正弦波形状に変形するものである。

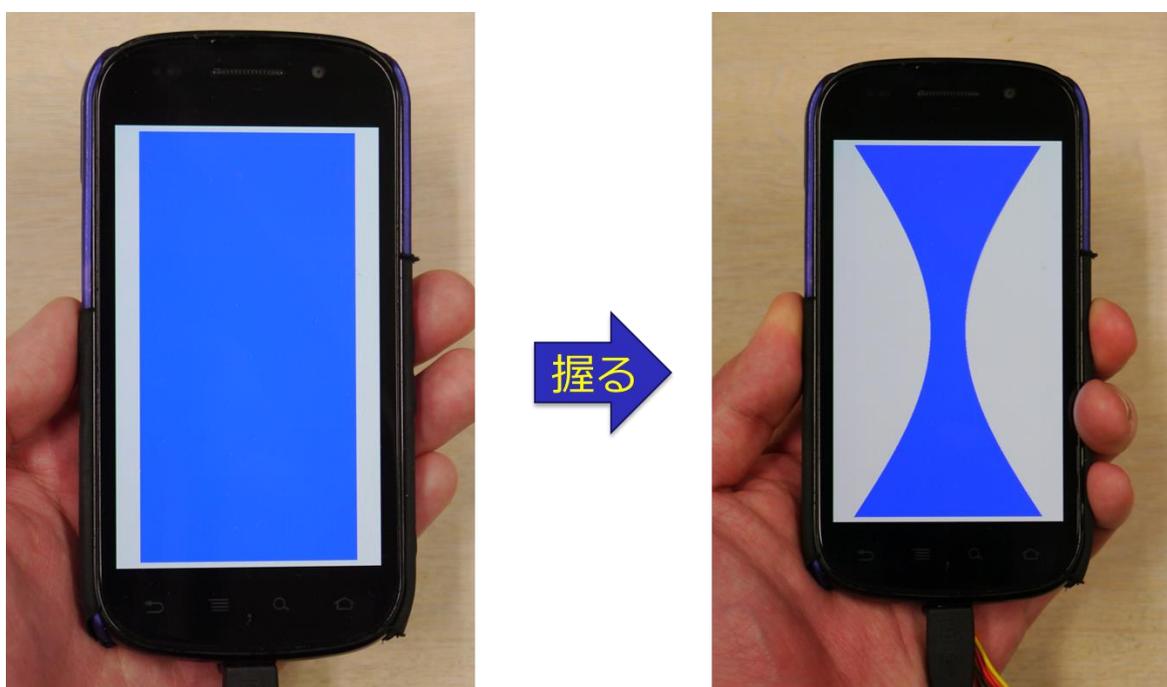


図 5.1 変形形状を変化させた視覚刺激

5.1.1. 視覚刺激のパターン

本実験で用いた視覚刺激を図 5.2 に示す。本実験では各実物体に変化を合わせた4種類の視覚刺激と、ダミーとして3種類の視覚刺激を作成した。ダミーとなる視覚刺激は、変化を実物体に合わせた視覚刺激の間を埋めるように作成した。これは、試行中に各実物体と視覚刺激を関連付けられることを避ける狙いと、ダミーの回答

結果から被験者の知覚傾向を知る狙いがある。各視覚刺激には従来通り矩形全体が変形するものと、正弦波形状に変形するものの2種類を用意した。

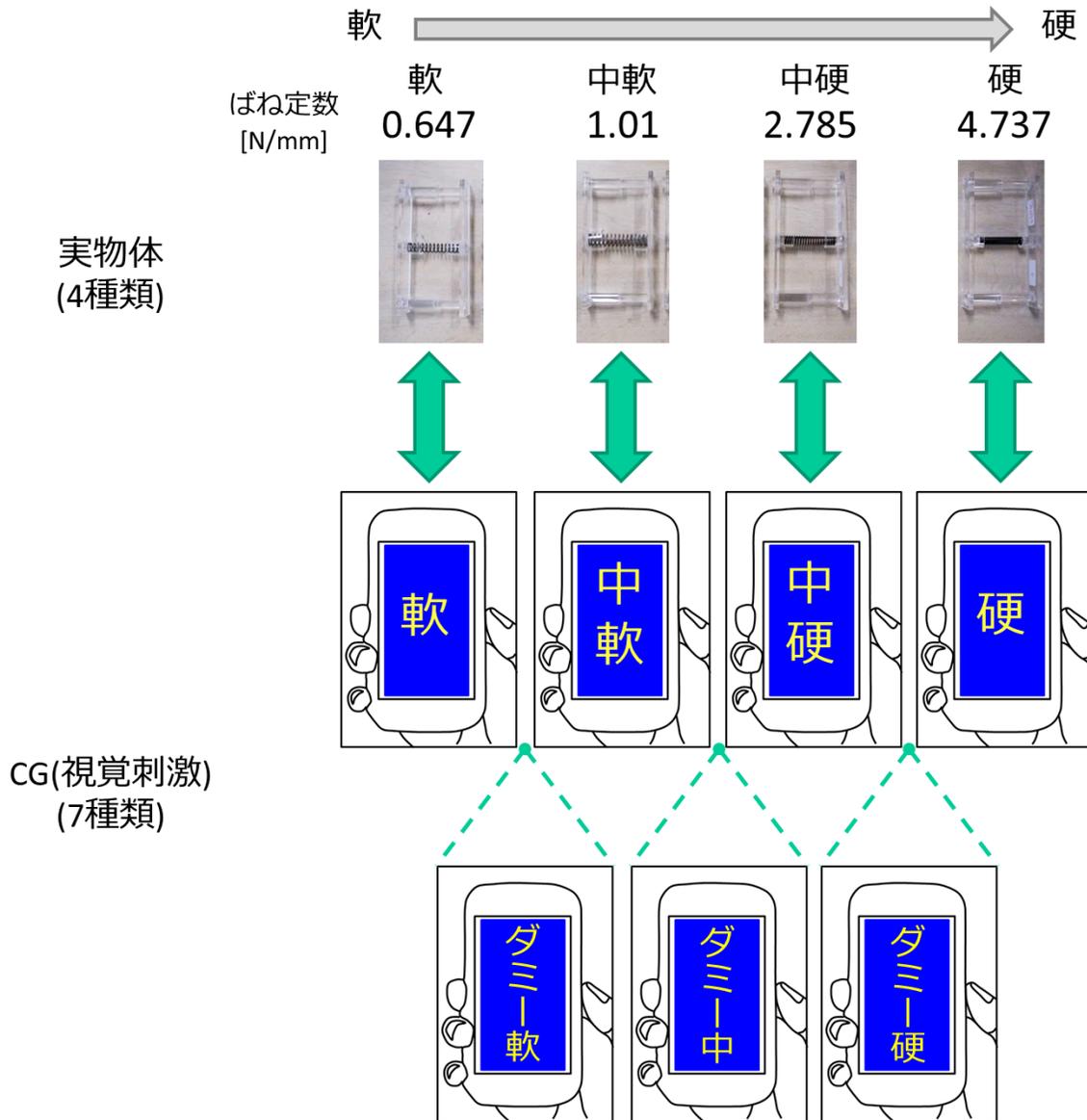


図 5.2 本実験で使用した視覚刺激のパターン

5.2. 実験手順

実験手順は以下のとおりである。実験手順の概要を図 5.3 に示す。

1. 7種類のCG(CG(軟), CG(中軟), CG(中硬), CG(硬), ダミー3種類)のうち, ランダムに選び出した1つを視覚刺激として用い, プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さを被験者に記憶してもらう。なお, 変形形状は被験者ごとに設定した。
2. 被験者に目隠しをさせた状態で, 4つの実物体をランダムな順番で握らせる。目隠しをするのは, 実物体の見た目による硬さの推測を避けるためである。
3. プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さと最も感覚が似ている実物体を被験者に回答させる。
4. 1~3の手順を計21回, 各CGでそれぞれ3回の回答が得られるようにCGをランダムに変えて試行する。
5. 翌日, 変形形状を変更して1~4の手順を行う。別日程で実施するのは, 記憶による推測をなるべく避けるためである。

なお, すべての試行において被験者は自身の利き手でデバイスを握り, かつ体験中は姿勢を大きく変えないように指示した。

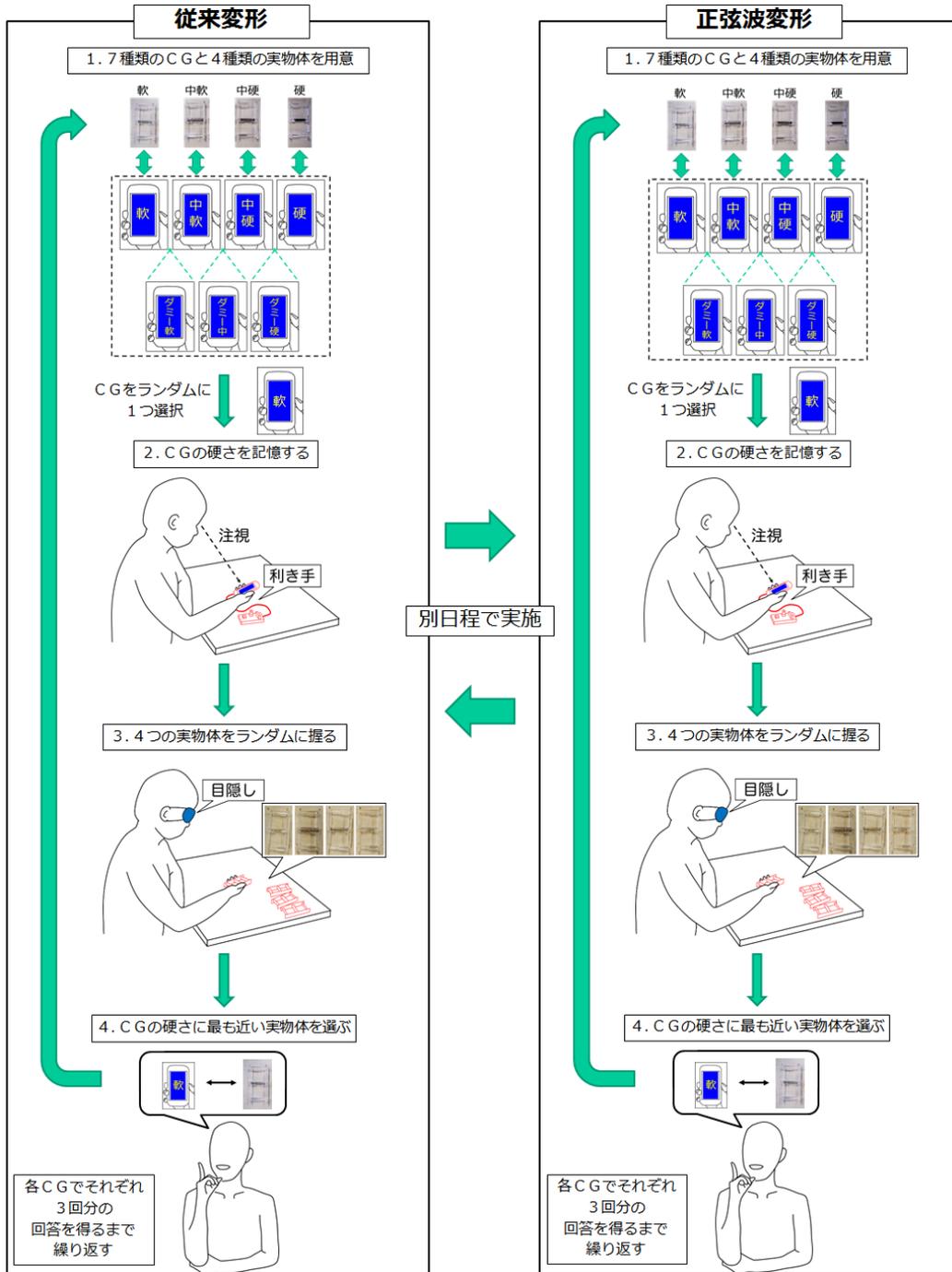


図 5.3 実験手順概要図

5.3. 実験結果

実験は20代の男性4名で行った(右利き3名, 左利き1名). 図5.4に各被験者の変形形状による正答数を示す. 図から, 4人中3人の被験者の正答数が向上していることがわかる.

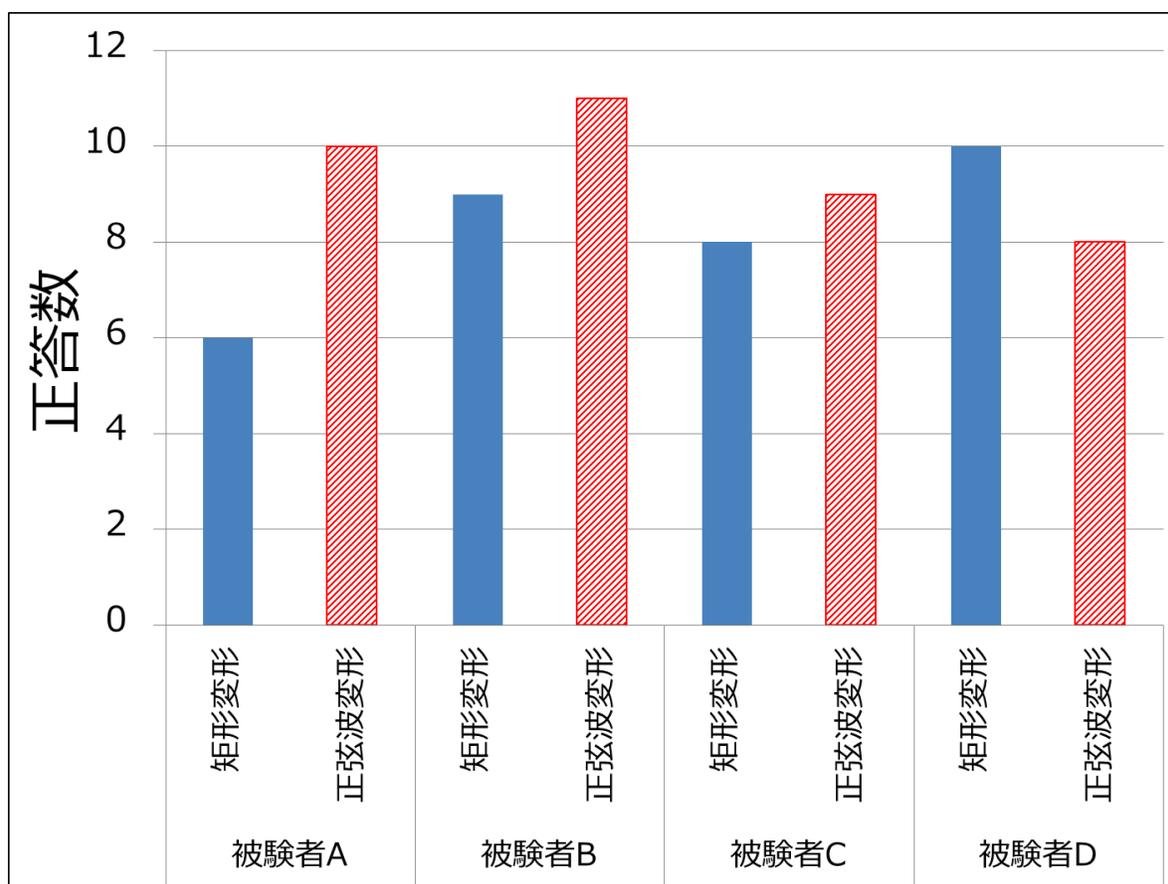


図 5.4 各被験者の正答数

また、各視覚刺激における正答数を図 5.5 に示す。図 5.5 から従来の矩形変形に比べて正弦波変形では CG(中硬)および CG(硬)の正答数が向上していることがわかる。一方で、CG(軟)および CG(中軟)については変形形状による影響が見られなかった。

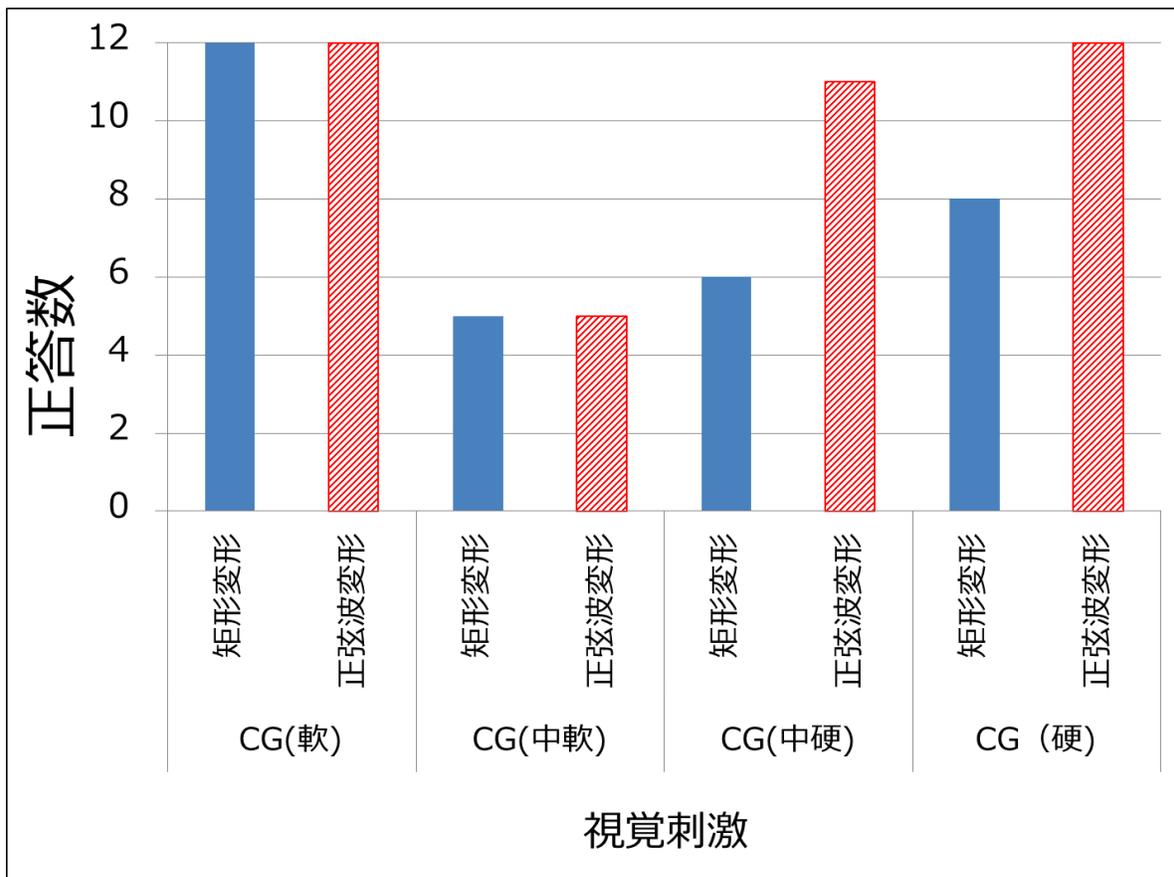


図 5.5 各視覚刺激の正答数

最後に、本実験で用意したダミーの視覚刺激に対する回答結果を図 5.6 に示す。この図から多少のばらつきはあるものの、矩形変形に比べて正弦波変形では提示した視覚刺激よりも硬い実物体を選択する傾向が伺える。

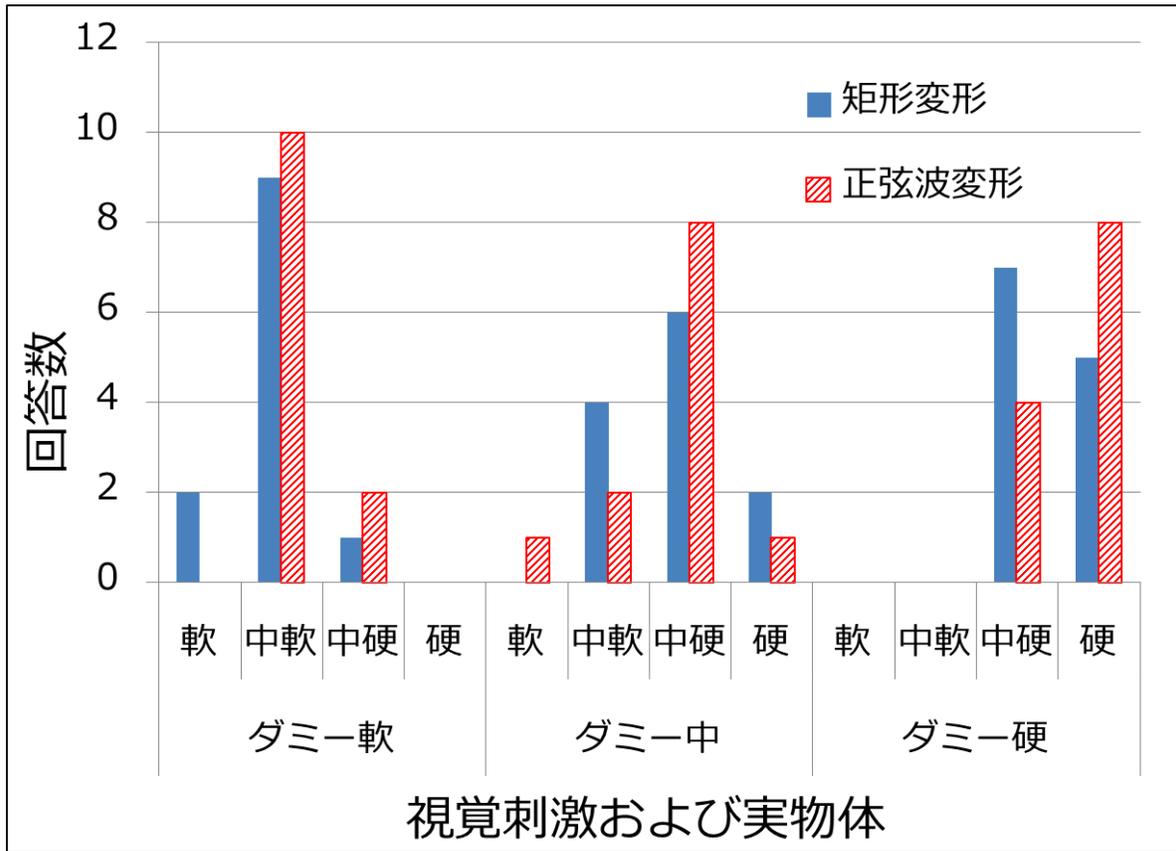


図 5.6 ダミーに対する回答結果

5.4. 考察

本実験の結果から、変形形状による硬軟感知覚への影響について考察する。まず図 5.4 から、4人中3人の被験者の正答数が向上していることがわかる。これは、図 5.5 の各視覚刺激の正答数を見ると、CG(中硬)と CG(硬)の正答数が向上していることから、硬い視覚刺激の判別が容易になったことによる影響であると考えられる。

次に図 5.6 を見てみると、正弦波変形ではダミーの視覚刺激に対して、矩形変形よりも硬い実物体を選択する傾向があることがわかる。これについては本実験の結果からだけでは断定できないが、変形する面積の違いなどが考えられる。すなわち矩形変形に比べて正弦波変形では変形面積が狭いため、矩形変形よりも硬く知覚されやすかった可能性がある。

また、被験者から多く寄せられたコメントとして、正弦波変形をする視覚刺激では実物体の変形形状と異なるために、硬さの判別が難しくなったというものが得られた。本実験で使用した実物体は 4.1 節で説明した一軸方向に変形するものであるが、変形形状のみで見ると矩形変形に近いものとなる。そのため、矩形変形による視覚刺激では、その変位量から硬さの推測がしやすかった可能性がある。しかし今回作成した正弦波変形では、実物体とは異なる変形形状のため知識による推測が利用しづらくなったことから、このようなコメントが得られたのではないかと考えられる。

第6章

考察

本章では、本論文で提案した視覚刺激による硬軟感知覚への影響を検証した実験結果について、本研究の目的に則した形で考察を行なう。

6.1. 指マーカによる硬軟感知覚への影響

本節では第4章の実験結果より、指マーカを表示した視覚刺激による硬軟感の錯覚提示について考察する。本実験は、従来の視覚刺激と現実世界との差分を解消することによって、より効果的に錯覚提示を行なうことができるかを検証するために、問題の一つであった物体に力を及ぼしているものを視覚的に提示することで差分を解消し、その効果を検討するものであった。実験結果から、従来の視覚刺激に比べて指マーカを追加した視覚刺激のほうが、軟らかく知覚される可能性が示唆された。特に各視覚刺激に対する回答傾向を見ると、従来の視覚刺激では提示したCGよりも硬い実物体を選択する傾向があるのに対し、指マーカを追加した視覚刺激ではその傾向が軽減され、提示したCGよりも軟らかい実物体を選択する回数が僅かながら増加した。また、被験者から矩形の変形前に提示される映像に変化があることから、軟らかく感じたなどのコメントも得られた。これらの結果から、指マ

一カによる硬軟感知覚への影響は少なからずあるだろうと考えられる。また、指マーカーを追加することによって、従来の視覚刺激では提示できなかった軟らかさが提示できる可能性もある。しかし、現状では軟らかく感じられる傾向があるというものであり、従来刺激と比べてどの程度軟らかく感じられているのかについては、詳しい評価を行なう必要がある。また、従来刺激で提示できない軟らかさを提示できるか調べるためには、従来刺激の知覚限界を調べる必要があるだろう。

6.2. 変形形状による硬軟感知覚への影響

本節では、第5章で行った変形形状を変更することによる硬軟感の錯触覚提示について考察する。本実験は、従来の視覚刺激の変形形状に着目し、現実世界に近い変形形状に変更することによる知覚への影響について検証した。実験結果から、正弦波形状に変形する視覚刺激では、従来の矩形変形のものより正答数が向上する結果となった。特に、各視覚刺激の正答数から硬い視覚刺激の判別が容易になっていることが伺える。また、ダミーの視覚刺激に対する回答結果から、矩形変形よりも硬く知覚される傾向が伺えた。これは第4章とは逆の効果が得られていると考えることができる。しかし、被験者のコメントから実物体の変形形状による影響が示唆されている。すなわち、実験で使用する実物体の変形形状と視覚刺激の変形形状が近い場合には結果が逆転する可能性も考えられる。また、このコメントは硬軟感知覚において、物体の変形形状が強い影響を持っている可能性を示唆している。今後、変形形状による影響を評価する際には、視覚刺激の形状だけでなく実物体の再検討も必要であろう。

6.3. 総評

本論文で行った実験は以下のとおりである。

- 矩形に対して力を及ぼすものの表示による硬軟感知覚への影響の検証
- 矩形の変形形状による硬軟感知覚への影響の検証

以上について、本論文の目的である視覚刺激の改良によるハンドヘルド型錯触覚提示システムの有用性向上について考察する。

まず、指マーカを追加することによる影響については、従来の視覚刺激よりも軟らかく知覚されていることが示唆された。これにより、本手法による硬軟感提示を行なう上で、軟らかい感覚を提示する際のパラメータとして用いることができる可能性がある。また、指マーカを追加することで従来の視覚刺激では提示できない軟らかさを提示できる可能性も考えられる。

次に、正弦波変形による知覚への影響については、指マーカとは逆に、従来の視覚刺激よりも硬く知覚される傾向が伺えた。これにより、本手法による硬軟感提示を行う上で、硬い感覚を提示する際のパラメータとして用いることができる可能性があると考えられる。また、実物体と視覚刺激の変形形状に齟齬が生じることで、実物体の判別が行いにくくなったというコメントから、この変形を利用することで本システムによる錯触覚提示が、感覚として知覚していることを示すための一助になる可能性もある。

6.4. 今後検討すべき事項

本節では、検証実験から得られた知見を基に、本システムによる錯触覚提示を行う上で今後検討すべき事項について、視覚刺激とデバイス構成に分けてまとめる。また、本システムの価値を高めるために考えられる手法についても記述するとともに、本システムによる錯触覚提示を検証する上で検討すべき事項についてもまとめる。

6.4.1. 視覚刺激の検討

本システムによって錯触覚提示をする上で、視覚刺激は影響の大きい要素であると考えられる。第4章では矩形に対して力を加えている要素を、第5章では矩形の変形形状についてその影響を検証したが、これらの要素以外にも視覚刺激については様々なパラメータがあると考えられる。ここでは、視覚刺激について考えられる項目についてまとめる。

- テクスチャによる硬軟感知覚への影響

これまで用いてきた視覚刺激は、青の単色矩形画像であった。現実世界において人間は物体の材質などの視覚的な情報から硬さの推測を行なうことができるが、現行の視覚刺激では、矩形画像がどのように変形するか視覚的な要素だけで推測することはできない。第4章及び第5章で、現実世界との差分を解消することによって硬軟感知覚に影響を与えたことから、視覚的な要素から硬さが推測できるような視覚刺激への変更を行なうことで、硬軟感知覚に何らかの影響を与えることが考えられる。なお、本要素について検討する上で試作した視覚刺激を付録に掲載する。

- 色による硬軟感知覚への影響

視覚刺激を構成する要素として、色も重要な要素の一つである。本論文で取り扱った視覚刺激は青の単色画像であった。また、第4章で取り扱った指マーカについては黒の単色画像であり、どちらも視認性の良さから実装したものである。しかしこれらの色を、例えば赤色に変更すると硬軟感知覚に違いが生じる可能性が考えられる。また、文献[27]は色の明度によって知覚される硬さに違いがあるという報告をしており、色情報を利用し、視覚誘導性錯触覚によって物体の重さを変化させるといった手法も報告されている[28]。これらのことから、色によってより硬い／軟らかい知覚を提示することができる可能性がある。また、指マーカについては、より人間の肌に近い色で実装することが考えられるが、視認性の良さも考慮しつつ実装すべきだろう。

- 変形面積による影響

第5章の実験結果から、正弦波変形は矩形変形に比べて硬く知覚される傾向が見られた。この要因の一つとして、変形面積による影響が考えられる。これについて現行のデバイスで検証するための手法としては、例えば従来の視覚刺激と矩形の一部分のみが矩形変形するような視覚刺激との比較が考えられる。また、視覚刺激の大きさについてはデバイスの大きさに依存するところもあるため、デバイスに対する視覚刺激の大きさの関係も明らかにする必要があるだろう。

6.4.2. 提示デバイスに関する検討

本論文で用いたデバイスは、一般に普及しているスマートフォンとフィルム型の圧力センサ、制御用のマイコンによって構成されていた。構成要素のうち、硬軟感知覚に影響する要素として考えられるものとしてスマートフォンのサイズや、圧力センサの設置数などが挙げられる。ここでは、デバイス構成において硬軟感知覚に影響を与える可能性のある要素についてまとめる。

- 把持動作への応答速度

第4章の実験より被験者から、矩形の変形前に映像に変化があったため軟らかく感じたというコメントが得られている。このことから、把持動作から視覚刺激に変化が表れるまでの応答速度が、硬軟感知覚に影響を与えている可能性が考えられる。例えば、変形するまでの時間に遅延を生じさせることで、視覚刺激のばね定数が同じでも、より硬く感じられる可能性がある。また、スマートフォンの処理速度以上の応答速度を持ったデバイスを利用することで、硬軟感知覚が鋭敏となる可能性も考えられる。

- デバイスの大きさとセンサの設置数

本システムは前述のとおりスマートフォンを用いて構成されており、指先の位置はこのデバイスの大きさに依存している。この指先の位置によっても硬軟感知覚に影響をおよぼす可能性がある。また、デバイスの大きさや形状によって設置できるセンサ数やセンサの位置も変化すると考えられる。今後、より実用的なシステムの実現を目指すためには、センサ数を増やすことによって様々な握り方に対応することも考える必要があるだろう。

- 他感覚刺激との組み合わせ

硬軟感を提示する手法は多岐にわたり、いくつかの手法は組み合わせることによって、より効果的に硬軟を知覚させることができる可能性がある。特に近年では、振動刺激単体での硬軟感提示に関する研究が行われている[21][22]。本手法は視覚刺激を用いており、他感覚と競合していないため、これらの手法を基に本手法に振動刺激を付加することで、より効果的な錯触覚提示を行なうことができる可能性がある。また、視覚刺激を利用した錯触覚に振動刺激を付加することによって、より効果的に錯触覚提示を行える傾向を示した例も報告されている[29]。本システムをより実用的なものにするための手法として、他感覚刺激との組み合わせは考えておくべきであろう。

6.4.3. その他検討すべき事項

本論文では、作成した視覚刺激による硬軟感知覚への影響について、実物体との比較によって調査した。実験終了後に被験者から得られたコメントから、今回利用した実物体や実験環境において、いくつか検討すべき事項が考えられる。ここでは、ハンドヘルド型錯触覚提示システムによる知覚への影響について検証する上で、検討すべき事項を記述する。

- 実物体の再設計

本論文の実験では、実際の物体を触ったときの硬さと、錯触覚によって提示したときの硬さを比較させることで、視覚刺激による影響を調査した。このとき用いた実物体はデバイスと同様の大きさではあるが、指先の位置が物理的に変位するものであった。対して、本システムはデバイスの物理的な硬さは変化しないため、指先

の位置は変位しない。すなわち、実物体を握った際には指先の変位からも硬さの情報得られてしまう。これを極力避けるためには、指先の変位が少なく、かつ硬さを認識できる実物体を用意する必要がある。これについて考えられる実物体としては、ゲルやウレタンがある。形状はデバイスと同様であるが、硬さが違うものを複数用意し、それらと同様の変形を行なうように調整した視覚刺激を用いることで、デバイスによる提示と近い状態での比較が可能であると考えられる。

また、実物体の変形形状は4.1節で説明したように一軸方向に変形するものであるが、この変形形状と視覚刺激の変形形状との間に差分が生じた場合、硬さの判別が難しくなったというコメントが第5章の実験において得られている。変形形状について調査する際には、視覚刺激だけでなく実物体の変形形状についても考慮する必要があるだろう。

● 実験環境の再検討

本論文の実験では、硬さの異なる実物体と、それぞれの実物体の変形に合わせた視覚刺激を用意し実験を行った。第5章では視覚刺激にどの実物体の変形にも該当しないダミーを設けたが、試行中に被験者が実物体の硬さを覚えてしまうといった状況が散見された。このことについて被験者からは、試行回数が増えるとともに実物体の硬さを覚えていき、システム体験時から硬さの推測ができたというコメントが得られている。この場合、試行前半と試行後半では被験者が回答する際に利用できる情報量が異なっており、回答結果に影響を与えてしまう可能性がある。すなわち、試行前半では触覚的な情報の影響を、試行後半では知識による推測による影響を強く受けた回答傾向となってしまう可能性が考えられる。これを極力回避する手

法としては実物体側のダミーを多数用意する手法が考えられるが，試行回数が膨大となるためシステムにおける知覚解像度を調査し，その結果を踏まえてばね定数などを慎重に吟味すべきである．また，1つの視覚刺激に対する試行回数を減らすといった手法も考えられるが，その場合は被験者数を増やすなどの対策が必要となるだろう．

第7章

結論

本論文では，ハンドヘルド型デバイスを用いた視覚誘導性錯触覚による硬軟感提示において，従来の視覚刺激と現実世界との差分に着目し，差分を解消することによる硬軟感知覚への影響について検証した．着目した現実世界との差分は以下の2つである．

- 矩形に対して力を及ぼしている要素の表示
- 矩形の変形形状

これらの差分について，本論文では新たに2つの視覚刺激を作成することで差分の解消を試み，硬軟感知覚への影響について検証した．

検証実験の結果，矩形に対して力を及ぼすものを表示することで，従来の視覚刺激に比べて軟らかく知覚される傾向が示唆された．また，変形形状については逆に硬く知覚される傾向が示唆され，これらのパラメータを活用することで従来の視覚刺激に比べてより広範囲な硬さの提示ができる可能性が考えられる．また，本実験で検証した事項以外にも現実世界との差分は残っているほか，視覚刺激の色やデバイスの大きさなど，硬軟感知覚に影響を与える要素は多数存在すると考えられる．今後はそれらの事項を検証していくとともに，振動などの他感覚刺激を組み合わせ

ることなども視野に入れ, システムをより実用的なものに近づけていくことが必要であろう.

参考文献

- [1] Thomas. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects", Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 295-300, 1994.
- [2] M.Sato, "SPIDAR and virtual reality", Automation Congress, 2002 Proceedings of the 5th Biannual World, Vol.13, pp.17-23, 2002
- [3] CyberGlove systems,
<http://www.cyberglovesystems.com/products/cybergrasp/overview>, 最終訪問日
2014/01/22
- [4] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, R. Boian: The Rutgers Master II-new design force-feedback glove; IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.7, No.2, pp.256-263, 2002.
- [5] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎, "知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.47-58, 2006.
- [6] Takashi Kimura and Takuya Nojima, "Pseudo-haptic Feedback on Softness Induced by Grasping Motion", Proceedings of EuroHaptics, vol.2, pp.202-205,2012.

-
- [7] 木村 堯, 野嶋 琢也, ”錯触覚を用いた握り動作における硬軟感知覚”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.292-295, 2012.
- [8] 池田 義明, 藤田 欣也, ”指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.2, pp.187-194, 2004
- [9] Yasushi Matoba, Toshiki Sato, Nobuhiro Takahashi, Hideki Koike, ”ClaytricSurface: An Interactive Surface With Dynamic Softness Control Capability”, ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, 2012.
- [10] 菰池 裕美, 松下 光範, “Hedgehog : 硬さの変わるインタフェース”, インタラクション 2011, 2011
- [11] Sdhant Gupta, Tim Campbell, Jeffery R. Hightower, Shwetak N.Patel, “SqueezeBlock: Using Virtual Springs in Mobile Devices for Eyes-Free Interaction”, Proceedings of ACM Symp. on User Interface Software and Technology(UIST 2010), pp101-104, 2010
- [12] 北岡明佳の錯視のページ, <http://www.ritsumeai.ac.jp/~akitaoka/>, 最終訪問日 2014/01/22
- [13] 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.
- [14] Lionel Dominjon, Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Paul Richard, Simon Richir, “Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments”, In Proceedings of IEEE VR 2005, pp19-25, 2005
- [15] Chantal Keller, Jérémy Bluteau, Renaud Blanch, Sabine Conquillart, “Pseudo-Weight:

- Making Tabletop Interaction with Virtual Objects More Tangible”, Proceedings of ACM Interactive Tabletop and Surfaces(ITS 2012), pp201-204, 2012
- [16] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Laurent Etienne, “Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures, In Proceedings of CHI 2004, pp.239-246, 2004
- [17] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, “Modifying an Identified Curved Surface Shape Using Pseudo-Haptic Effect”, In Proceedings of IEEE Haptic Symposium 2012, pp211-216, 2012
- [18] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, “Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?”, In proceedings of IEEE VR, pp83-90, 2000
- [19] Yuichi Hirano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, Hideyuki Tamura, “Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness, In proceedings of IEEE VR, pp51-54, 2011
- [20] Arata Kokubun, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, “ARAtouch: Visuo-haptic Interaction with Mobile Rear Touch Interface”, Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2013, pp19-22, 2013
- [21] Johan Kildal, “Kooboh: Variable Tangible Properties in a Handheld Haptic-Illusion Box”, In proceedings of EuroHaptics 2012, No.2, pp191-194, 2012
- [22] 鈴木 隆裕, 池田 篤俊, 高松 淳, 小笠原 司, “把持型触覚提示デバイスを用いた振動による柔らかさ提示”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.7, pp718-726, 2012

- [23] Nexus S, <http://www.samsung.com/us/mobile/cell-phones/GT-I9020FSTTMB>, SAMSUNG, 最終訪問日 2014/01/22
- [24] RT-ADK, <http://rt-net.jp/product/rtadkseries/>, RT Corporation, 最終訪問日 2014/01/22
- [25] FSR-400, <http://www.interlinkelectronics.com/jp/FSR400.php>, Interlink Electronics, 最終訪問日 2014/01/22
- [26] Maisarah Binti Ridzuan, Yasutoshi Makino, and Kenjiro Takemura, “Direct Touch Haptic Display Using Immersive Illusion with Interactive Virtual Finger”, In Proceedings of EuroHaptics 2012, pp432-444, 2012
- [27] 山川 聡子, 松家 伸一, “物体の色が硬さの知覚におよぼす影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, pp356-361, 2011
- [28] 鳴海 拓志, 伴 祐樹, 藤井 達也, 櫻井 翔, 井村 純, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝, “拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援”, Vol.17, No.4, pp333-342, 2012
- [29] 蜂須 拓, Gabriel Cirio, 古川 正紘, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, 梶本 裕之, “触振動刺激付加による Pseudo-Haptic Feedback の拡張: 平面上の凹凸感呈示”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011
- [30] Georg von Békésy, “Neural Funneling Along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea”, Proceedings of THE JOURNAL OF ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, Vol.31, No.9, pp.1236-1249, 1959.
- [31] 石井 明日香, 佐藤 未知, 福嶋 政期, 古川 正紘, 梶本 裕之, “手部触覚による奥行き情報の提示”, 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集,

pp.310-313, 2011

- [32] Hiromi Mochiyama, Akihito Sano, Naoyuki Takesue, Ryo Kikuuwe, Kei Fujita, Shinji Fukuda, Ken'ichi Marui, Hideo Fujimoto, "Haptic Illusions induced by Moving Line Stimuli", Proceedings of Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005., pp.645-648, 2005
- [33] 望山 洋, "触覚イリュージョンから探る脳内力学", 電気情報通信学会研究報告. Hip, ヒューマン情報処理 107(332), pp.91-96, 2007
- [34] A.D. Craig, M.C. Bushnell, "The thermal grill illusion: unmasking the burn of cold pain." Science, Vol.265, pp.252-255, 1994
- [35] 串山 久美子, 土井 幸輝, 笹田 晋司, 馬場 哲晃, "Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発", インタラクション 2012, pp723-728, 2012

付録

A. 圧力センサの電圧値から力への変換

本研究で用いている圧力センサ(FSR-400)の，抵抗値 - 重さの特性グラフを図A.1に示す．この特性図をもとに，圧力センサで測定された電圧値から FSR-400 の抵抗値を計算し，重さを算出する．

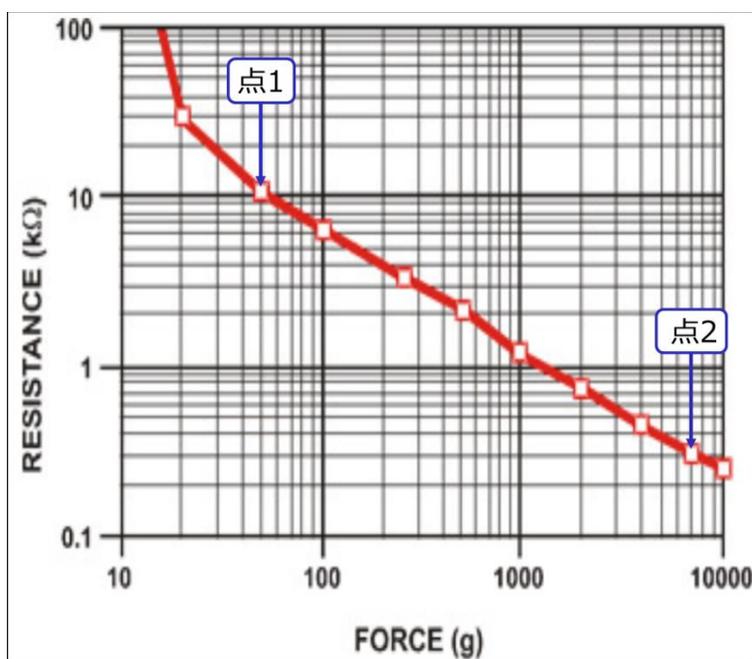


図 A.1 FSR-400 の抵抗値 - 重さ特性

まず，図 A.1 は両対数グラフであり線形性が高いため，重さを W ，抵抗値を R_F とすると，

$$\log_{10} R_F = a \times \log_{10} W + b \quad (1)$$

が成立する．このとき， a および b の値は

点 1: $(\log_{10}(50), \log_{10}(10 \times 1000))$

点 2: $(\log_{10}(7000), \log_{10}(0.3 \times 1000))$

より， $a = -0.71, b = 5.2$ が得られる．

また，式(1)を変形すると，

$$\begin{aligned} \log_{10} R_F &= a \times \log_{10} W + b \\ &= \log_{10} W^a + \log_{10} 10^b = \log_{10}(W^a \times 10^b) \end{aligned}$$

となり，

$$R_F = W^a \times 10^b \quad (2)$$

が得られる．

次に，FSR-400 の測定回路図を図 A.2 に示す．

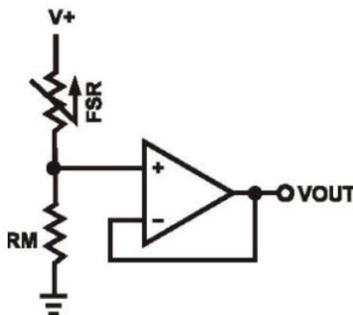


図 A.2 FSR-400 の抵抗値 - 重さ特性

この図において V_{OUT} で測定される電圧 V_O は

$$V_O = \frac{R_m \times V_+}{R_m + R_F} \quad (3)$$

によって求められ、式(2)より、

$$W^a = \frac{R_m(V_+ - V_O)}{V_O \times 10^b} := f(V_O) \quad (4)$$

となり

$$W = 10^{\frac{\log_{10} f(V_O)}{a}} \quad (5)$$

と表せる。

本研究で、センサの読み取りとして用いているマイコン(RT-ADK)が AD 変換可能な電圧は最大 5V であり、10bit の分解能を持っているためマイコン上で得られる値を V_{AD} とすると、

$$V_{AD} = \frac{V_O}{5} \times 2^{10} \quad (6)$$

$$V_O = \frac{V_{AD}}{2^{10}} \times 5 \quad (7)$$

となる。

従って、式(5)および(7)から、圧力センサで測定された値[V]から重さ[g]に変換する式は、

$$W = 10^{\frac{\log_{10} f\left(\frac{V_{AD}}{2^{10}} \times 5\right)}{a}} \quad (8)$$

となる。式(8)から、圧力センサで測定された値から力 F [N]に変換する式は

$$F = 9.8 \times \frac{W}{1000} \quad (9)$$

となる.

B. テクスチャを付加した視覚刺激

現実世界において人間は物体の材質などの視覚的な情報から硬さの推測を行なうことができる(図 B.1). しかし, 現行の視覚刺激は青の単色矩形画像であり, 矩形画像がどのように変形するか視覚的な要素だけで推測することはできない. この点においても現実世界との差分が生じており, 第4章及び第5章で現実世界との差分を解消することによって硬軟感知覚に影響を与えたことから, 映像から硬さが推測できるような視覚刺激への変更を行なうことでも, 硬軟感知覚に何らかの影響を与えることが考えられる.

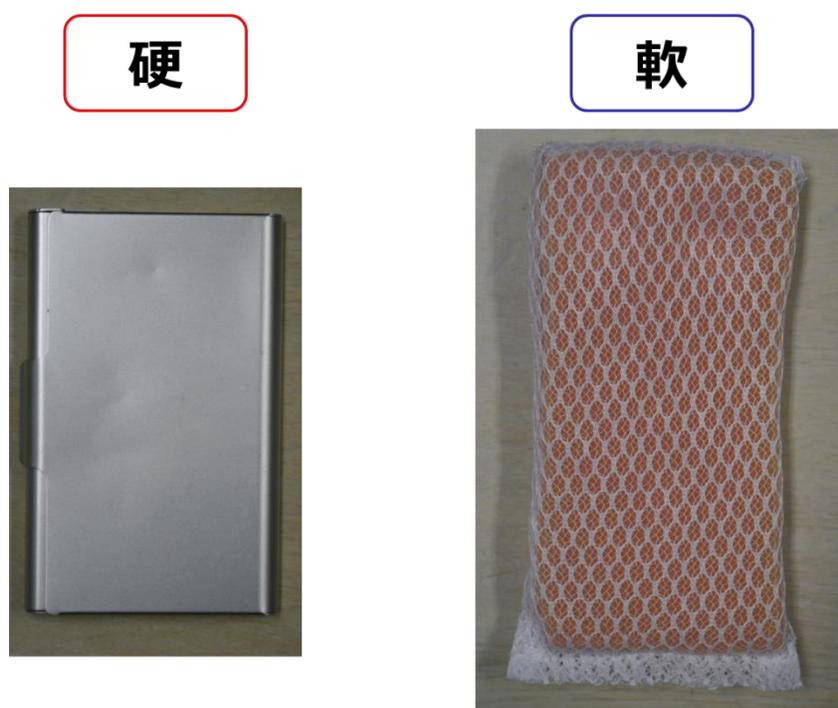


図 B.1 材質による硬さの推測

そこで，本論文ではテクスチャを付加した視覚刺激を作成した．作成した視覚刺激を図 B.2 に示す．

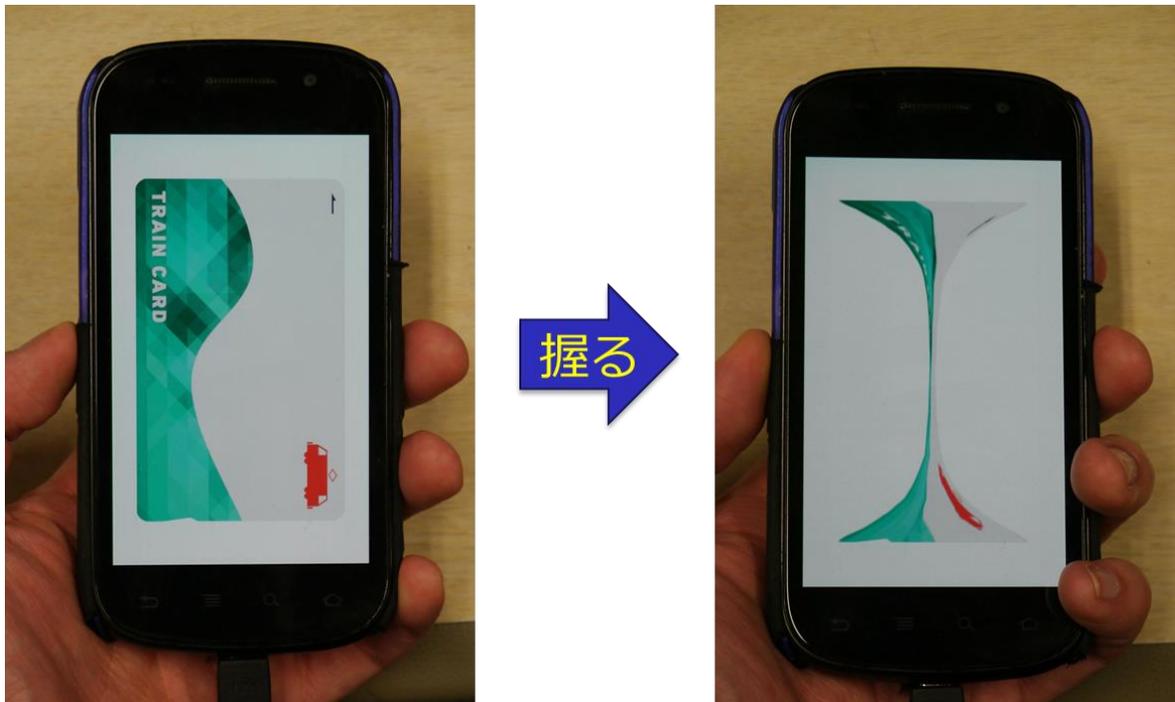


図 B.2 テクスチャを付加した視覚刺激

本視覚刺激は押下力に応じて画像をリアルタイムに切り替えることで作成した．電車などで用いられる IC カードをモチーフとしており，作成に使用した画像は変形前(図 B.2 左)から変形後(図 B.2 右)までで 30 枚である．画像は 1 枚ごとに 10pixel ずつ変化し，中央から徐々に変形を開始する．

本視覚刺激による硬軟感知覚への影響を検証することは，現行の実験環境では難しいが，カード内の情報を無くし(文字情報，絵の情報など)，カード内を一様なテ

クスチャにすることで、従来の矩形画像との比較が可能になると考えられる。また、変形形状については中央部から変形するものと、矩形が一様に変形するものを作成したため、まずは矩形が一様に変形するものからその影響を調査すべきであると考えられる。

C. 変位制限の設定手法

第4章で行った実験では、視覚刺激の変位量に制限を設けた視覚刺激を利用して、これは木村が行った実験から、変位量を握った力に応じてどこまでも変形するものではなく、60%変位した時点で変形を止めることで、より効果的に錯触覚を提示できるという結果のもと設けた制限である。ここでは、その変位制限の設定手法について説明する。

変位制限の設定手法を図 C.1 に示す。図のように、まず被験者に変位制限を設けていない視覚刺激を10回程度握らせ、その時の変位量の最大値 W_m を計測する。 W_m を基に変位量 x_m を算出し、その値を利用して変位制限を設ける。例えば、変位量が80であった場合、60%制限を設けると変形が64で止まる視覚刺激が生成される。

木村は従来の視覚刺激と、60%および30%の変位制限を設けた視覚刺激を用いて実物体の比較実験を行っており、その結果60%制限を設けた視覚刺激が最も正答数が高かったことを報告している。

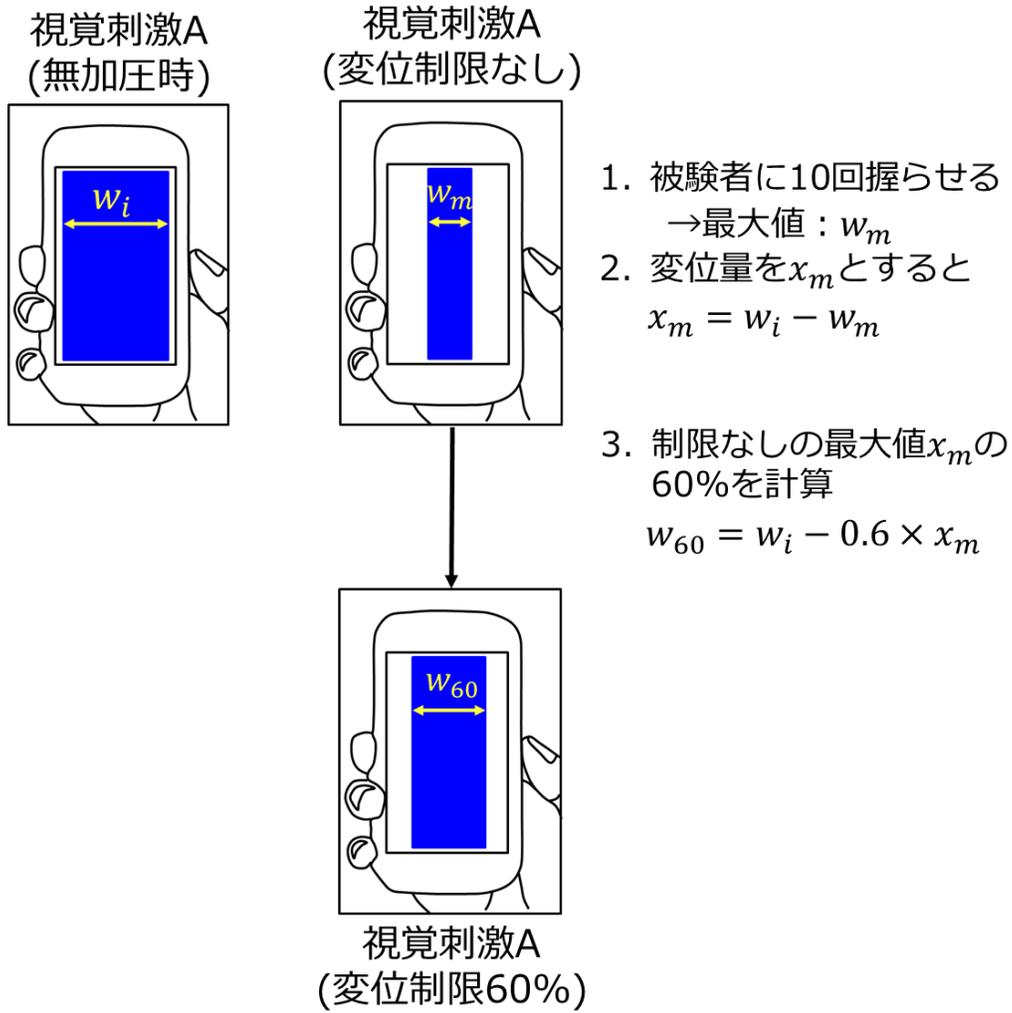


図 C.1 変位制限を設けた視覚刺激の作成手順

謝辞

博士前期課程の入学から修了までの2年間を通して、様々な活動において熱心にご指導いただいた野嶋琢也准教授並びに小池英樹教授に厚く御礼申し上げます。野嶋琢也准教授には研究の進め方や論文の書き方、研究・技術的な知識など様々なことを学ばせていただきました。また、多くの方に本研究を見ていただける機会を作っていただいたことで、今後の人生を送る上で非常に良い経験をさせていただきました。心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、研究室の先輩である木村亮さんには大変お世話になりました。研究の基礎からアイデアまで様々なご助言をいただけたため、このような成果をあげることができました。深く感謝いたします。

また、多摩美術大学の益子悠さんには多数の画像作成をしていただきました。私自身では手の届かない分野について多くの助力をいただき、知見を広めることができました。ありがとうございました。

小池・野嶋研究室の同期である、合原範行君、大出慶晴君、太田智也君、Jefferson Pardomuan 君、Shin Phuong 君、関口和人君、宮内将人君、畑元君、山口裕明君、山野真吾君には、研究や実験、普段の生活など多くの点でお世話になりました。ありがとうございました。

最後になりましたが、上京してからも不自由ない学生生活を支援してくださった

家族に心より感謝いたします。

発表文献

- [1] 岸野 博明, 木村 堯, 野嶋 琢也, “錯触覚を用いた把持動作による硬軟感知覚時における視覚刺激の影響”, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2013), 2I3-2, 2013