慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	身体運動と協調した触覚提示によるスポーツ体験の共有に関する研究
Sub Title	Sharing sports experience based on the synchronized representational of haptic sensation with body motion
Author	水品, 友佑(Mizushina, Yusuke) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kota)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2014
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2014年度メディアデザイン学 第340号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002014-0340

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2014年度(平成26年度)

身体運動と協調した触覚提示による
スポーツ体験の共有に関する研究

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

水品 友佑

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に

修士 (メディアデザイン学) 授与の要件として提出した修士論文である。

水品 友佑

審査委員:

南澤 孝太 准教授 (主査)

太田 直久 教授 (副査)

舘　暲 特別招聘教授 (副査)

修士論文 2014 年度(平成 26 年度)

身体運動と協調した触覚提示による
スポーツ体験の共有に関する研究

カテゴリー: エンジニアリング

論文要旨

東京オリンピックが開催されているであろう 2020 年でのスポーツの視聴の仕方はどのようになっているだろうか．従来の主なスポーツ観戦方法であるテレビ放送の次世代を考えてみると，高精細化，スマートテレビなどがトレンドにあげられ，従来の迫力のある映像と多種多様な情報を，テレビを見ながら得ることができようになると考えられる．しかし，それらは基本的には従来のスポーツの視聴と変わらず,「受動的な視聴」に留まったままであるといえる．

そこで本研究では「受動的な視聴」によるスポーツの観戦ではなく,「体験」としてのスポーツ観戦が可能なシステムの提案をする.「映像」,「動き」,「触覚」を合わせてユーザに提示することにより，受動的なスポーツ視聴ではなく，スポーツ選手が感じている体験をユーザが共有可能なシステムの構築を行う．

キーワード:
触覚，身体運動，スポーツ観戦，Augmented Sports

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科
水品　友佑

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2014

Sharing Sports Experience based on the Synchronized Representational of Haptic Sensation with Body motion

Category: Engineering

Summary

In 2020, Olympic will be held at Tokyo. Not just Japanese audience, but also people all over the world will be watching the great Olympics in real-time via TV Broadcasting. With the development of Smart TV, High resolution displays, audience can experience much rich audio / visual content compared to the past.

In this research, apart from traditional audio-visual transmission, also referred to as "Passive Viewing" an immersive experience was proposed to the audience around the world by delivering haptic information synchronised with audio-visual content. This "Active Viewing" experience would be a new sports viewing experience to the television audience. Conventional audio-visual transmission channel infrastructures were used to distribute haptic content to every audience around the world.

By synchronising haptic sensation together with audio and visual content, audience can feel similar experience so that they are actively playing sports rather than watching it passively. With this system players can share and experience their playing experience around the world. .

Keywords:

Haptic Sensation, Body motion, Sports watching, Augmented Sports

Graduate School of Media Design, Keio University

Yusuke Mizushina

目　　次

第 1 章 序論 1
1.1. 背景.....1
1.2. 本研究の目的.....3
1.3. 本論文の構成.....3

第 2 章 関連研究 3
2.1. 触覚技術 5
2.1.1 触知覚原理 5
2.1.2. 触覚ディスプレイ 7
2.2. 映像と触覚 9
2.3. 映像コンテンツと触覚 10
2.4. 身体動作と触覚.....12
2.5. スポーツと触覚.....13
2.6. 映像と動きのシンクロ.....15

第 3 章 スポーツ選手の体験を伝えるシステムの提案 16
3.1. 体験を伝えるシステムのコンセプト 16
3.1.1. 『取得』手法.....17
3.1.2. 『伝送』手法.....18
3.1.3. 『提示』手法.....19
3.2. 触覚ディスプレイの形状.....19
3.2.1. 振動触覚による運動感における触覚提示物体の形状依存性の評価.....20
3.3. バトミントンの体験を伝えるシステム.....23
3.3.1. ラケット型触覚デバイスのプロトタイプ 23
3.3.2. リアルタイム触覚体験システムのプロトタイプ.....25
3.3.3. 記録した触覚体験システムのプロトタイプ.....25

3.4. 触覚ディスプレイの展示 27

第 4 章 「映像」「触感」「動き」伝えることによるスポーツ体験システム.....29
4.1. インタラクティブハプティックスローモーション 29
4.2. 設計.....30
4.2.1. 動きと映像の連動.....30
4.2.2. 動きと触覚の連動.....31
4.3. プロトタイピング.....32
4.4. スローモーション映像.....32
4.4. 展示.....33

第 5 章 結論.....34

謝辞 35
参考文献 36

図　目　次

1.1. AppleTV 4
1.2. Chromecast 4

2.1. 皮膚の機械受容器 6
2.2. PHONToM PREMIUM 1.5 7
2.3. SPIDER-G 7
2.4. GravityGrabber 8
2.5. GyroCubeSeusuos 8
2.6. TECHTILE toolkit 8
2.7. VisualHaptics 10
2.8. Pseudo-haptic 10
2.9. Magic Pot 10
2.10. 触覚スローモーション 10
2.11. NHK 技術研究所「触れるテレビ」 11
2.12. i3Space 11
2.13. HapSeat 11
2.14. 栗原らによる感覚の変容 12
2.15. ラケット型触覚ディスプレイ 13
2.16. Vibrotracker 14
2.17. シンクロナイズドビデオ 14
2.18. 視野共有システムによる心肺蘇生訓練 15

3.1. 体験を伝えるテレビのコンセプト 16
3.2. 「触覚」「動き」の取得手法 17
3.3. 「触覚」「動き」の伝送手法 18
3.4. 「映像」「触覚」「動き」の提示手法 19
3.5. 実験方法 20
3.6. 把持物体 21

3.7. 実験結果.....22
3.8. 触覚取得用ラケット 24
3.9. 触覚提示用ラケット 24
3.10. ラケット型デバイスのグリップの底 24
3.11. リアルタイム伝送システム 25
3.12. 記録風景.....26
3.13. 無線触覚取得用ラケット 26
3.14. 映像，触覚記録システム 26
3.15. 映像，触覚再生システム 27
3.16. KMDforum での展示の様子 28

4.1. フレーム番号の算出方法.....30
4.2. 触感の再生速度の算出方法 31
4.3. システムの概要図 31
4.4. LIVE モード 31
4.5. INTERACTIVE モード 31
4.6. 記録風景.....32
4.7. POHANTOM V711 32
4.8. EuroHaptics2014 での展示 33

表　目　次

2.1 皮膚の機械受容器の分類.....6

第 1 章

序　論

1.1. 背景

2013 年 10 月，2020 年に東京で夏季のオリンピックが開催されることが決定し，特に日本ではスポーツに対する意識が年々高まりつつある．数十年に一度あるかないかの国内でのオリンピック開催とあらば，競技場に足を運び，世界一を目指ししのぎ削り合う選手達の迫力を肌で感じたいという人は，筆者を含め少なくないだろう．しかし，やはりそのような人は少数で，実際にはほとんどの人がテレビ放送や動画配信などでオリンピックを観戦することになるであろう．では，東京オリンピックが開催されているであろう 2020 年でのスポーツの視聴の仕方はどのようになっているだろうか.

2020 年のスポーツ視聴を考えると，やはり現在と同様テレビ放送がスポーツ視聴の中心になると考えられる．次世代テレビ放送のながれの 1 つとして高精細化があげられる．総務省が発行している平成 25 年度版の情報白書[1]では，次世代の放送の実現に向けた取り組みとして，4K，8K といった高精細な映像技術を活用した放送技術の開発が，官民一体となり活発に進められていることを言及している．具体的には，4K 放送については 2014 年（ブラジル・ワールドカップの開催年）に、8K 放送については 2016 年（リオデジャネイロ・オリンピックの開催年）に、それぞれ試験的な放送を開始することを目指しており，各メーカもこぞって 4K 対応機種を発売している．現在は，主流のテレビのサイズより大きなサイズであることや，価格が高額であることから一般家庭にはあまり普及していないものの，将来テレビの標準として拡がっていくことだろう.

テレビの高精細化に並ぶ，次世代テレビのトレンドとしてスマートテレビについて述べる．平成 24 年に総務省が策定している「スマートテレビの推進に向けた基本戦略」ではスマートテレビが必要とする基本機能として次の 3 点を挙

げている[2].

1 点目は，テレビ放送とインターネットが一体化する「放送・ウェブ連携」である．大容量、高信頼、同報性を有した放送コンテンツと，双方向、個別ニーズに対応可能なウェブアプリケーション・コンテンツがテレビで扱えるようになり，従来よりも視聴可能なコンテンツが大幅に増えることになる．

2 点目は「多様なアプリケーション・コンテンツの提供」である．スマートテレビでは，テレビ視聴のほかに，SNS や音楽コンテンツなどが使用できるようになる．特に SNS の使用によりマルチ画面で番組を視聴しながら他のユーザとテレビ画面上でやり取りをしたり，またリアルタイムに視聴者からのフィードバックが得られることから，その情報をもとに番組の構成を変化させていくといった視聴者と制作者が双方向性を活用した番組作りが可能になる．

3 点目に挙げられているのは「端末間連携」である．これは、OS や製造元メーカに関わらず，パソコンやスマートフォン、タブレットなどの様々な端末の接続が可能なことである．例えばパソコンでダウンロードした映像コンテンツをテレビで視聴したり、またその反対にテレビで録画した番組を各端末に転送したり，あるいはスマートフォンでテレビを操作するなど，様々な利用の仕方が想定できる．このように使用目的や状況により多様化する情報端末を，家庭内でつなげるハブとしての役割が期待される．

日本では家電メーカがスマートテレビの開発を進めているが，世界に目を向けると Google や Apple といった別ジャンルの大手企業が, スマートテレビ用の端末を発売していることから状況からも，スマートテレビが次世代のテレビの形としての注目が集まっていることが示唆される．

図 1.1. Apple TV[3]

図 1.2. Chromecast[4]

次世代テレビの潮流として 4K，8K といったテレビの高精細化と，スマートテレビを挙げた．これらによりスポーツの視聴は，高精細な映像により迫力のある選手のプレーを見ることができ，またマルチ画面を用いて，競技を見ながら選手のデータなどを確認することができるだろう．しかし，このような視聴が可能になったとしても，基本的には従来のスポーツの視聴と変わらず，「受動的な視聴」に留まったままである．

1.2. 本論文の目的

そこで，本研究では，従来の「受動的な視聴」によるスポーツの観戦ではなく，「体験」としてのスポーツ観戦が可能なシステムの提案を行う．具体的には「映像」に加え，競技中のスポーツ選手の「動き」と，視聴覚よりも能動的な感覚である「触覚」取得し，「映像」，「動き」，「触覚」を合わせてユーザに提示することにより，受動的なスポーツ視聴ではなく，スポーツ選手が感じている体験をユーザが共有可能なシステムの構築を行う．

1.3 本論文の構成

第 2 章　関連研究

本研究のシステムや提案手法に関連する既存の研究を「映像」，「動き」，「触覚」の観点から述べる．またそれらの特徴，問題点，本研究との関係について述べる．

第 3 章　スポーツ選手の体験を伝えるテレビの提案

本研究での提案内容と，それを実現するための要件定義について述べる．加えて要件の 1 つである触覚デバイスの形状についての実験を報告する．それらを加味した触覚デバイスのプロトタイプと，デモ展示について述べる

第 4 章

「映像」，「動き」，「触覚」を合わせた体験型のスポーツ観戦システムの提案内容と，システムのプロトタイピング，またその展示について述べる．

第 5 章　結論

第 5 章では，本研究のまとめを述べる．

第 2 章

関　連　研　究

2.1. 触覚技術

2.1.1 触知覚原理

人の感覚は大きく次の 3 つに分類され，視覚，聴覚，嗅覚，味覚，平衡感覚を指す「特殊感覚」，内臓器官に起こるもので，胃の満腹感や，膀胱の充満感などを指す「内臓感覚」，振動覚，圧覚，温冷覚，痛覚などを指す皮膚感覚と，骨格筋，腱，関節で感じる感覚を指す深部感覚からなる「体性感覚」である[5]．このように分類される感覚の中での触覚は，狭義では皮膚感覚の一部として扱われるが，本論文での体性感覚とほぼ同義として扱う．以下，触覚を皮膚感覚，深部感覚から説明する．

皮膚感覚は文字通り皮膚で感じる感覚である．皮膚には外界からの多様な情報を得るため，機械受容器，温度受容器，侵害受容器の大きく 3 種類の皮膚感覚の受容器が存在する[6]．本論文で扱う皮膚感覚は，外部との接触や自身の運動や姿勢の変化に伴っておこる皮膚組織の機械的変形によるもので，これは主に機械受容器によって検出され発生する感覚である．皮膚には 4 種類の機械受容器が存在し，表皮に近いモノからマイスナー小体，メルケル触盤，ルフィニ終末，パチニ小体である．またこれらの機械受容器は，応答速度の時間変化の違いと，受容野の広さの特徴から分類することができ，それらをまとめたものを表 2.1 に示す[7]．マイスナー小体は物体のエッジの鋭さや微細な突起などの検出に優れ，メルケル触盤は指腹に対して垂直な方向への変形の応答に優れ，物体の材質や形状の検出に適している．またパチニ小体は受容野が広く，最も感度の良い受容器で振動感覚に寄与している．ルフィニ終末は局在的な圧迫や皮膚の引っ張りに応答する[6]．

表 2.1: 皮膚の機械受容器の分類

	Slowly Adapting 静圧力応答	Fast Adapting 速度加速度応答
受容野：狭い 受容器位置：浅い	SA I メルケル触盤	FA I　RA マイスナー小体
受容野：広い 受容器位置：深い	SAⅡ ルフィニ終末	FAⅡ　PC パチニ小体

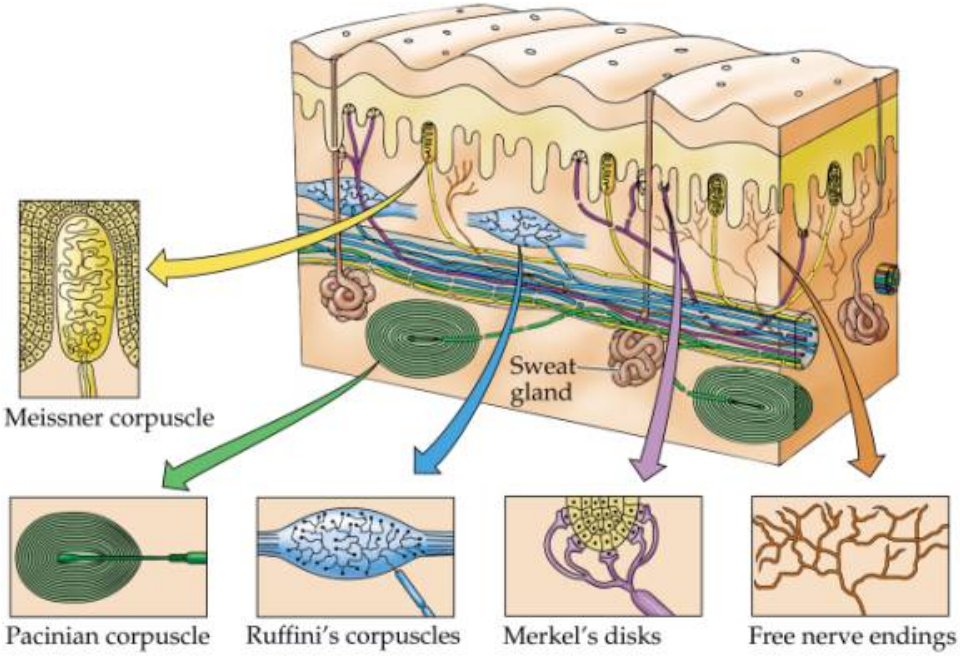


図 2.1. 皮膚の機械受容器[8]

深部感覚は筋肉・腱・関節・靭帯などの深部組織に受容器を持つ感覚である．筋肉には筋繊維に交じって筋紡錘と呼ばれる受容器があり，これにより筋肉の伸張の感覚を生じる。腱には振動刺激を受容するパチニ小体，筋の圧迫，つねりなどの感覚を受容する自由神経終末などの受容器がある[9]．一方，関節嚢にはルフィニ終末、パチニ小体、自由神経終末などの受容器が存在する。ルフィニ終末は遅順応型(SA)の受容器で、関節角の知覚に関与しているとされ、パチニ小体は速順応型(FA)の受容器で、関節の動きの速度の知覚に関与している。靭帯にはゴルジ終末、ゴルジ・マッツォニ小体などの存在が知られており，ゴルジ終末は速順応型の受容器で、関節の動きの方向や速さの知覚に関与している．深部感覚はこれらの受容器により体の各部位の位置や運動の状態や，体に加わる抵抗や重量などを感じる感覚である．

2.1.2 触覚ディスプレイ

ここでは先述した触知覚の原理から設計された触覚ディスプレイを分類し紹介する．

接地型触覚ディスプレイ

SensAble 社の PHONToM[10]は，リンクのエンコーダにより作業点の 3 次元座標を取得し，ユーザの動きに応じてモータにより 3 次元の力覚の提示が可能である．SPIDAR[11]は格子の中央の球体に糸がつながっており，糸の長さの変化により球体の 3 次元座標を取得し，糸をモータで巻き取ることによって力覚を提示が可能な触覚ディスプレイである．

図 2.2　PHOMToM PREMIUM 1.5 [10]

図 2.3 SPIDER-G[12]

非接地型触覚ディスプレイ

Minamizawa らは、モータで指先のベルトを巻き取ることによって，皮膚変形を発生させ、力覚やせんだん力を擬似的に提示することのできる触覚デバイス GravityGrabber を提案している[13]．またこのデバイスを用いて，身体運動に合わせて，触覚を提示することでモノの重量感を知覚させることが可能である．また産業技術総合研究所のグループは，2 つの偏心回転子の回転方向・回転速度・位相関係を制御することで、非接地型の触覚デバイスでありながら任意の方向・強度・周波数の振動・回転力・力感覚を提示することが触覚デバイス GyroCubeSeusuos を提案している[14]．TECHTILE toolkit[15]は，振動センサを用いて対象物から振動を取得し，皮膚の機械受容器に関与する低周波帯域から主に聴覚に関与する高周波帯域までを一様に増幅し，振動子から再生することで容易に触感を提示することができる．

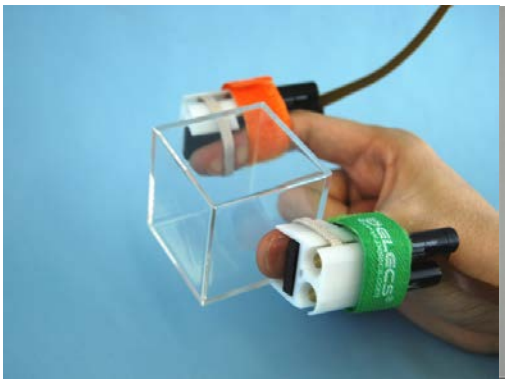


図 2.4 GravityGrabber [13]

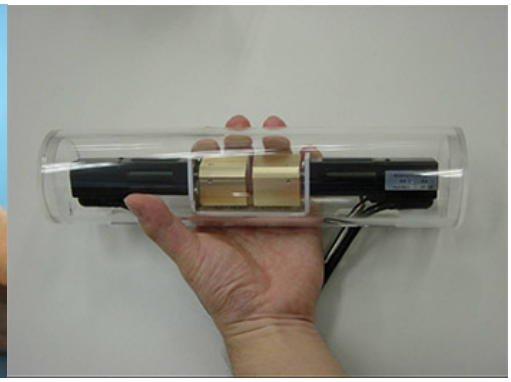


図 2.5 GyroCubeSeusuos [14]

図 2.6 TECHTILE toolkit [15]

2.2 映像と触覚

映像と触覚に錯覚現象として，自身の動きが投射されたマウスカーソルなどの視覚的なの速度変化あるいは大きさの変化によって，擬似的な触覚が生じる現象として Pseudo-haptic がある．Lécuyer ら[16]は，バーチャルなバネの弾性を Pseudo-haptic を用いて再現した際に，ユーザが現実のバネと同様に弁別可能であることを報告している．また同様におもりの重さや，ドアノブのトルクも Pseudo-haptic によって，定量的な力覚をユーザに呈示できることが報告している. 渡辺らも[17]マウスカーソルと触られる対象の動きや形状を変化させることにより，ユーザに実際に触っているような感覚を与えることを VisualHaptics として報告している．また VisualHaptics を体験できる Flash アプリが Web ページ上に公開されており[18]，ざらざら感や立体感，行き感，液体の抵抗感などを感じることができる．また Ban らは Pseudo-Haptics の効果を用いて，触っている物体の形状に対する感覚をインタラクティブに変化させることが可能なシステム Magic Pot[19]を開発している．物体に触れている手の動きや形を，バーチャルな物体を触っているかのように視覚的に変形させてフィードバックすることで映像・触覚・動きの相互作用効果により，実際には形状の変化しない円筒形の物体を触れているにもかかわらず，形状が変化しているかのように知覚させることができる.

橋本らは，映像表現の様々な分野で用いられる手法のスローモーションに着目し，触覚でのスローモーションの効果の検討を行っている．橋本らは，スローモーション触覚再生装置を製作し，映像と同期させて触覚をスロー再生する試みを行い，映像のみの場合よりも大きな感動効果を得ることを報告している[20].またスロー再生時の触感判別能力の検証を行い，通常速度での触覚再生時と比べて同等の判別が可能であり，物の種類によっては通常速度の時よりも細かい違いを判別するが可能なことを報告している[21].

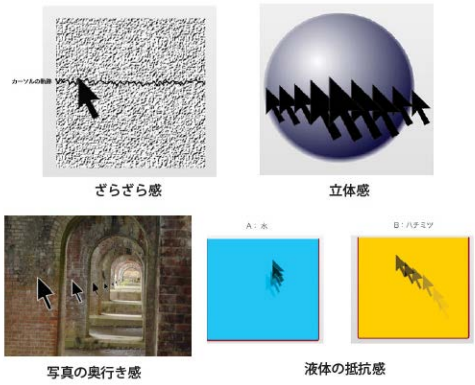


図 2.7 VisualHaptics

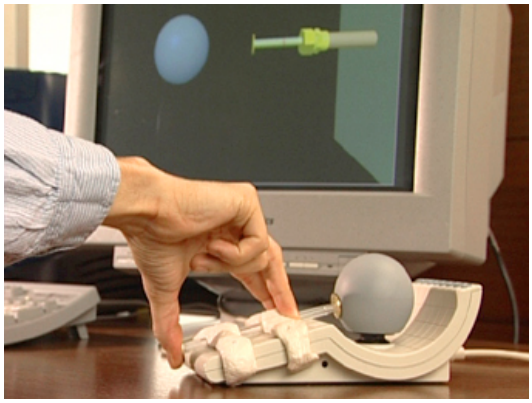


図 2.8 Pseudo-haptic

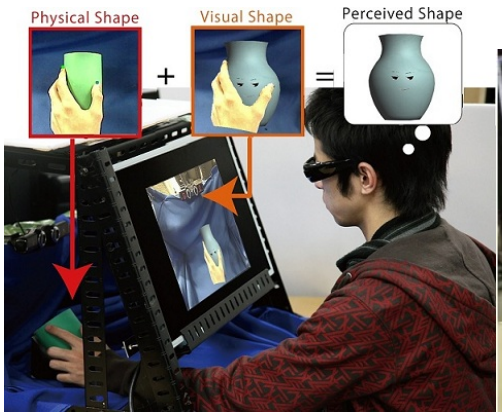


図 2.9 Magic Pot

図 2.10 触覚スローモーション

2.3 映像コンテンツと触覚

NHK 技術研究所は，視覚障害者や視覚情報が使えない状況に想定し，「触れるテレビ」と題して，ディスプレイに表示された 3 次元物体に触ることのできるデモ展示を行っている[22]．力覚提示デバイスには Phantom を用いており，物体に応じた触力覚を返すことにより，物体の形状や硬さの違いを提示することができる．また，同じく「触れるテレビ」をコンセプトに中村らは，先述した GyroCubeSeusuos を触覚デバイスとして用い 3 次元映像に触覚や手応えを与え、複数の指で立体映像を直接操作可能にしたバーチャルリアリティ空間生

成システム i3Space を提案している[24].

Danieau らは，座った状態ユーザ，3 軸力覚デバイスを用いて，首の後ろと両手の 3 か所に，映像に合わせて力覚を提示することによって，乗馬やジェットコースターに乗っているような感覚を体験させるシステム HapSeat を開発している[25]．首の後ろと両手の 3 か所からの力覚フィードバックにより,6 自由度の方向に体が引っ張られているような感覚を提示することが可能である．またこのシステムにより安価なデバイスで振動，力覚フィードバック，動きといった触覚効果を生成することを実現している．

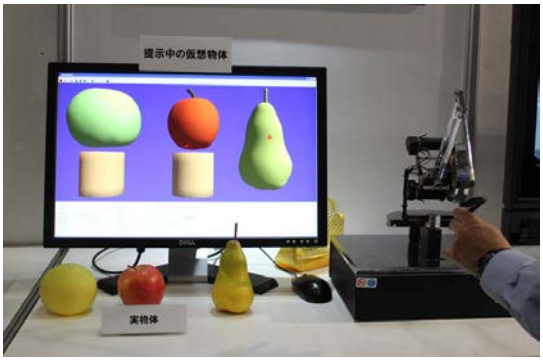


図 2.11 NHK 技術研究所「触れるテレビ」[23]

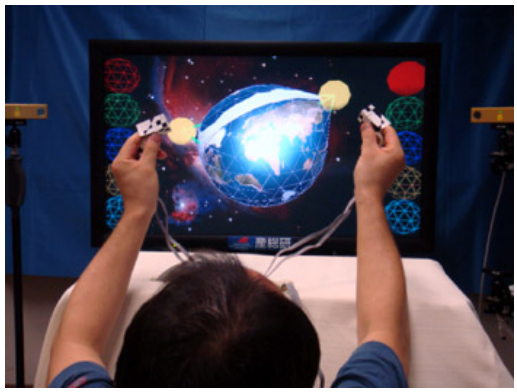


図 2.12 i3Space [24]

図 2.13 HapSeat[25]

2.4 身体動作と触覚

栗原らは 6 軸ロボットアームが稼働する際の振動を取得し，ユーザの肘に曲げ動作に応じて提示することで，ユーザに自身がロボット化した腕を持ったような感覚を提示するシステムを開発している[26]．また，ユーザの肘の動きを追従するロボットアニメーションおよび駆動音を組み合わせることで，ユーザの腕を視・聴・触覚的にロボット化することにより，より強いロボットになった感が提示できることを検証している，さらに同じ手法を用いロボット化以外にも，腕をゴムや木，アルミニウムに感じさせることも実現している[27].

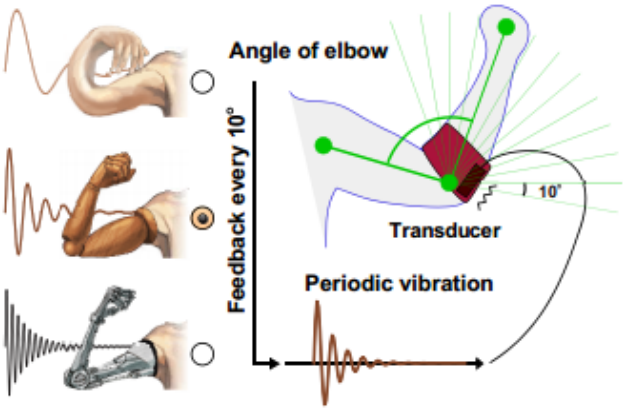


図 2.14 栗原らによる感覚の変容[27]

Fong らは振動用いてテニスラケットでボールを打つ際に生じる感覚を，振動を使って再現するラケット型触覚ディスプレイを開発し，SIGGRAPH2012 においてバーチャルなテニスを体験することのできるシステムとして展示を行っている[28]．このディスプレイの振動部位は A 字型をしており，斜線と横線が交差する位置に振動提示デバイスとしてプッシュプル型のソレノイドが組み込まれている．また A 字の横線に当たる部位にはラケットのヘッドフレームに見立てた楕円形の縁が取り付けられている．この縁がカウンターウエイトとして作用することにより，大きな慣性モーメント作りだし，持ち手部分にボールの衝突によるトルクを最大 0.4 Nm，ラケットの回転によるトルクを最大 0.2 Nm をそれぞれ発生させることが可能である．これらの機構により従来の偏心モータを用いた振動触覚ディスプレイでは実現することのできなかった衝撃力の提

示，振動の周波数や波形バリエーション，振動提示の即時性を可能としている．実際のボールがラケットに衝突することによるトルクと比べると，小さな触覚提示ではあるが，ラケットを振るという身体動作と身体動作にともなった触覚提示をすることにより，リアルな打撃感を生成している．

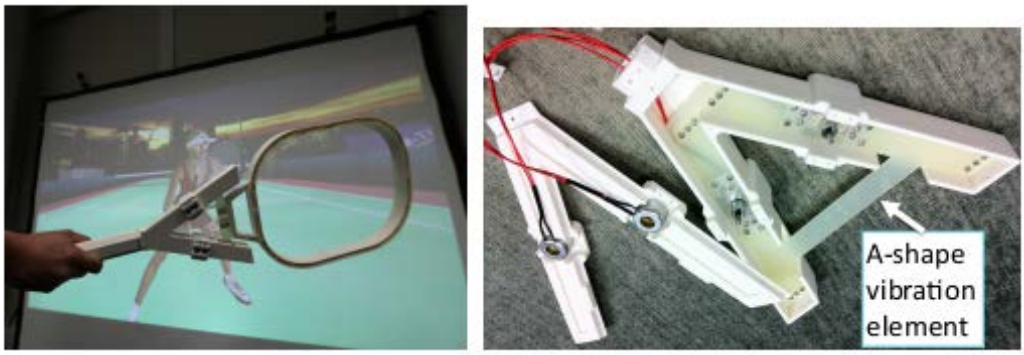


図 2.15：ラケット型触覚ディスプレイ（左）　A 字型の振動提示部位（右）

2.5 スポーツと触覚

宮下ら[29]はレーザードップラー振動計とサッカードミラーを利用した 1ms オートパン・チルトシステムを用い，高速に動く対象を追跡しながら，非接触かつ高精度の振動計測をリアルタイムに行うことが可能なシステム，VibroTracker を開発している．従来の接触式の計測ステムは，計測対象の振動を歪ませてしまうだけでなく，プレーヤーの動きを阻害してしまうといった問題がある．また，超指向性マイクのような非接触式の計測システムでは，周囲の雑音も取得してしまうため，激しく動く計測対象のわずかな振動は埋もれてしまう．どちらの計測システムもプレーヤーの感じる振動触覚を適切に計測することは困難である．VibroTracker はこういった問題を解決し，非接触かつ精度の高い振動計測をリアルタイムに行うことが可能である．これにより，プレーヤーが感じる振動触覚を複数のユーザで共有することが可能となる．

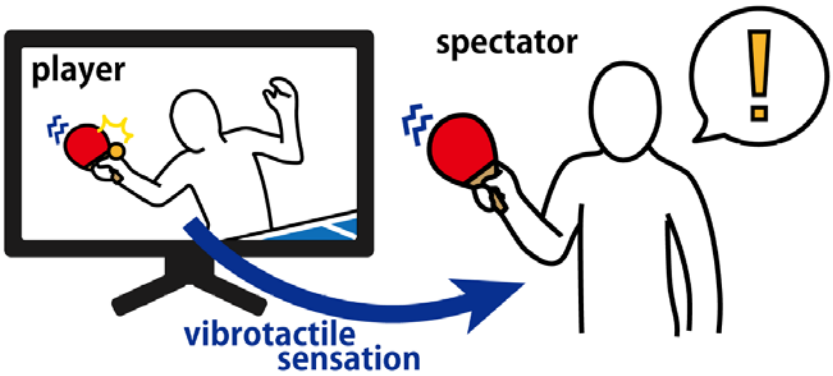


図 2.16 ：Vibrotracker

商用では、テニスのショットを分析してスマートフォンなどに表示できるテニスラケット用センサ Smart Tennis Sensor を SONY が発売している．センサには振動センサや加速度センサを搭載しており，ショット毎のセンサデータをスマートフォンに送信し，スウィング種別，ボール速度，ラケットのスウィング速度，ボール回転，インパクト位置などプレーをリアルタイムに表示できる．また，ショットデータを取得するだけでなく，アプリで動画を撮影しつつ、分析データを記録するといった利用も可能である．ここでは触覚情報として振動を取得はしていないが，取得した振動を触覚として扱うことも十分可能であると考えられる．

図 2. ：Smart Tennis Sensor [30]

2.6 映像と動きのシンクロ

渡辺らは，実世界の状態と同期して，映像を提示するビデオ操作技術シンクロナイズドビデオシステムを提案している[31]. このシステムは機器などを用いてビデオを操作させるのではなく，ユーザの動作に応じて操作できるため，ビデオを操作しているという感覚を強く意識させず，意図した映像を直感的に取得することが可能である．これによりユーザに新しい動作を教示するようなビデオの視聴において，何度も巻き戻して動きの確認をすることなく，自分の動きとビデオが同期して再生されるため，教示されている動きを取得しやすくなる．

米村らは，二者の一人称視野画像を合成する視野共有システムを用いて，心配蘇生法の訓練を実施した際の学習効果について検証している[32]. このシステムを用いると，ユーザの視野画像に，記録した講師の視野画像を重ねて提示することができるため，講師と同じ視点で動作を真似しながら訓練を行うことができる．従来の三人称視点の情報に基づく訓練では伝わりにくかった，複雑な作業の間違いに気がつきやすくなるといった報告がされている．

図 2.17 シンクロナイズドビデオ

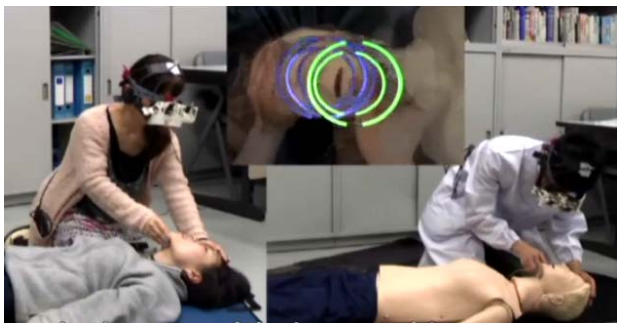


図 2.18 視野共有システムによる心肺蘇生訓練

第 3 章

スポーツ選手の体験を伝えるテレビの提案

3.1. 体験を伝えるテレビのコンセプト

第 2 章では，スポーツ選手が試合中に得ている体験を伝えるためには，選手のしている，または感じている「映像」「触覚」「動き」を合わせて伝えることにより，ユーザに体験を伝えられることを述べた．

では，体験をテレビ放送として伝えるには「映像」「触覚」「動き」をどのように伝えればよいだろうか．現在のテレビ放送は考えると，撮影，録音された映像，音声は，それぞれ信号化され電波に乗せて伝送され，各家庭にあるテレビで受信され視聴者に届けられる．このテレビ放送の流れ大別すると『取得』,『伝送』,『提示』の 3 つに分けられる．

そこで体験を伝えるテレビのコンセプトも『取得』,『伝送』,『提示』の 3 つの要素に分けて考え，それぞれの要素ごとに提案手法を述べることとする．

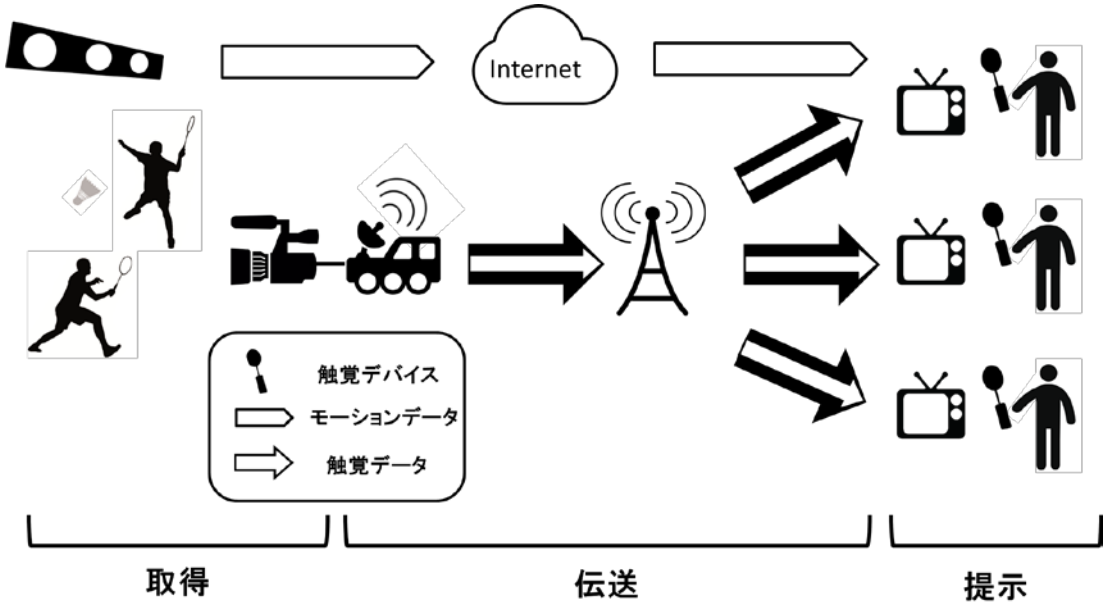


図 3.1 体験を伝えるテレビのコンセプト

3.1.1『取得』手法

映像の取得については既存の取得技術が適応できるため，ここでは触覚と動きの取得手法について述べる．

選手の感じている触感や，選手や道具の動きを取得する際には，選手のプレーを妨げない手法で行うことが重要である．そのためには，非接触での取得，もしくは選手の体や道具に組み込まれても気にならないほどに，小型で軽量であることが望ましい．またテレビ放送として取得後に伝送，提示すること考慮すると，膨大なデータ量や，複雑な計算を要する取得技術は不適切である．これらが触覚と動き取得手法の要件になる

要件を踏まえると，2 章で述べた TECHTILE toolkit の触感の記録と再生の手法を参考に，小型の振動センサを用いて触感の取得を行うことが適切である．小型の振動センサを道具に組み込むことにより，ラケットやバットでボールを打つ時の触感を，振動として取得することができる．また，取得したセンサデータは音響信号として扱えるため, Bluetooth 等の音響信号の無線伝送技術を用いて，リアルタイムにデータを取得することが可能である．さらに触感のデータとして保存しておくことも可能である．

動きの取得には，軽量の反射マーカをタラッカーとして複数のカメラで撮影することによって計測する光学式モーションキャプチャシステム，あるいは映像を解析しから 3 次元情報を取得するビデオ式のモーションキャプチャシステムが要件を踏まえると適している. それぞれメリット, デメリットがあるため，競技，試合環境によって使い分ける必要がある．

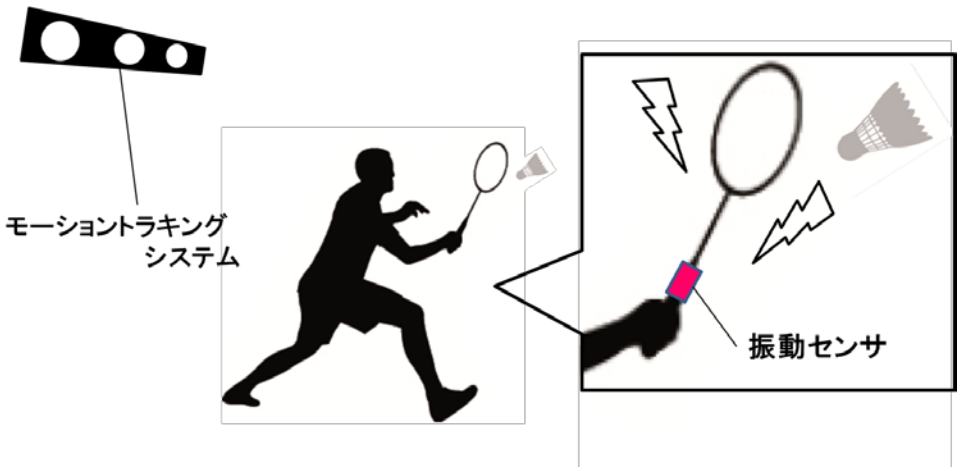


図 3.2 体験を伝えるテレビのコンセプト

3.1.2『伝送』手法

先述したとおり，触感の情報は音響信号として扱えるため，映像，触覚の伝送には既存のテレビ放送の伝送技術が適用できる. 例えば 5.1 チャンネル多重音声放送の 1 チャンネルを触感チャンネルとして使用し，取得した触感情報をテレビ放送の一部として伝送することが可能である.

モーションキャプチャシステムから取得した選手の動きの伝送には，ハイブリッドキャストのような，放送とインターネットを融合させたサービスが利用できる．さらに，放送により伝送される映像，触感と，インターネットにより伝送される動きを，ハイブリッドキャストの同期合成技術により，同コンテンツ内で使用することが可能である.

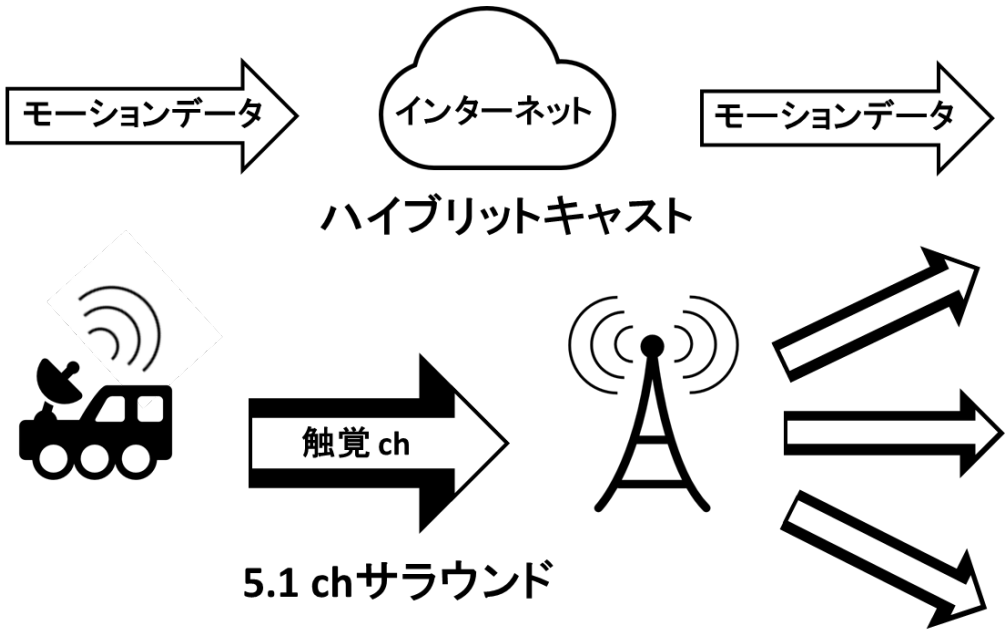


図 3.3 「触覚」「動き」の伝送手法

3.1.3『提示』手法

触覚の提示には振動アクチュエータを用いる．振動アクチュエータを触覚デバイスに埋め込み，伝送されてきた触覚チャンネルの触覚データを再生することで，スポーツ選手の感じている触覚を視聴者に提示することができる．動きに合わせて映像と触覚の提示をすることにより，より選手の体験を共有が可能である．

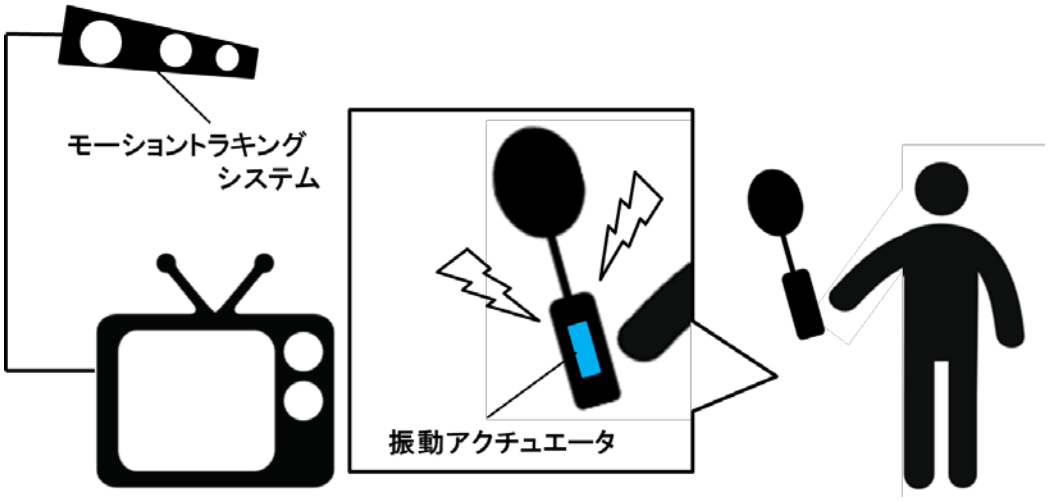


図 3.4 「映像」「触覚」「動き」の提示手法

3.2 触覚ディスプレイの形状

触覚提示において重要な要素である触覚ディスプレイの形状について考えてみる．テレビでの体験の基本的に家庭の中であるとすると，一般家庭にもっとも普及しているであろう触覚デバイス Wii Remote は, 様々なゲームコンテンツに対応するよう汎用性の高い形状をしている．しかし，スポーツ体験を共有する場合において，汎用性の高い形状のデバイスが高い共有体験を生み出すとは限らない．そこで，振動触覚ディスプレイにおける形状がどのように影響するのかを検証した実験を紹介する．

3.2.1 振動触覚による運動感における触覚提示物体の形状依存性の評価

序論

近年，触覚デバイスに関する研究の発達によりシンプルな手法でもリアルな感覚を提示できる．振動情報の記録と再生に基づく触感の伝送デバイスであるTECHTILE toolkit[1]は，マイクを用いて対象物から振動を取得し，皮膚の機械受容器に関与する低周波帯域から，主に聴覚に関与する高周波帯域までを増幅することにより，対象物の触感の違いやモノが運動する感覚を単一の振動源のみで伝達できる．TECHTILE toolkit を用いた触体験の一つに，コップに入った球体を回転させた際の振動を記録し，空のコップの底に振動子を取り付けて出力した際に，単一の振動源にも関わらず空のコップの中で球体が回転しているかのような運動感覚が生じるといった現象がある．この現象には触覚をはじめ聴覚，視覚などの複数の感覚の関与が考えられ，それらの関連性や物理的，心理的作用を定量的に特定することで，最低限の触覚提示でよりリアリティの高い触体験を作り出せると期待できる．

TECHTILE toolkit による回転感の知覚にも聴覚や，視覚，体性感覚の影響があることは確認しているが，それに加えて今回対象にする現象においては把持物体の影響も考えられる．そこで本論文では，把持物体の形状に着目し形状の変化が触知覚に及ぼす影響を検証する．

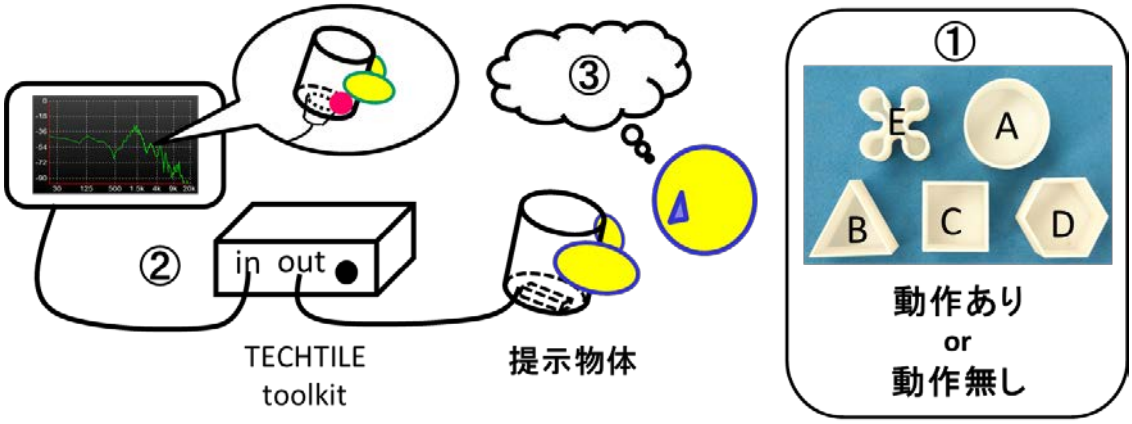


図 3.5 実験方法

図 3.6 把持物体

実験

・実験設定

本実験の目的は，振動刺激による回転感の知覚における，把持物体の形状および把持物体を回転させる動作の影響に着目し，物体形状の変化や回転動作の有無による回転感の知覚の変化を心理物理実験により検証することである．

本実験では3Dプリンタを用いて図2に示すような複数の形状の異なる容器を用意した．各容器の底面は直径 61．0 mm の円に内接する大きさで容器の底には振動子を貼り付けてある．振動情報の記録と提示には TECHTILE toolkit を用い，あらかじめビー玉（直径 16．8 mm）を内径 61．0 mm の円筒形の容器で回転させた際の振動情報を取得しコンピュータに記録し，これを各容器に提示した．被験者は 20 代の男女 5 名であった．各試行において，容器の種類と回転動作の有無を指示し，被験者には指示に合わせて利き手に容器を把持してもらい 10 秒間振動を提示した．その際感じた球体の回転感を，事前に円筒状のコップに実際に球体を入れて回転させた時の回転感を基準に［実際に球体を回転させたときと同程度の回転感がある］を 5,［全く回転感が無い］を 1 とし，5 段階で回答させた．この行程を 1 試行とし把持物体の形状 5 通り，回転動作の有無 2 通り, 各条件 5 試行として計 50 試行を 1 人当たりの試行回数として実験を行った．

・実験結果

それぞれの条件における 5 段階評価の平均値を実験結果として図 3 に示す．横軸には振動を提示した容器の形状，縦軸には回転感の評価点を示す．グラフの指標は{青:回転動作無し，赤:回転動作有り，緑:回転感動作有り無し両方}にそれぞれ対応している．結果からすべての要素で回転動作を行った場合のほうが，手を止めていた場合よりも，回転感を感じられることが確認できた．また底面

形状が A:円形，B:三角形，C:四角形，D:六角形の場合における結果から形状が円に近付くにつれて回転感が増加する傾向が見られた．また物理的にビー玉が回転し得ない形状である E での結果は最も低い値であった．

考察

結果から回転動作が回転感の知覚に影響があることが確認できた．また内観報告からも回転動作があると回転感が増すという意見が得られた．これは受動的な触覚刺激であっても，被験者の能動的な動作と一致した状況においてはリアリティの高い触感を提供できることを示す．また 3,4,6 角形の結果から形状が円に近付くにつれ回転感が増す傾向がみられ，また円からかけ離れた形状の E の結果が最も低い値であった．これは提示刺激が同じであっても提示物体の形状の認識が円に近付くことで球体の回転動作による運動知覚が上昇することを示している．

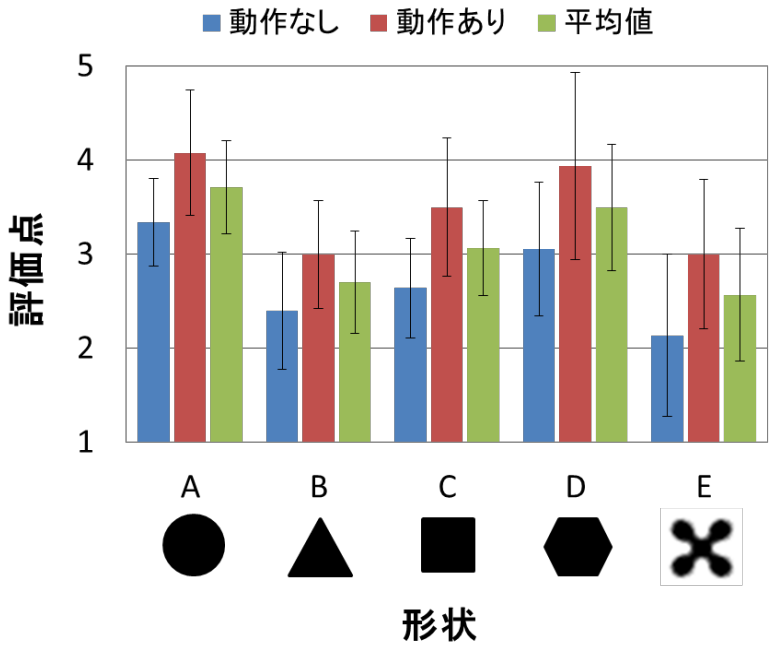


図 3.7 実験結果

この結果から，経験からなる知覚の恒常性が，回転感の感じ方に影響を与えていることが考察できる．人が実際に知覚する情報と，経験からなる知覚の恒常性において矛盾が生じる場合，無意識的に，経験上妥当な現象として処理が行われる．今回の実験においてほとんどの人が円筒のコップで球体を回転させた

経験があるのに対し，三角形，四角形，六角形の容器で球体を回転させた経験はないだろう．ましては E のような形状では，球体が回転することを想像することも難しい．今回の実験では容器の形状が円に近付くほど，知覚の恒常性における矛盾が少なかったため，回転感が知覚され易かったと考えられる．

まとめ

触覚提示物体の形状が円に近付くにつれ回転感が向上する傾向が見られ，どのような形状の物体を把持しているか，という状況認識が触感に影響をおよぼすことが確認された．このことから触覚デバイスの形状の設計において，対象となる触覚を生み出すそのものの形状に近ければ近いほど，詳細な触覚情報が伝えられることが分かった．

3.3 バトミントンの体験を伝えるシステム

前項での示したデバイスの設計をもとに，バドミントンの体験を伝えるシステムのプロトタイプを実装した．

3.3.1 ラケット型触覚デバイスのプロトタイプ

提案した触覚の取得，提示手法をもとに，触覚取得用ラケットと提示用ラケットを作成した．ラケットのフレーム部分は実際のラケットを分解し使用している．グリップの部分はデバイスを埋め込むため木材を加工し，成形した．取得用ラケットには振動センサとして Primo 社製の MX-E4758 を使用した．MX-E4758 は数 Hz の低周波領域に周波数特性を持ち，触覚に関与するといわれている周波数領域の振動を取得可能な小型の振動センサである．また提示用ラケットには振動のアクチュエータとして TachtileLabs 社製の HaputuatorMark 2 を使用した．HaputuatorMark 2 は振動触覚提示を目的に作られたデバイスで，小型ながら強力な振動を提示することができる．両デバイスのグリップの底の部分には，モノラルのミニジャックがついており，モノラルのオスケーブルつなげることで，中に埋め込まれたデバイスに接続することができる．

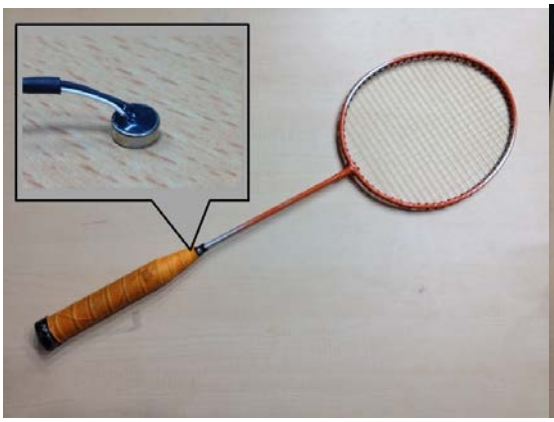


図 3.8　触覚取得用ラケット

図 3.9 触覚提示用ラケット

図 3.10　ラケット型デバイスのグリップの底

3.3.2　リアルタイム触覚体験システムのプロトタイプ

作成したラケット型デバイスを用いて，リアルタイムにプレーしている選手の感じている触覚を体験できるシステムを構築した．ファーストプロトタイピングとして，提案手法の伝送部分を有線でつなぎ，振動センサで取得した触覚信号をパワーアンプで増幅し，提示用ラケットに出すことでその場で試すことのできる簡易なシステムを実装した．

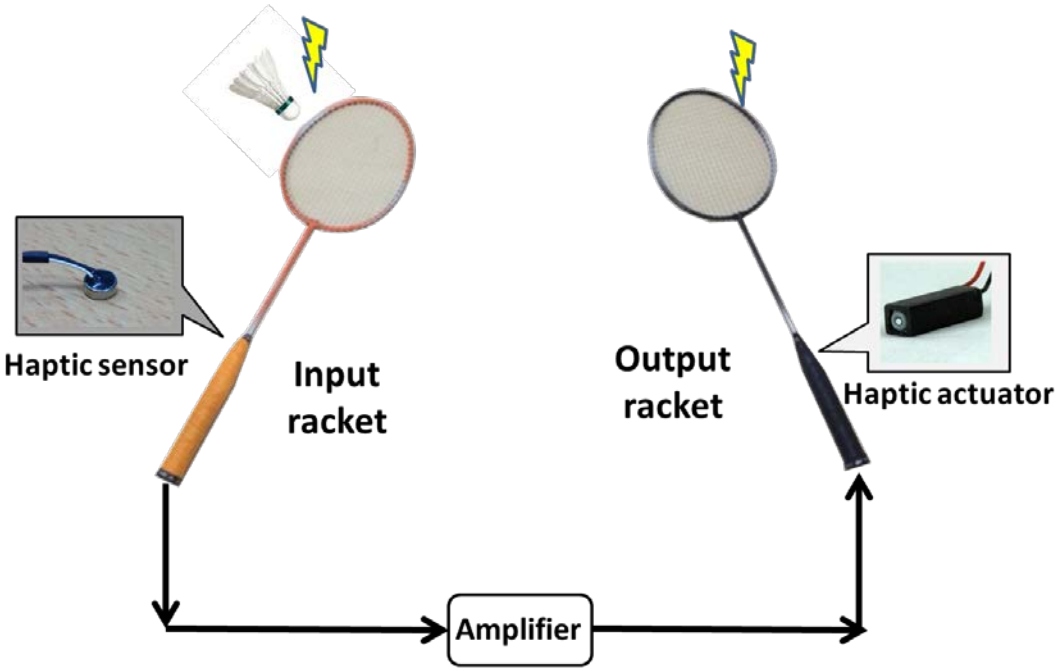


図 3.11　リアルタイム伝送システム

3.3.3　記録した触覚体験システムのプロトタイプ

次に，選手のプレーの映像と触覚をあらかじめ記録しておき，そのデータを再生させることで，触覚と選手のプレーしている映像を体験できるシステムを構築した．触覚の記録の際には，選手のプレーの妨げにならないように無線のオーディオトランスミッター（SHURE SVX14/PGA3）を用いた．取得した触感データを音声ファイルとして保存し，同時に撮影した映像に埋め込み，動画ファイルを作成する．動画ファイルを再生するだけでバドミントン選手の体験を追体験することができる．

図 3.12　記録風景

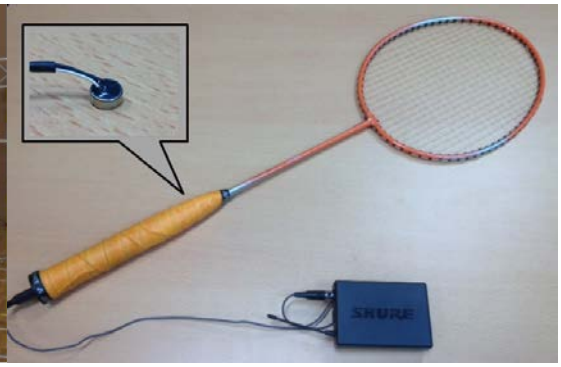


図 3.13 無線触覚取得用ラケット

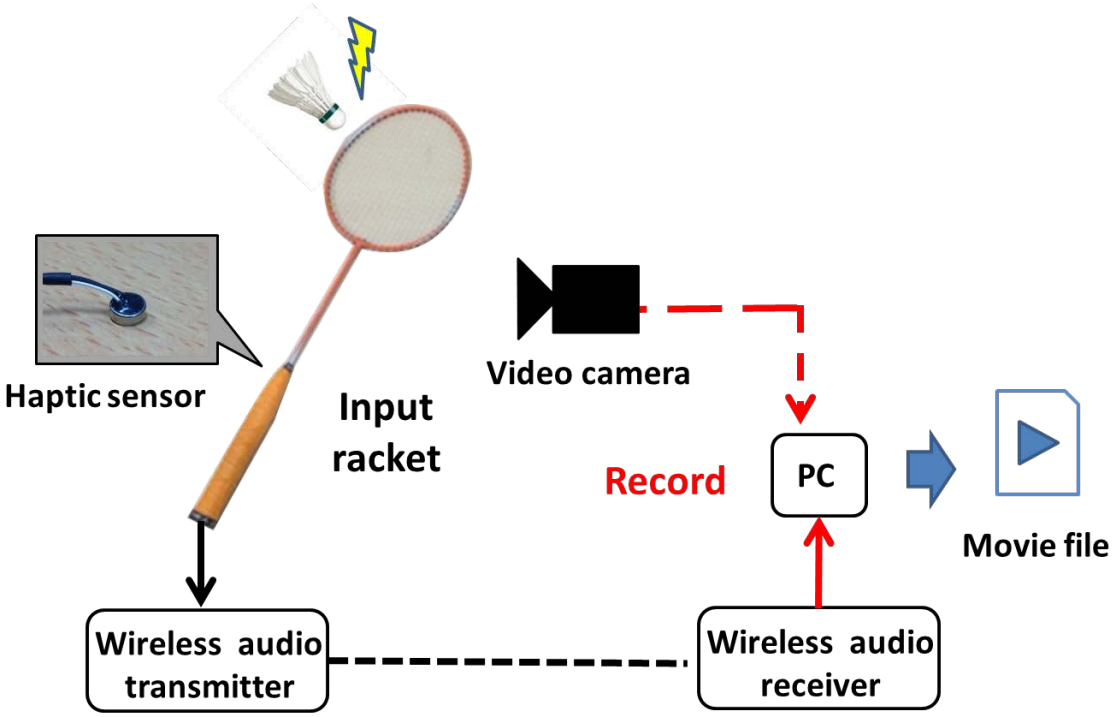


図 3.14　映像，触覚記録システム

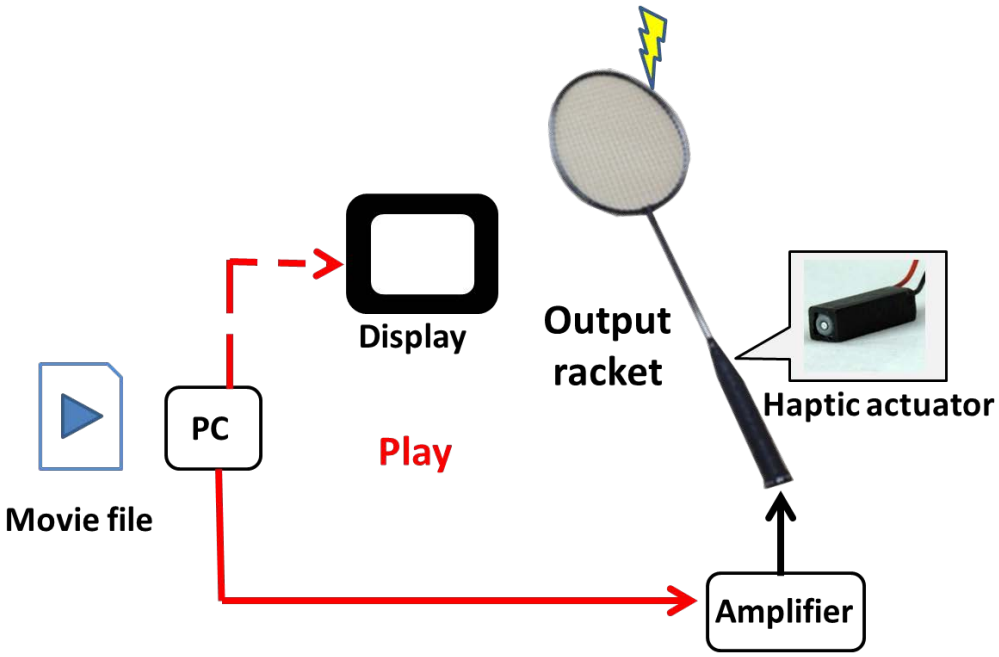


図 3.15　映像，触覚再生システム

3.4 触覚ディスプレイの展示

前項の 2 つのシステムを 2014 年 2 月に開催された KMD Transnational Airport - the 4th KMD forum において HapticBroadcast と題してデモ展示を行った．200 名程度の方々に体験していただき，フィードバックを得た．その中でも興味深かったのは，体験者が映像に合わせてラケットを振り，触覚感じる方がよりそれっぽく感じる，リアルに感じるといった意見である．ユーザは映像と触覚の提示と体の動きに，関係性がないシステムにおいても，自ら動きを合わせに行くことにより，より良い共有体験をしようとすることが分かった．

図 3.16　KMDforum での展示の様子

第 4 章

「映像」「触感」「動き」伝えることによるスポーツ体験システム

3 章の体験者からのフィードバックをもとにユーザの動きに合わせて，映像，触覚が提示されるシステムを構築する．

4.1 インタラクティブハプティックスローモーション

3 章の体験者からのフィードバックから, ユーザの動きに合わせて映像が提示され，それに伴い映像にあった触覚が提示されると体験のリアリティが増すことが分かった．そこでユーザ動きの速度に合わせて映像が再生され，かつ触覚を再生する速度も変化するシステムを考案した．ユーザが速くラケットを振ると実際に打った感覚と近い触覚を感じることができ，逆にゆっくり振ると今まで感じることできなかった，微細な触覚を，映像提示とインタラクティブに感じることができる．橋本らの研究により触覚のスローモーションよる触覚弁別が報告されていることからも，インタラクティブに触覚を感じられるシステムにより，選手の細かい，微細な動きを共有できる可能性がある．

以上からインタラクティブハプティックスローモーションのシステムの構築を行う．

4.2. 設計

4.2.1　動きと映像の連動

動画の撮影にはハイスピードカメラを用いた．詳細は後述する．動きのデータ，モーションデータの取得には Natural Point 社製の Optirack Trio 用いた．動きと映像を連動させるには，動きに対して映像を再生させる必要がある．そのためラケットのモーションデータを取得し，位置と映像のフレーム番号を 1 対 1 対応させた．よってモーションデータから対応したフレーム番号が算出できれば動きに連動した映像の提示が可能になる．以下に算出方法を記述する．

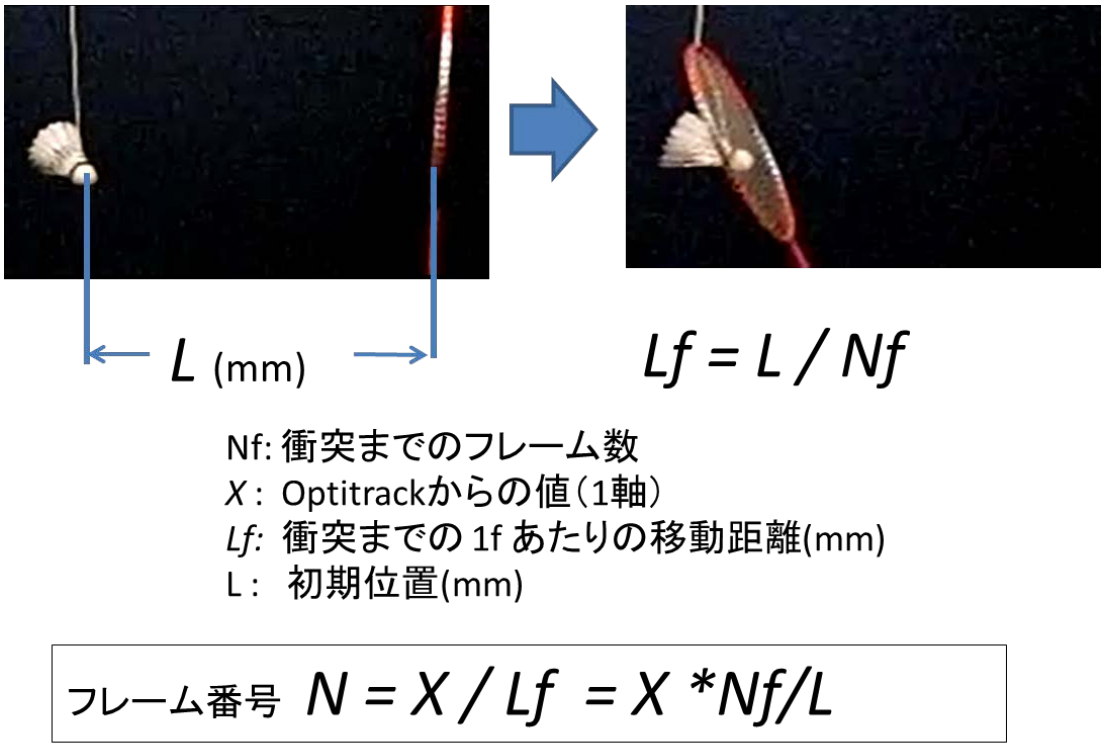
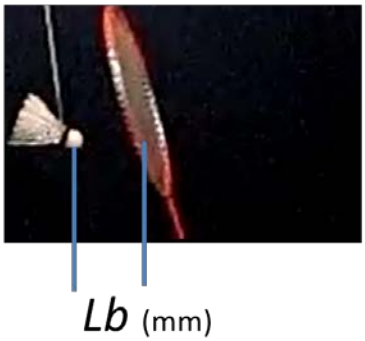


図 4.1　フレーム番号の算出方法

4.2.2　動きと触覚の連動

触覚はラケットに衝突した瞬間から提示される必要がある．触覚をインタラクティブに変化させるため，衝突の瞬間のラケットの速度を求め，その速度と触覚を記録した時の映像の中のラケットの速度との比で，触覚の再生速度を定める．以下に算出方法を記述する．またこの算出方法は衝突後も適用され再生速度が変化する．



Lb:　衝突120前のフレーム前の距離（100ms前）
V:　100ms前からの動画のラケット平均速度
Vr:　100ms前からの実物のラケット平均速度
ΔX：　100ms前からの実物のラケットの移動量
Vp:　音の再生速度

$$Vr = \Delta X / 100$$

$$V = Lb / 100 \text{ (mm/ms)}$$

$$\begin{cases} Vp = Vr / V \\ Vp = 1 \ (Vr > V) \end{cases}$$

図 4.2　触感の再生速度の算出方法

4.3. プロトタイピング

システムの構築ためのソフトウェアには，音響と映像を容易に扱うことのできる MAX/MSP を用いた．前述した 2 つに算出方法を用い，モーションデータから映像のフレーム番号, 触覚の再生速度を求め, ユーザの動きに合わせて映, 触覚を提示するインタラクティブハプティックスローモーションシステムのプロトタイプを構築した.

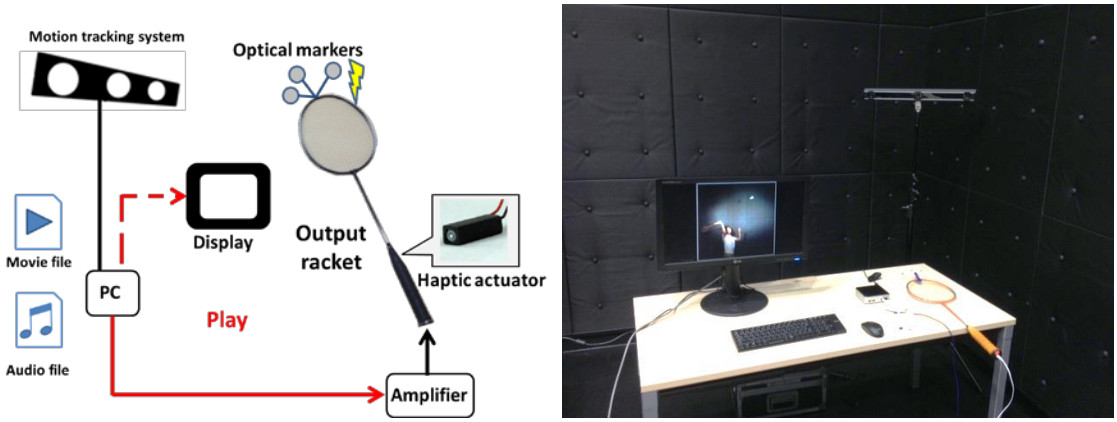


図 4.3　システム概要図

プロトタイプではテレビ放送でのスポーツ観戦をイメージし, LIVE モードと INTERACIVE モードの 2 つのモードを実装した. LIVE モードでは選手の試合しているときの映像を視聴しながら，選手がシャトルを打った時の感覚を感じることができる．INTERACIVE モードでは，リプレイシーンを想定しており，ユーザが自らの動きに合わせリプレイスピードを変えることができる.

図 4.4　LIVE モード

図 4.5　INTERACTIVE モード

4.4. スローモーション映像

映像は動きに合わせてスローモーション再生がされるためフレーム数の多い動画が必要である．そのため撮影は VisionReaserch 社製のハイスピードカメラを用いて行った．動画は 8000fps で撮影し，バトミントンのラケット振りの高速な動きをブレなく撮影することができた．システムにはこのカメラで撮影した映像を用いた．

図 4.6　記録風景

図 4.7　POHANTOM V711

4.5. スポーツ体験システムの展示

前項のシステムを 2014 年 6 月にフランス，ベルサイユで開催された EuroHaptics2014 において HapticBroadcast- System of Transmitting the Experience in Badminton -と題してデモ展示を行った．デモには触覚取得・提示ラケットを用いたリアルタイムに触覚伝送を行うデモ, プロトタイプの LIVE, INTERACTIVE モードの 3 種類を展示した．30 名程度の各国の触覚研究者の方々に体験していただき，フィードバックを得た．今回の INTERACTIVE モードの展示ではスマッシュシーンのみのデモを行ったが，サーブシーンや，レシーブシーンなどの，様々のシャトルを打つシーンを体験したいといった意見が得られた．

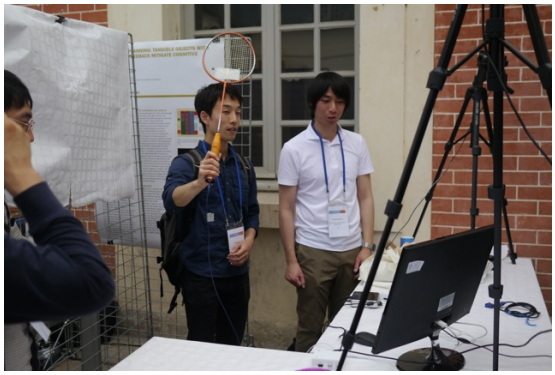


図 4.6　EuroHaptics2014 での展示

第 5 章

結　論

本論文は，身体運動と協調した触覚提示によるスポーツ体験の共有について論じたものである．

第 1 章では，現在のスポーツ観戦の中心であるテレビ放送について掘り下げた．現在，次世代のテレビ放送のトレンドである「高精細化」,「スマートテレビ」についてそれぞれの特徴を述べた．これら特徴は基本的には従来のスポーツの視聴と変わらず,「受動的な視聴」に留まったままであることから，本研究の目的として,「映像」,「動き」,「触覚」を合わせて,「体験」としてのスポーツ観戦が可能なシステムの開発を行うこととした．

第 2 章では「映像」,「動き」,「触覚」の観点から，関連研究を述べた．特に本論文でスポーツ選手の体験を伝えるために重要であり，また従来の観戦方法にはなかった要素である触覚について深く掘り下げた．触覚ディスプレイや，触覚に映像, 動きの要素を取り入れた研究や応用例を取り上げ, 体験の伝え方，作り方についてまとめた．

第 3 章では，第 1 章，第 2 章で述べた内容を踏まえ，現在のテレビ放送のインフラを活用して実現可能な，スポーツ選手の感じている体験をテレビの前のユーザが体験することのできるシステムを，取得，伝送，提示方法の提案した．また，触覚を提示するためのデバイスの形状に着目し，心理物理学実験によりその影響を検証した．その結果，把持している物体の形状とそこに提示される触覚の関連性を明らかにした．さらに，提案手法と実験結果からシステムのプロトタイプを作成し展示を行った．

第 4 章では，第 3 章でのシステムをベースに,「映像」,「動き」,「触覚」を伝えることによる，インタラクティブにスポーツ選手の体験をユーザが共栄することンできるシステム，インタラクティブハプティックスローモーションシステムのプロトタイピングを行い，展示を行った．

以上のように、現在のテレビ放送のインフラを活用して実現可能な,「映像」,「動き」,「触覚」を合わせ「体験」としてのスポーツ観戦が可能なシステムを提案した．提案手法を用い，プロトタイプを作成し，展示を行った．展示のフィードバックから，本提案手法の有用性を確認した．

謝　辞

本研究の副査であり，指導教員の舘暲教授には，定期的な輪講などで貴重なアドバイスをしていただきました．そもそも VR の世界に興味を持ったのも，学部生時に舘先生監修のバーチャルリアリティ学の本を読んだことがきっかけでした．VR の第一人者のである舘先生のもとで研究できたことは，大変貴重な経験となりました．本当にありがとうございました．

指導教員の稲見昌彦教授には，僕の頭には全くない発想や，多面的なものの見方には驚かされ，自分の研究を深く考えなおすきっかけになりました．本当にありがとうございました．

本研究の主査である南澤孝太准教授には，研究のいろはから事務作業に至るまで様々なことをご指導いただきました．先生なしではこのような研究はできなかったと思います．本当にありがとうございました．

本研究の副査である太田直久教授には，また最終発表時にも貴重な助言をいただきました．直接指導していただく機会はあまりありませんでしたが，暖かく見守っていただきました．本当にありがとうございました．

Charith Fernando 氏，杉浦裕太氏，上間裕二氏をはじめ RealityMedia のメンバーには研究，学校生活，私生活で大変お世話になりました．皆さんのおかげで，KMD で充実した学校生活を送ることができました．本当にありがとうございました．

最後に今まで自分勝手な行動ばかりしていた僕を，温かく見守ってくれた父（幸意），母（福江），姉（千優），弟（幸佑），弟（大佑）には大変感謝しています．家族の支えなしではここまで研究をすることができなかったです．ありがとうございました．

参　考　文　献

[1] 平成 25 年度版 情報白書, 総務省

[2] 「スマートテレビの推進に向けた基本戦略」, 総務省, 2012

[3] https://www.apple.com/jp/appletv/what-is/　AppleTV

[4] http://www.google.com/intl/ja/chrome/devices/chromecast/　Chromecast

[5] 五感情報通信技術に関する調査研究会 報告書

[6] 岩村 吉晃：タッチ, 医学書院,2007

[7] 下条 誠：触覚センシング　第 3 版

[8] 図　R. Joseph: Neuroscience: Neuropsychology, Neuropsychiatry, Behavioral Neurology, Brain & Mind. University Press Science Publishers, 4th Edition edition, 2011

[9] 電子情報通信学会：知識ベース,電子情報通信学会, 2010

[10] http://www.dentsable.com/phantom-premium-1-5.htm

[11] 佐藤　誠, 平田幸広, 河原田弘：空間インタフェ-ス装置 SPIDAR の提案, 信学論 D-2,　Vol.74, No.7, pp.887{894 (1991)

[12] 金時学, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠：7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 , Vol.7, No.3, pp.403{412 (2002).

[13] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami and Susumu Tachi: Gravity Grabber: Wearable Haptic

Display to present Virtual Mass Sensation, 34th Int. Conf. On Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007), Emerging Technolo-gies, 200

[14] 中村則雄，福井幸夫:非接地型力・トルク提示インタフェイスの開発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，11(1)，87-90，2006

[15] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara and Susumu Tachi: TECHTILE toolkit - A prototyping tool for design and ed-ucation of haptic media, in Proc. Laval Virtual VRIC 2012, Laval, France, 2012

[16] A. Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision :A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. Presence, 18(1), pp.39-53, 2009.

[17] 渡邊恵太，安村通晃 VisualHaptics:カーソルによる手触り感提示システム，第 11 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2003) いこいの村能登半島，December 2003.

[18] http://www.persistent.org/VisualHapticsWeb.html

[19] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Magic Pot :Interactive Metamorphosis of the Perceived Shape, SIGGRAPH '12: ACM

[20] 橋本，梶本： スローモーション触覚再生装置，インタラクション 2009，東京　学術総合センター/一橋記念講堂，2009

[21] 橋本 ,梶本： 触覚のスローモーション再生における知覚特性， 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会，東京　早稲田大学 2009

[22] NHK 技研公開 2010　http://www.nhk.or.jp/strl/open2010/tenji/39.html

[23] http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20101006/186233/?rt=nocnt

[24] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100825/pr20100825.html　産業技術研究所 Web ページ

[25] ANIEAU, F., F LEUREAU, J., G UILLOTEL, P., M OLLET, N., CHRISTIE, M., AND L ´ ECUYER, HapSeat: Producing Motion Sensation with Multiple Force-feedback Devices Em-bedded in a Seat. In ACM VRST, 69–76.

[26] Y. Kurihara, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker, H. Kajimoto: Jointonation: Robotization of the Human Body by Vibrotactile Feedback.ACM SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies, November 19-22, 2013, Hong Kong.

[27] Y. Kurihara, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Virtual Alteration of Body Material by Periodic Vibrotactile Feedback, IEEE Virtual Reality Conference, March 16-23, 2013, Orlando, FL, USA.

[28] FONG, W., C HIN, C., FARBIZ, F., AND HUANG, Z. 2012. Un-grounded haptic rendering device for torque simulation in virtual tennis. In SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies.

[29] Miyashita, L., Zou, Y., and Ishikawa, M.: VibroTracker: A Vibrotactile Sensor Tracking Objects, SIGGRAPH 2013, Emerging Technologies, Anaheim, California, USA, 21-25 Jul. (2013)

[30] http://www.smarttennissensor.sony.co.jp/

[31] Yoshihiro Watanabe, Hiroaki Ohno, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa: Synchronized Video: An Interface for Harmonizing Video with

Body Movements, 22nd Symposium on User Interface Software and Technology（UIST2009）(Victoria, 2009.10.5）/ Adjunct Proceedings, pp.75-76.

[32] 米村朋子, 橋本悠希, 近藤大祐, 丹羽真隆, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎 ： 視野共有システムを用いた心肺蘇生法の訓練効果, 日本バーチャルリアリティ学会　論文誌 Vol.16, No.4 pp.623-632, 2011.