

Title	STEP : 足裏感覚を操作することで歩行動作を変化させるハプティックシューズ
Sub Title	STEP : haptic shoes to change walking behavior by manipulating sole sensation
Author	岩田, 悠(Iwata, Yu) 稲蔭, 正彦(Inakage, Masahiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度メディアデザイン学 第515号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0515

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 2016年度（平成28年度）

STEP：足裏感覚を操作することで
歩行動作を変化させるハプティックシューズ

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

岩田 悠

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。

岩田 悠

審査委員：

稲蔭 正彦 教授 (主査)

南澤 孝太 准教授 (副査)

古川 享 教授 (副査)

修士論文 2016年度（平成28年度）

STEP：足裏感覚を操作することで 歩行動作を変化させるハプティックシューズ

カテゴリー：デザイン

論文要旨

本論文は、「いま・ここ」にない床の踏み心地を「いま・ここ」に再現するハプティックシューズ (STEP) のデザインとその評価を行った。STEP は、足の動きを検出するための圧力センサーと、触感を提示するオーディオベースの振動アクチュエーターで構成され、歩行動作に合わせて足裏感覚をデジタルに操作する。本研究の目標は、足裏感覚をデジタルに操作するフィードバックを通じて、実際の歩行動作を能動的に変化させることにある。そのために、本研究は、足と床の接触時に粘着感や水の上を歩く感覚を提示することで、1歩1歩を丁寧に踏みしめて歩きたくなる感覚を生み出した。足裏を通したこれらの効果は、感覚が麻痺してしまった足に強調した歩行感覚を与えることによる効率的なりハビリや、地面をしっかりと掴んだ正しく・疲れにくい歩き方の誘導などに利用することができる。

キーワード：

歩行動作, 足裏感覚, ハプティックシューズ

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

岩田 悠

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

STEP: Haptic Shoes to Change Walking Behavior by Manipulating Sole Sensation

Category: Design

Summary

This paper presents the design and evaluation of a pair of haptic shoes intended to reproduce the experience of walking on different ground properties. STEP, the haptic shoes, consists of actuators and pressure sensors, and stimulate the user's sole of the foot with rich vibrational waveforms in the synchronization of walking movement. The goal of this paper is to change walking behavior by manipulating the sole sensation. STEP reproduces the feeling of walking on sticky ground and puddle for the sake of highlighting every step. Such haptic feedback can be used to make the rehabilitation more efficient, and lead the walking form right not to be tired compare with no haptic feedback.

Keywords:

Walking Movement, Sole Sensation, Haptic Shoes

Keio University Graduate School of Media Design

Yu Iwata

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 歩行動作と健康	1
1.2. Fujitsu interactive shoes hub	4
1.3. 研究目的	5
1.4. 論文構成	5
第 2 章 関連研究	6
2.1. 歩行周期	6
2.2. 足裏感覚	9
2.3. 足裏への情報提示に関する研究	11
2.4. 足裏への触感提示に関する研究	12
2.4.1 床型デバイスによる触感提示	12
2.4.2 靴型デバイスによる触感提示	13
2.5. 本章のまとめ	15
第 3 章 提案と設計	16
3.1. ゴール設定	16
3.2. システムの提案と設計	18
3.2.1 Haptic Shoes	19
3.2.2 Haptic Engine	19
第 4 章 実装と実証	20
4.1. 1st プロトタイプ	20
4.1.1 触覚提示位置の調査	21

4.1.2	Haptic Shoes の実装	23
4.1.3	Haptic Engine の実装	28
4.1.4	足裏感覚のデザイン	32
4.1.5	1st プロトタイプの全体像	35
4.2.	実証実験 (1st プロトタイプ)	36
4.2.1	実験概要	36
4.2.2	実験結果	39
4.2.3	考察	40
4.3.	2nd プロトタイプ	41
4.3.1	Haptic Shoes の改善	41
4.3.2	Haptic Engine の改善	42
4.3.3	2nd プロトタイプの全体像	43
4.4.	実証実験 (2nd プロトタイプ)	44
4.4.1	実験概要	44
4.4.2	実験結果	45
4.4.3	考察	46
第 5 章	結論	47
	謝辞	48
	参考文献	49

目 次

1.1	スポーツシューズの進化	2
1.2	誘導マーカー	2
1.3	Fitbit 端末とスマートフォンアプリケーション	3
1.4	interactive shoes hub インソール [5]	4
1.5	interactive shoes hub 概念図 [5]	4
2.1	歩行周期の細分化 [6]	7
2.2	8つの相と時間的割合 [6]	8
2.3	歩行時の足裏接触 [8]	9
2.4	足裏感覚受容器の分布 [6]	10
2.5	体の部位ごとの二点弁別閾 [10]	10
2.6	振動モーターの配置と振動パターン [12]	11
2.7	CabBoots のインタラクション [13]	11
2.8	床型デバイスの全体構成 [15]	12
2.9	タイルモジュールの構成 [15]	13
2.10	サンダル型デバイス [16]	13
2.11	Snow Walking[17]	14
3.1	オノマトペの分布図と想起される素材 [19]	17
3.2	オノマトペの分布図と因子軸 [19]	17
3.3	システム構成図	18
4.1	1st プロトタイプのシステム構成図	20
4.2	バイプロトランスデューサー Vp210	21

4.3	TECHTILE toolkit[20]	21
4.4	触覚提示の調査箇所	22
4.5	触覚提示の調査方法	22
4.6	Furoshiki Shoes	23
4.7	12 芯ケーブルの取り付け	24
4.8	スチレンボードによるインソールプロトタイプ 1	25
4.9	3D プリントによるインソールプロトタイプ 2	25
4.10	3D プリントによるインソールプロトタイプ 3	26
4.11	シューズへのインソール組み込み	26
4.12	STEP 装着イメージ	27
4.13	Haptic Engine の外観	28
4.14	歩行動作検知プログラム	29
4.15	音声ファイルの格納	30
4.16	パターンコントロール画面	31
4.17	ガムを踏んだかのようなべたべた感 [21]	32
4.18	べたべたする触感	33
4.19	長靴の中に水が入ったかのようなぐにょぐにょ感 [21]	34
4.20	ぐにょぐにょする触感	34
4.21	1st プロトタイプの使用機材一式	35
4.22	デモ展示のセットアップイメージ	37
4.23	STEP を装着する様子	38
4.24	STEP を体験してもらっている様子	38
4.25	ソール中央部へのモジュール埋め込み	41
4.26	Haptic Engine をリュックへ収納	42
4.27	2nd プロトタイプ使用機材	43
4.28	実験イメージ	44
4.29	フィードバック別の前方移動距離	45

表 目 次

2.1	各相に特有の役割 [6]	8
4.1	触覚提示位置調査のための使用機材一式	21
4.2	1st プロトタイプの使用機材一式	35
4.3	2nd プロトタイプの使用機材一式	43

第1章 序

論

1.1. 歩行動作と健康

足を使って歩くことは、人間にとって最も基本的な動作の1つである。人や日によって差はあれど、私達はほぼ365日、歩く行為を繰り返している。この歩行動作は生後1歳前後で自然と獲得され、日々の生活シーンで移動手段の基盤として確立される。また、歩行動作は運動強度こそ高くないものの、十分な健康効果を期待することもできる。歩行動作による効能は古くから認められ、古代ギリシアの医師ヒポクラテスは「歩行に勝る良薬なし」とまで形容した。近代医学においては、筋肉増加・内臓器官強化・脳活性化・生活習慣病予防・リラックス効果など心身に多角的な効能があることが明らかになり [1], 1990年代頃からは、歩行動作は健康のための手軽な運動手段として注目を集めるようになった [2]。

歩行運動への注目が高まるのに合わせ、それを支援する道具が発展をみせている。例えば、歩行運動を楽しむ人の足元を支えるスポーツシューズだ。パフォーマンスを最大限に引き出すと同時に、障害から足を保護する役目を果たすために靴は進化を遂げてきた。図 1.1 は、1950年当時のシューズと最新のウォーキングシューズを示したものである。一目で大きな変化を見てとれる。スポーツシューズの進化の歴史をまとめた論文 [3] によると、アッパーは綿からポリエステルなどの通気性の良い素材が使用され、ソールは1枚のゴム材による設計から衝撃を緩和させるためのミッドソールが加えられているという。これらシューズの構造・構成する材料の絶え間ない改良により、我々は体の負担が少なく、効率的かつ安定した歩行を行えるようになった。

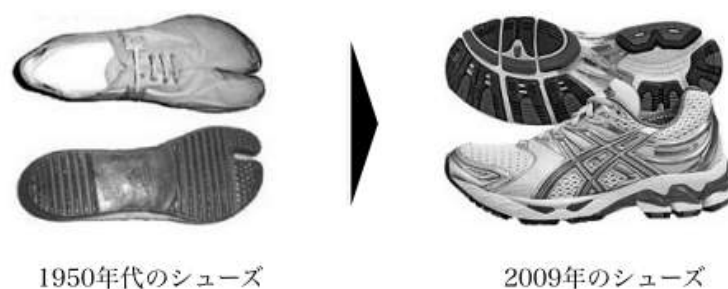


図 1.1: スポーツシューズの進化

歩行動作を行う際、足裏が地面と接地する唯一の部分である。足裏は、地面と接地するとき、常に変化する重心の動揺を読み取り、体のバランスを整えることを可能にしている、非常に重要な役割を果たしているといえる。したがって、その重要な足裏を包み込み、守ることができるように、スポーツシューズは発展してきた。

また、足裏は体の制御を行いながら、床面の情報を把握している。足裏感覚に訴えることで、歩行動作を支援するメディアで身近なものには誘導マーカ― (図 1.2) がある。主に視覚障害を持つ人に対して、歩行先の誘導を行う用途で使用されるが、目が見える人に対しても、電車のホームなど、騒音が激しく注意が散漫になりがちな場所で、危険なエリアとの境界線を示すために効果的である。日本だけでなく、世界中で広く普及している足裏インターフェースである。



図 1.2: 誘導マーカ―

近年では、歩行をサポートする道具は靴や誘導マーカーといったアナログなものばかりではない。電子端末の小型化技術が進んだことにより、Fitbit [4] などに代表されるウェアラブルデバイスが登場した。これらウェアラブルデバイスは、手首などに着用することによって、自らの運動を客観的に確認することを可能にする。スマートフォンアプリと接続することで、歩数はもちろんのこと、心拍数・移動軌跡・移動距離などを記録することができる。健康に敏感な若い世代の間で人気を集めており、ウェアラブルデバイスは1 ビジネス領域として注目を集めている。



図 1.3: Fitbit 端末とスマートフォンアプリケーション

1.2. Fujitsu interactive shoes hub

ウェアラブルデバイスの登場について述べたが、足そのものが生み出す動きに特化したデータを取得しようとする試みもある。そのうちの 하나가、*Fujitsu interactive shoes hub* [5]である。*Fujitsu interactive shoes hub*は、株式会社富士通が推し進める「靴の未来を共創すること」をテーマとしたプロジェクトだ。当プロジェクトは、人の生活基盤でもある自らの足で立つ、座る、移動する行為を、センサーで迅速に把握し、その状態を可視化・解析できるプラットフォームを構築しようとする取り組みをしている。具体的には、種々のセンサーを搭載したスマートインソール (図 1.4)を開発し、靴から発せられる大量のデータを機械学習により行動特徴として迅速かつ自動で分析し、ヘルスケア・スポーツ・街づくりなどに利用できるようにナレッジ化することを試みている。

企業単体だけではなく、パートナー企業や大学・NPO・個人との共創を通じて価値を作り上げようとオープンイノベーションという方法論を取っていることが *Fujitsu interactive shoes hub*において特徴的である (図 1.5)。開発の裾野が広がられていることで、データ収集と解析が加速していくことが期待できる。本研究科が *Fujitsu interactive shoes hub*の共創パートナーとなり協働しはじめたことが、本研究の歩行動作への着目の契機となった。

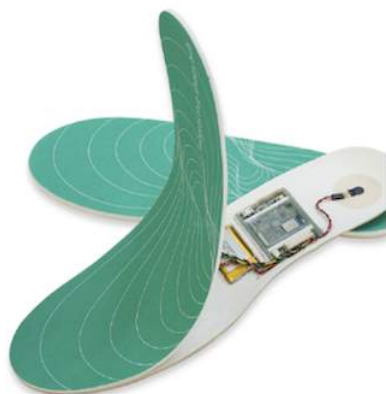


図 1.4: interactive shoes hub インソール [5]

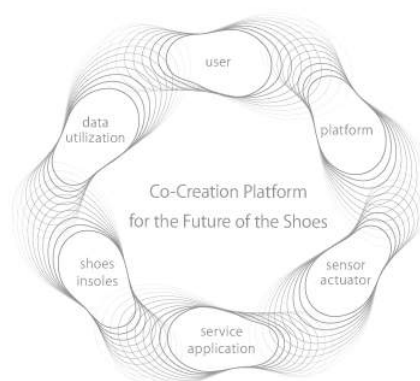


図 1.5: interactive shoes hub 概念図 [5]

1.3. 研究目的

歩行を取り巻く道具には、デジタル要素を持つものが登場しはじめている。一方で、足裏が従来触れているのは、道路や自然物など質量をもつアナログ的なものがほとんどである。そこで、本研究は、足裏感覚をデジタルに操作することで、足裏が従来触れているものと同様な接触感を演出することを試みる。

また、本研究の1つの挑戦は、足裏感覚をデジタルに操作することで、歩行動作を能動的に変化させることである。足裏が知覚する感覚によって、我々は足の動きを変えて、バランスを保っており、足裏感覚は歩行動作において重要な役割を担っている。従って、足裏へ特定の接触感を提示することで、それに伴い、歩行動作全体を変化させる可能性を見込めないかと仮説を立てた。

以上をまとめ、本研究は、足裏感覚をデジタルに操作することで、(1)「いま・ここ」にない床の質感を「いま・ここ」に演出し、(2)歩行動作を能動的に変化させるシステムの提案と実装を行い、その有効性を評価する。

1.4. 論文構成

本論文は、研究の背景とその目的について述べた本章を含めて全5章で構成される。続く第2章では、本研究の目的を達成するにあたり、参考となる歩行動作や足裏感覚に関する研究を中心にレビューする。第3章では、本研究のゴールと将来性について言及した上で、それらに基づいたシステムの提案と設計を行う。第4章では、第3章での設計に則り、実装を行う。また、提案システムが本研究の目的に対して有効であるかの実証実験の結果を示す。最後に、第5章において、本研究の結論を述べる。

第2章

関連研究

本章では、本研究に関連する、先行研究及び先行事例を以下の4つの観点から取り上げて示す。

- 歩行周期
- 足裏感覚
- 足裏への情報提示に関する研究
- 足裏への触感提示に関する研究

2.1. 歩行周期

ここでは、人の歩行周期について述べる。歩行は、個々人により運動基礎能力が異なるため、人によって大きな差異がある。また、身体の発育や加齢によって、この基礎能力は変動するため同一人物であっても歩行を画一的に捉えることはできない。

そこで歩行周期という概念を用いることで歩行の分析がなされている。『観察による歩行分析』[6]によれば、歩行周期は片足が着地してから次の着地に移行するまでの時間によって定義付けられている。歩行は様々なパラメータの影響を受けて成り立つが、この歩行周期は歩いていれば必ず起こる現象である。すなわち、幼児の歩き・速歩き・高齢者の歩き、いずれであっても同様に分析することができ、歩行動作を変えるために、おさえるべき基礎知識となる。

図 2.1 は、ランチョ・ロス・アミーゴ国立リハビリテーションセンターの医師によって考案され、世界的に認知されている歩行周期を示すものである。

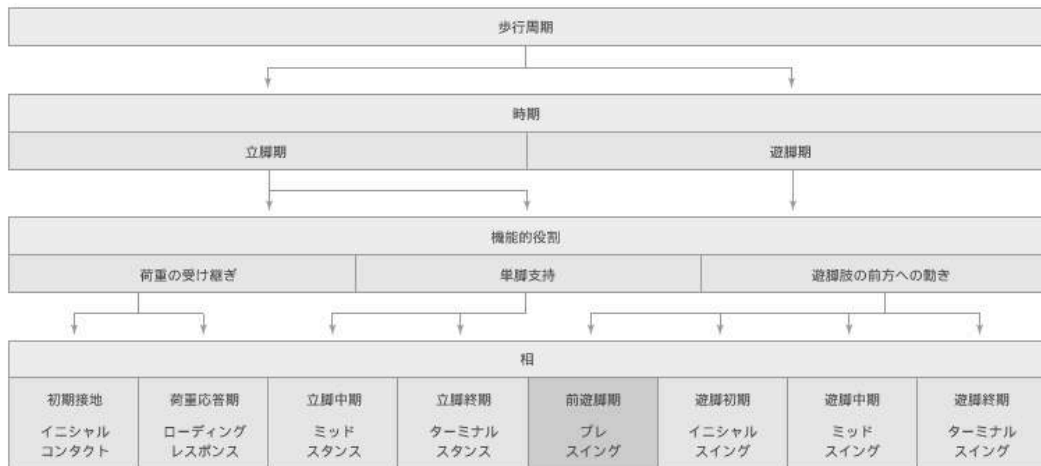


図 2.1: 歩行周期の細分化 [6]

歩行周期は、まず「立脚期」と「遊脚期」に分類される。

- 立脚期
 - － 歩行周期中の足が地面についている期
 - － 荷重の受け継ぎと単脚支持を担保する
- 遊脚期
 - － 歩行周期中の足が地面から離れている時
 - － 足の前方への動きを担保する

さらに上記した「立脚期」と「遊脚期」はより細かな相に分けられ、立脚期は5つ、遊脚期は3つの相に分類される。それらの各相の名称と役割を表 2.1 に示す。

表 2.1: 各相に特有の役割 [6]

相	特有の役割
イニシャルコンタクト (IC)	衝撃吸収の準備
ローディングレスポンス (LR)	衝撃吸収/安定性保証/前方への動き保持
ミッドスタンス (MSt)	身体を前に運ぶ/足と体幹の安定性確保
ターミナルスタンス (TSt)	支持足の直上を越えて身体を前に運ぶ
プレスイング (PSw)	遊脚期の準備体勢
イニシャルスイング (ISw)	床から足が離れる/足を前に運ぶ
ミッドスイング (MSw)	足を前に運ぶ/足と床のクリアランス確保
ターミナルスイング (TSw)	足を前に運ぶことの終了/ICの準備

歩行周期は床への着地から次の着地への時間で定義されると先に述べたが、この間の時間を歩行周期の 100%とすると、8つの相と時間的割合は図 2.2 の様になる。

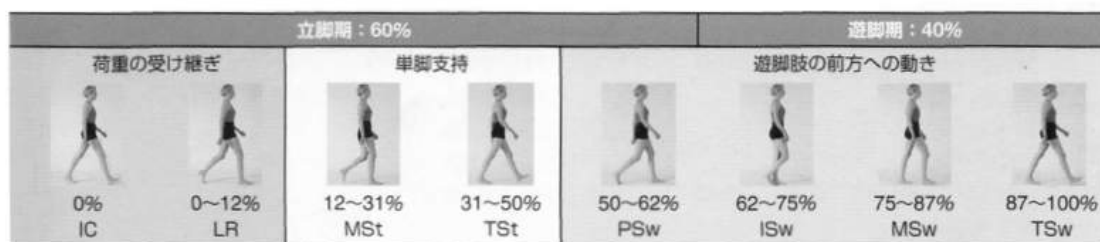


図 2.2: 8つの相と時間的割合 [6]

図 2.2 によれば、歩行周期における約 60%が足が地面に着いている立脚期であり、残り約 40%が体を前に運ぶ遊脚期となる。また、石井らによる『スポーツ学入門』[7]によると、19 歳以上の成人の 1 歩行周期の平均時間は 1.06 秒との観察報告がある。すなわち、足裏感覚を感じるのは、立脚期の間の 0.6 秒程度であり、足裏への接触感を提示するにはこの期間が重要であるといえる。このように歩行動作は、歩行周期という観点からみることにより詳細に理解することができる。

2.2. 足裏感覚

続いて、本研究が操作を試みる足裏感覚について述べる。足裏感覚とは、足裏から入力される感覚情報の総称である。二足歩行を行う人間にとって、足裏は唯一、床と接する部位であり、足裏感覚によって得られる情報を処理して歩行動作を行っている。Perryら [8] は、足が地面に設置する立脚期において、足裏の接触は四つの相にまたがって図 2.3 のように変化することを明らかにした。

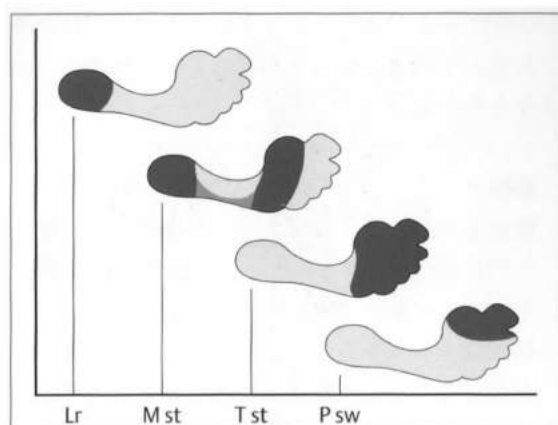


図 2.3: 歩行時の足裏接触 [8]

先に引いた『観察による歩行分析』[6]によると、足裏には感覚情報を取得する固有受容器メカノレセプターが多数存在している。これらメカノレセプターは前足部と母指に密に集中しており(図 2.4), 大杉 [9] によると触覚・圧覚・振動知覚などの情報を受信することができる。歩行時における足裏接触分布と、感覚固有受容器メカノレセプター分布は重なる部分があり、密接に関係していることが伺える。

触覚を感じ取る力である「触力」の測定法で最もよく知られているのは、「二点弁別閾」という試験である。目隠しをした被験者に、二本の針の先端で刺激を与え、受けた刺激が針一本だったか二本だったかを問う。刺激点を十分に遠ざけた点からはじめて、徐々にその距離を短くすると、刺激が一点に感じられる点があり、その距離が短いほど触力が高く、敏感であることを示す。様々な体の部位の二点弁別閾を計測した結果を示すのが、Weinstein [10] による、図 2.5 である。



図 2.4: 足裏感覚受容器の分布 [6]

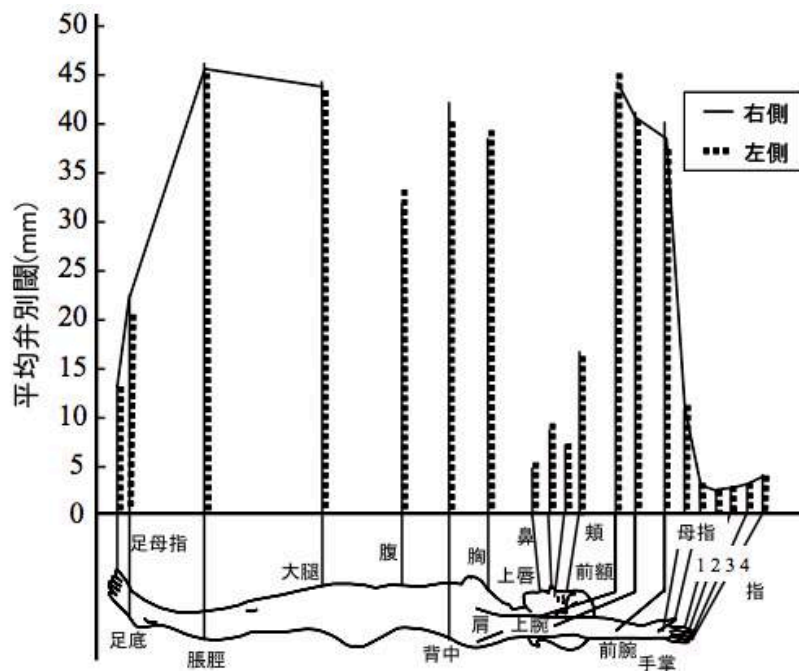


図 2.5: 体の部位ごとの二点弁別閾 [10]

図 2.5 をみると、足裏は、手の指先や顔に比べると敏感でないものの、腕・腹・背中などと比べると十分感覚が鋭いことが確認できる。

2.3. 足裏への情報提示に関する研究

足裏は体の部位の中で、最も敏感な部分でないものの、情報伝達の媒体として着目され、研究が進められている [11]. 視聴覚に対して提示されていた情報を、足裏感覚を通じて伝えることにより、視聴覚を他の情報処理に振り分けられるようにすることが研究の主要な目的として設定されている。アプリケーションの例としては、歩行者に対するナビゲーションシステムがあげられる。

Meier ら [12] は、片足に 12 個の振動モーターを格子状に敷き詰めた靴を製作し、振動パターンを操作することにより、方向指示を試みている。また、振動モーターを使わない方法として、CabBoots [13] は靴底に角度をつけることができる機構を実装し、歩行方向の誘導を図っている。これらの研究は、歩行誘導において一定の成果を示し、足裏感覚の操作で情報を伝え得ることの可能性を示唆しているといえる。

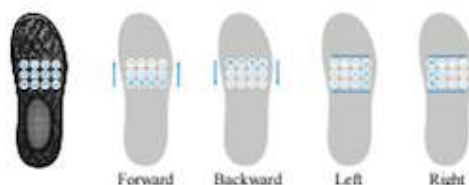


図 2.6: 振動モーターの配置と振動パターン [12]

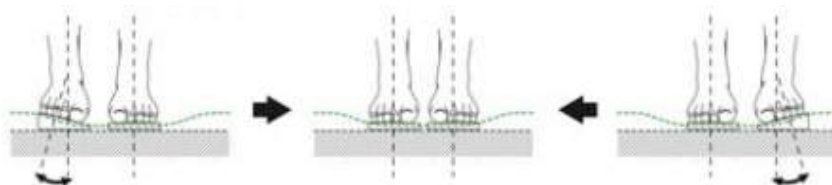


図 2.7: CabBoots のインタラクション [13]

2.4. 足裏への触感提示に関する研究

足裏を使って情報伝達を試みる研究は,VR/AR 環境における経験の没入感や信頼性を高めるための触感提示においても展開されている. これらの研究は,エンターテインメント領域,リハビリテーション,そして特定の労働環境での訓練に活かされることが期待されている. 特にエンターテインメント領域での競争は激しく,特許が取得されているケースもみられる [14]. 足裏への触感提示の方法には,大きく2つのアプローチがある. 以下,それぞれのアプローチについて言及する.

2.4.1 床型デバイスによる触感提示

一つは床型デバイスによる手法である.Visell ら [15] の研究では,雪や氷の上を歩いている感覚を演出する. ユーザーは,周囲の三面が囲まれた床型デバイスの上に立ち,デバイス上には景観がプロジェクションマッピングされる(図 2.8). この床型デバイスは36個のタイル型モジュール(図 2.9)で構成されている.それぞれのモジュールに埋め込まれた圧力センサーが足の着地を検知し,オーディオベースの振動アクチュエーターによるフィードバックが足の下から提示される構成となっている. 視覚・聴覚・触覚に訴えるシステムである.

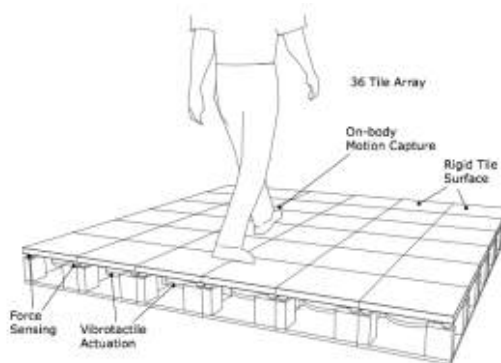


図 2.8: 床型デバイスの全体構成 [15]

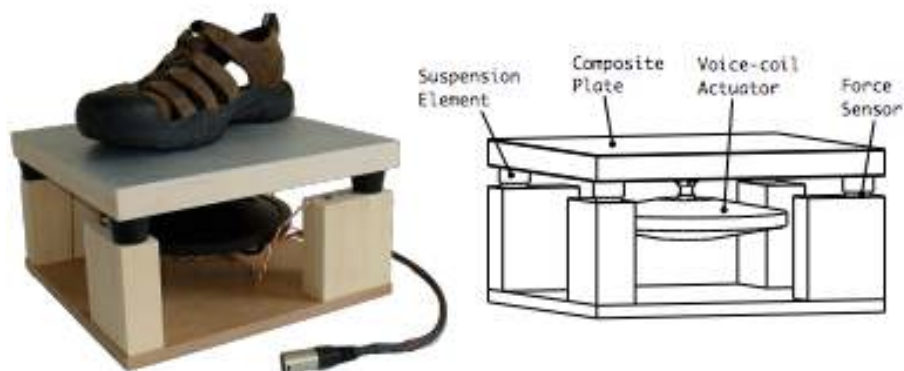


図 2.9: タイルモジュールの構成 [15]

床型デバイスは、タイルモジュールの数を増やすことで、デバイスサイズの拡張を図ることが可能である。これによって、複数人が一斉に体験できるよう発展させられる余地がある。据え置き型のデバイスであるため、電源供給問題がないことも特筆すべき点である。しかしながら、装置の設置場所が限られること、さらには体験範囲がデバイスサイズによって束縛されることが問題点としてあげられている。

2.4.2 靴型デバイスによる触感提示

もう一つのアプローチは、靴型デバイスによる手法である。靴型デバイスによるアプローチは、靴が日常的に使用される道具であることから、装着の違和感が少ない点、加えて、持ち運びが簡単である点で床型デバイスより優れている。

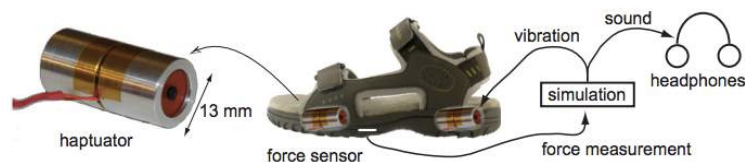


図 2.10: サンドル型デバイス [16]

図 2.10 で示されるサンダル型デバイスは, Nordahl ら [16] によるもので, ソールに圧力センサーとオーディオベースの振動アクチュエーターが埋め込まれている。足の着地に呼応して, ヘッドホンで聴覚, 振動アクチュエーターで足裏に触覚を提示し, 砂や森の上を歩く感覚を床の上に演出する。

また, 足裏触覚を利用したエンターテインメントコンテンツとしては, ファンタスティックファントムスリッパ [17] があげられる。これは, 床面半球型ディスプレイの上に映し出したゲームコンテンツを足で操作するシステムである。足の動きに合わせて, 足裏へ触覚を提示して, コンテンツへの更なる没入感を醸成している。

Snow Walking [18] は, ブーツ型デバイスであり, 深い雪の上を歩いている感覚を提示する (図 2.11)。オーディオベースの振動アクチュエーターで着地感を提示し, 加えて, 電磁石を用いたスライダー機構を実装することで, 深い雪に踏み込む感覚と, 雪から足を引き抜く感覚をつくりだしている。スライダー機構を用いた反力操作は, ユーザーからの評価は高かった一方で, 通電する金属板の上でのみ作用し, 自由に歩き回ることが制限されることが問題点として生じている。



図 2.11: Snow Walking[17]

2.5. 本章のまとめ

本章では, 本研究の目的を達成するにあたり, 参考となる先行事例や先行研究を以下の4つの観点からレビューした.

- 歩行周期
- 足裏感覚
- 足裏への情報提示に関する研究
- 足裏への触感提示に関する研究

はじめに, 歩行動作を変える試みを行うにあたって, 歩行を分析する手段として歩行周期を取り上げ, 歩行動作に対する基礎知識を概観した. 歩行周期に則れば, 歩行動作は2つの期, または, 8つの相に分解して分析することができる.

続いて, 本研究が操作を試みる足裏感覚について述べた. 歩行動作をするとき, 約60%が足が地面についている期間である. 唯一, 地面と接する部分である足裏は歩行動作において重要な役割を担う. その足裏感覚を受容する感覚受容器であるメカノレセプターは, 手先や顔に比べれば感度は劣るものの, 腕・腹・背中などより十分に敏感であり, 多くの情報を受け取れることが確認できた.

足裏は, 体の中で最も敏感な部位ではないが, 情報伝達をする媒体として注目されている. 足裏へ情報を提示するアプリケーションの1つとしてナビゲーションシステムを紹介した. これらの研究では, 歩行誘導において一定の成果を示し, 足裏感覚の操作で情報を伝え得ることの可能性を示唆している.

足裏を使って情報伝達を試みる研究は, VR/AR 環境における経験の没入感や信頼性を高めるためにも触感提示という形で展開されている. 床型デバイスと靴型デバイスによる二つのアプローチが示されており, 双方ともオーディオベースの振動アクチュエーターを用いた触覚刺激を提示する点で一致がみられる. 代表的な研究では, 雪・氷・砂・森の上などを歩く感覚の再現に成功しているが, 幅広い種類の床の踏み心地を網羅できているとはいえ, それらの効果は, いまだ限定的である.

第3章

提案と設計

3.1. ゴール設定

本研究は、足裏感覚をデジタルに操作することで、(1)「いま・ここ」にない床の質感を「いま・ここ」に演出し、(2)歩行動作を能動的に変化させることを試みる。

関連研究において、雪・氷・砂・森を歩く感覚の再現がなされているが、幅広い床の踏み心地を網羅できてはおらず、それらの効果は、いまだ限定的だ。我々が感じている触覚の質感を、触感を表すオノマトペ（擬音語・擬態語）を使い、分類している研究がある [19]。この研究では、日本語の触覚に関するオノマトペを 42 語集め、それぞれに対して、その言葉が持つ「大きさ感」「摩擦感」「粘性感」というイメージを数値で被験者の回答を集め、イメージの関係性を分析している。図 3.1・図 3.2 は、その結果で得られた日本語オノマトペの触覚二次元分布図である。以上で紹介した関連研究で提示されている足裏への触感は、分類表に当てはめれば、図 3.2 左側の「粗さ」「乾き」に近い触感に集中している。

そこで、本研究は、それらと対局に位置する「柔らかさ」軸の周辺に位置する触感に注目する。足と床の接触時に柔らかさを感じる触感を提示することで、1 歩 1 歩を丁寧に踏みしめて歩きたくなる感覚を生み出し、歩行動作を変化させることが本研究のゴールである。足裏を通したこれらの効果は、感覚が麻痺してしまった足に強調した歩行感覚を与えることによる効率的なりハビリや、地面をしっかりと掴んだ正しく・疲れにくい歩き方の誘導などに利用することができる。

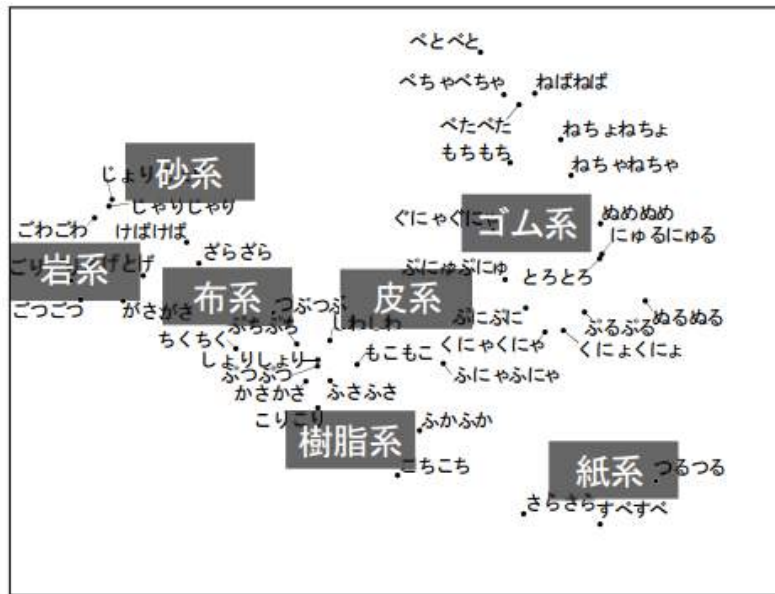


図 3.1: オノマトペの分布図と想起される素材 [19]

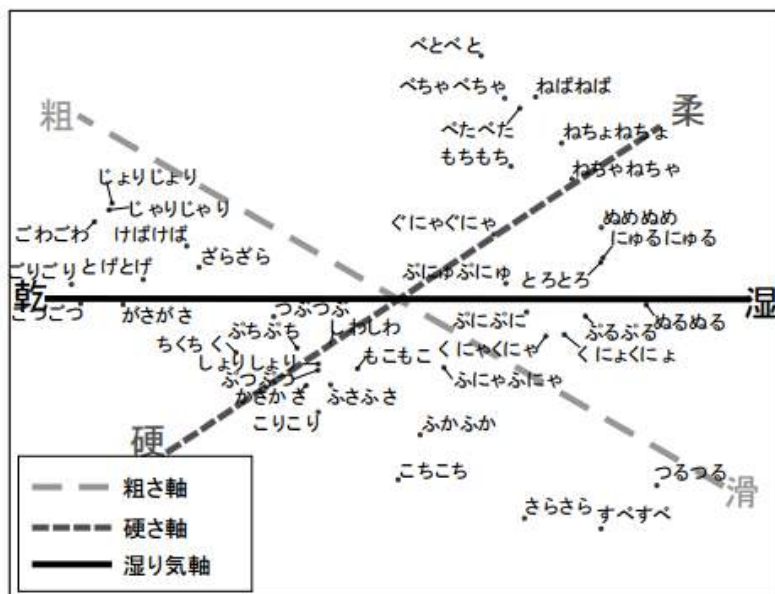


図 3.2: オノマトペの分布図と因子軸 [19]

3.2. システムの提案と設計

以上のゴールを踏まえ、「STEP:足裏感覚を操作することで歩行動作を変化させるハプティックシューズ」のシステム提案を行う。以下, 図 3.3 で設計したシステムの構成図を示す。

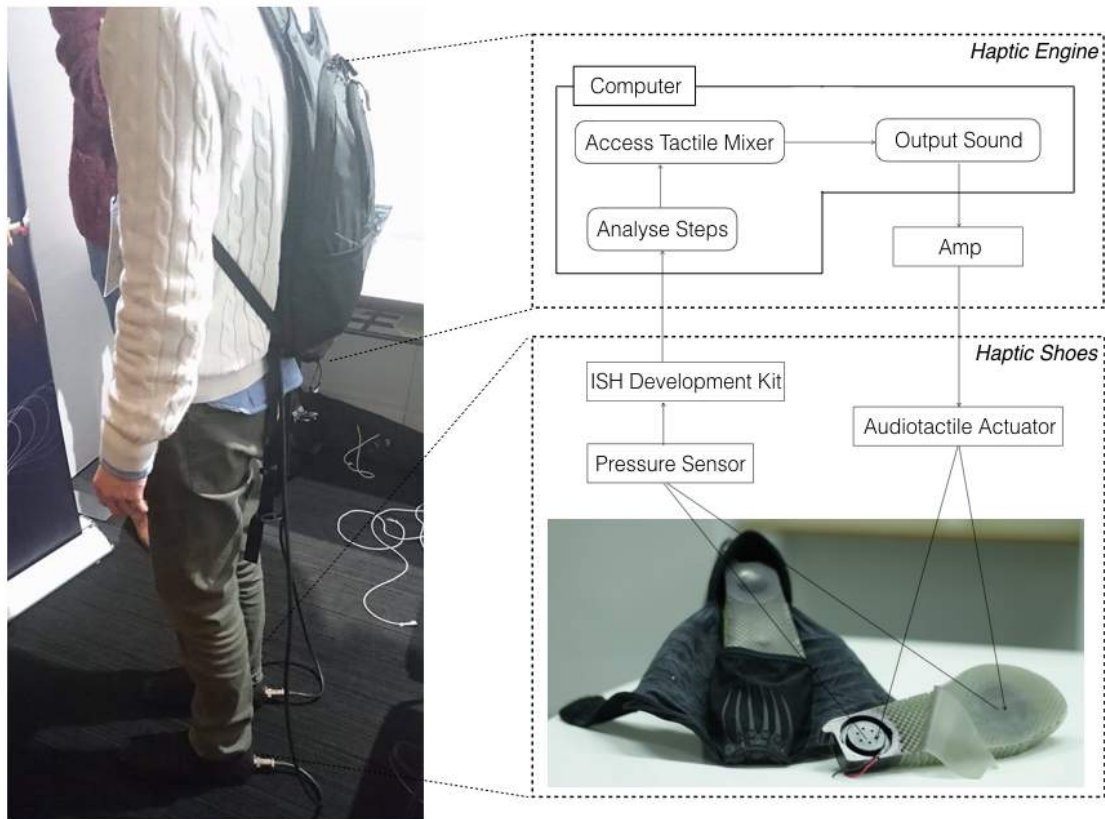


図 3.3: システム構成図

STEP は2つのパートで構成される。それぞれの役割と狙いを、以下に述べる。

- Haptic Shoes (ハプティックシューズ)
- Haptic Engine (ハプティックエンジン)

3.2.1 Haptic Shoes

歩行動作を変化させるにあたって、本システムは靴を用いたアプローチをとる。靴は日常的に使用される道具であることから、靴型デバイスによるアプローチは、装着の違和感が少ない点、加えて、持ち運びが簡単である点で優れている。

ハプティックシューズは、足裏感覚を操作するインソールを挿入することで動作させる。将来的には、様々な靴に挿入することを可能にすることが、最終的な理想であるため、インソールを中心に仕掛けを施した。インソールは、圧力センサー、*Fujitsu interactive shoes hub* が提供するマイクロコンピューター、スピーカーベースの振動アクチュエーターで構成する。圧力センサーの値はマイクロコンピューターに積載された Bluetooth Low Energy モジュールを通じて、コンピューターへと送られる。そして、歩行動作が検知されると、有線を通じ音声信号が振動アクチュエーターへと送られ、足裏感覚を提示する仕組みである。

3.2.2 Haptic Engine

圧力センサーの値によって、歩行動作を検知し、歩行が検知されると足裏感覚を提示するための触覚刺激を発するように構築したソフトウェアとアンプリファイアをまとめて Haptic Engine と本研究では称する。そして、リュックの中に、この Haptic Engine を格納する。処理システムを背負えるようにすることで、歩行範囲を限定しないようにすることが、リュックを使用する目的である。Haptic Engine によって発せられた音声信号が、ハプティックシューズの振動アクチュエーターへと伝えられ、足裏感覚が提示される。

第4章

実装と実証

本章では, 第3章で述べた設計に基づいて, 実装したシステムについて述べる. さらに, そのシステムの有効性を実証実験で検証し, その結果を述べる.

4.1. 1st プロトタイプ

1st プロトタイプでは, ハードウェアとしてシューズの加工とインソール設計を行い Haptic Shoes を実装する. また, ソフトウェアとして Haptic Engine の実装を行う. 図 4.1 は, 1st プロトタイプのシステム構成図を示す.

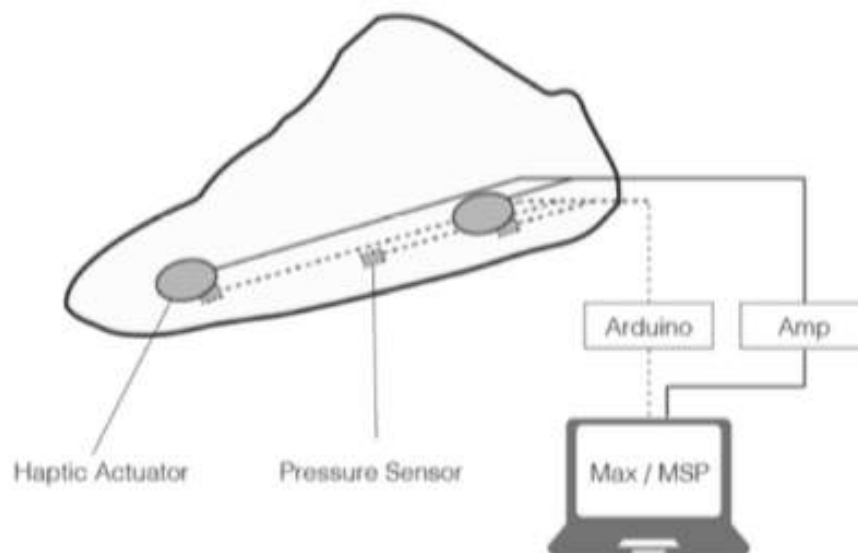


図 4.1: 1st プロトタイプのシステム構成図

4.1.1 触覚提示位置の調査

目的

足裏感覚を操作する際, どの位置にどれだけの振動アクチュエーターを配置し, 触覚を提示するかは極めて重要だ. そこで, はじめに, 触覚提示位置の調査を行う.

調査にあたっては, ファントムセンセーションという, 触覚の錯覚を有効利用する. ファントムセンセーションとは, 触知覚において皮膚上2点の振動刺激を与えた場合刺激が融合し, 2点の間の点に振動を知覚する現象のことを指す.

使用機材

足裏へ触覚を提示する先行研究と同様に, 本研究でも, オーディオベースの振動アクチュエーターを使用する. 本研究では, 株式会社アクーヴラボのバイプロトランスデューサー Vp210 を選択した. 直径 4.5cm, 厚み 1.5cm と小型でありながら, 豊かな振動を提示することができ, 振動を伝えられる範囲も広い. アンプリファイアには, 可聴域だけでない低音も拡大できるようチューニングされた TECHTILE toolkit [20] を用いた. それぞれの外観は, 図 4.2・図 4.3 の通りである.

表 4.1: 触覚提示位置調査のための使用機材一式

機材名	機材の種類
振動アクチュエーター	バイプロトランスデューサー Vp210
アンプリファイア	TECHTILE toolkit



図 4.2: バイプロトランスデューサー Vp210



図 4.3: TECHTILE toolkit[20]

方法

計五箇所へ触覚提示の調査を行った(図4.4). 足裏は, つま先・土踏まず・かかとの三箇所を調査した. また, 足の甲・足首への提示も行い, それらが足裏感覚に影響を及ぼしうるかを検証した. 調査に際しては, 図4.5のように調査部位へと巻きつけて, ホワイトノイズを再生することで振動アクチュエーターを動作させて検証した.



図 4.4: 触覚提示の調査箇所



図 4.5: 触覚提示の調査方法

結果・考察

調査の結果, つま先・かかとの二カ所に提示をすることで, 足裏の全体で振動を感じられた. 足の甲や, 足首への触覚提示は, 足裏まで延長することはないことが判明した.

4.1.2 Haptic Shoes の実装

Haptic Shoes は, シューズ本体とインソールによって構成される.

プロトタイプシューズの選定

プロトタイプにおいては, Vibram 社の Furoshiki Shoes[26-27cm] を使用する (図 4.6). 足を包み込み, 足首のまわりで留める造りになっているため, 足裏への密着を担保することができる. また, 収縮性のある素材で構成されているため, 体験者の足の大きさの差異に影響されることが少ないことも Furoshiki Shoes を選択する背景となった.



図 4.6: Furoshiki Shoes

シューズの加工

かかと部分に穴を開け,12芯ケーブルのアダプタ取り付けを行った(図4.7). 靴内部から出るケーブルは,後述するインソールに内包される振動アクチュエーター2つと圧力センサー3つとの配線で使用する. かかと部分から外に出るケーブルは,Haptic Shoes と Haptic Engine の間でやり取りされるデータを運ぶ役割を果たす. 太い1本のケーブルにまとめてしまうことで,ユーザーの足に絡んでしまう危険を避けることを避け,並びに耐久性を担保した.



図 4.7: 12 芯ケーブルの取り付け

インソールの設計

触覚提示位置の調査を踏まえ,インソールの設計を行った. インソールは振動アクチュエーターが提示する振動を伝搬させるために硬い素材を使用する必要がある. 布のような素材で全体を包んでしまうと,振動が伝わりにくくなってしまうためだ. また,振動アクチュエーターが押しつぶされて破損する原因にもつながる.

はじめに制作したのは,スチレンボードを重ねて,振動アクチュエーターが収まる部分をくりぬき,フェルトで上面をカバーしたソールである(図4.8). 簡単に制作できることが利点である. しかしながら,足の上にかかる重圧への耐久性が足りず,特にかかと部分が押しつぶされ,ソールが崩れてしまう問題点が発見された. これにより,より硬質なインソールが求められることが判明した



図 4.8: スチレンボードによるインソールプロトタイプ 1

そこで、インクジェット方式の3Dプリンタを使って、硬質で耐久性のあるインソールの制作を試みた(図4.9)。振動アクチュエーターが収まるよう設計し、柔軟性を出すために土踏まず部分に複数の空洞を設けた。結果、足の重圧に耐える耐久性を十分にもたせることができたものの、ソールは柔軟性が十分でなく、靴の中で足裏と密着せず、足裏感覚操作に適しなかった。



図 4.9: 3D プリントによるインソールプロトタイプ 2



図 4.10: 3D プリントによるインソールプロトタイプ 3

上記の結果を踏まえ、空洞部分を増やすかつ、振動アクチュエーター付近以外を、ゴム製の素材へ変更することで、柔らかさを設計した。(図 4.10).

シューズへのインソール組み込み



図 4.11: シューズへのインソール組み込み

インソールプロトタイプ3では足裏への密着性を担保するのに伴い、軽量化も達成することができたため、1st プロトタイプでの使用を決め、シューズへの組み込みを行った（図 4.16）。靴内部から出るケーブルには、振動アクチュエーター2つと圧力センサー3つが接続されている。それぞれの配置は図 4.1 で示す通りである。



図 4.12: STEP 装着イメージ

ここまでで、Haptic Shoes の実装を示した。図 4.12 に、STEP の装着イメージを示す。

4.1.3 Haptic Engine の実装

続いて,Haptic Engine の実装について述べる.Haptic Engine のソフトウェア部分は,Cycling '74 が提供する Max/MSP を用いて開発した. 図 4.13 がその外観を示す.Haptic Engine は, 以下の 3 機能を保持する.

- 歩行動作の検知
- 足裏感覚の提示
- 素早いパターン切り替え

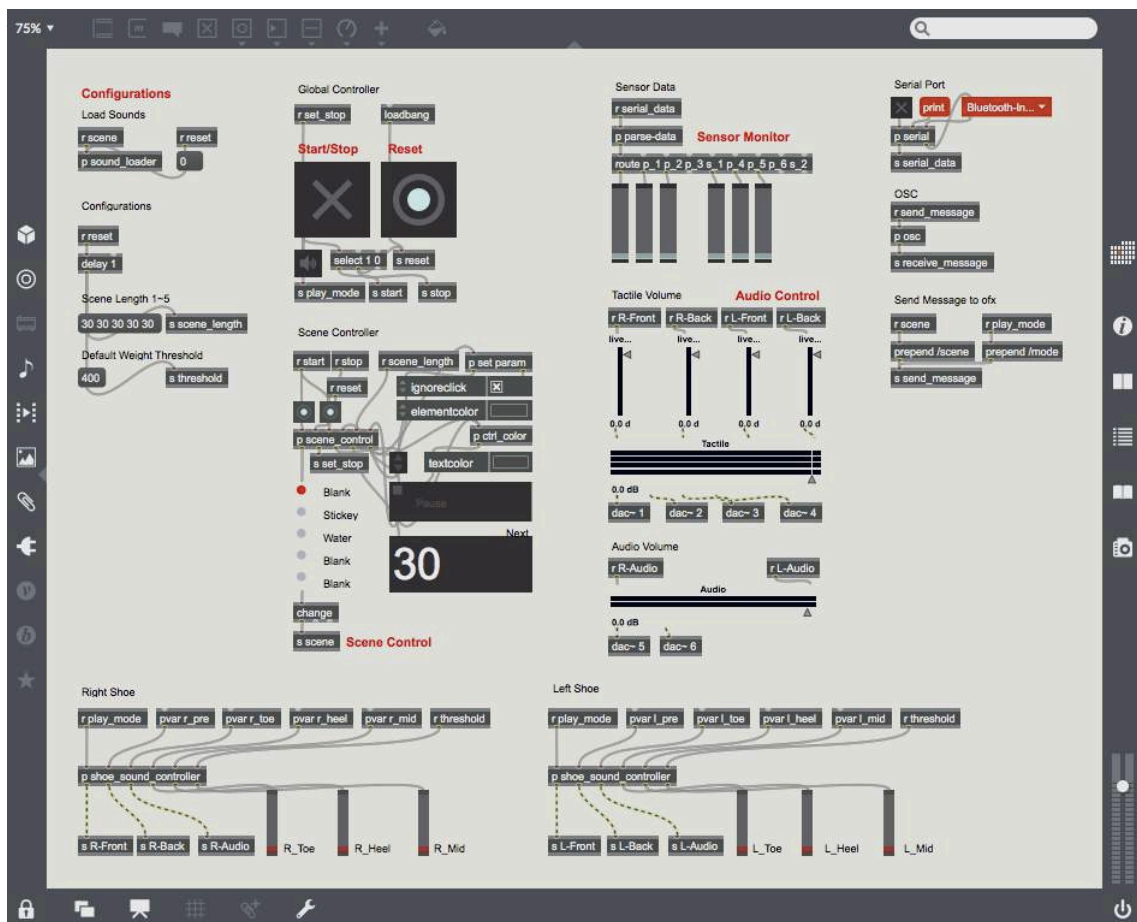


図 4.13: Haptic Engine の外観

歩行動作の検知

歩行動作は、片足に3つずつ取り付けられた圧力センサーによって検知する。センサー値は、USB 接続した Arduino Mini のシリアル通信を介して、Haptic Engine へと送られる。センサー値の閾値を超えた上昇を、地面への着地とみなし、ユーザーの歩行動作を把握する。図 4.14 がプログラム外観を示す。3つの圧力センサーの役割について説明すると、つまさき部・かかと部のセンサーは、それぞれの真上に位置する振動アクチュエーターと対応関係をなしている。足中央部のセンサーは、閾値を設定するために使用される。ユーザーが1歩目を踏み出したときに、足中央部のセンサーにかかる値によってキャリブレーションを行う仕組みだ。これにより、身体の大小による「体験の差」が出てしまうことを防ぐ。

また、足が地面から離れはじめていることを判断するために、センサー値の下降も検知できるようにした。これにより、足が地面に着地している立脚期だけでなく、足が地面から離れる遊脚期においても、触感を提示することが可能となる。

以降、足が着地してセンサー値が閾値を超えて上昇することを「UP シグナル」、足が離れはじめて、センサー値が下降しはじめることを「DOWN シグナル」と呼ぶ。

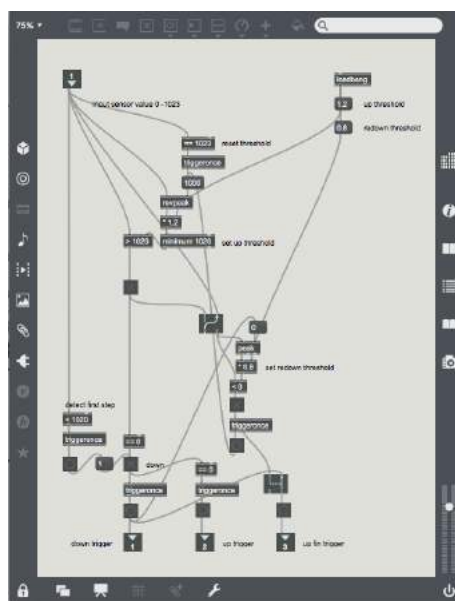


図 4.14: 歩行動作検知プログラム

足裏感覚の提示

Haptic Engine は、検知した歩行動作に合わせて、音声ファイルを再生して足裏感覚を提示する。再生された音声は、オーディオベースの振動アクチュエーターに伝わる仕組みである。

再生する音声ファイルの格納方法について述べると、1st プロトタイプでは、6つの音声ファイルを格納することができる仕様とした。UP シグナル・DOWN シグナルそれぞれにおいて、3種類までの異なる音声ファイルを格納することができる。それぞれのシグナルがつまさき部・かかと部で検出されると、設定した音声ファイルが同時再生されて、対応する振動アクチュエーターに音声が届き、足裏感覚の提示がなされる。

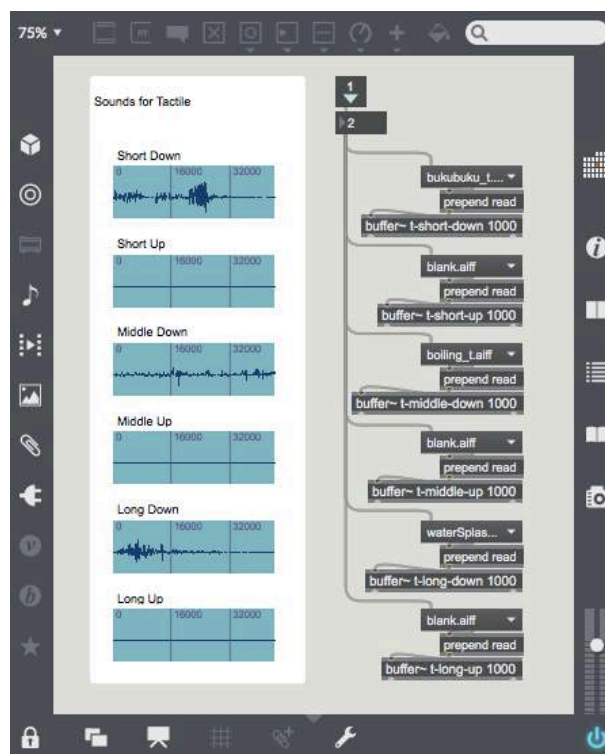


図 4.15: 音声ファイルの格納

素早いパターン切り替え

異なる足裏感覚提示へ瞬時に切り替えられることは、ユーザーに体験を比較してもらうために重要な要素である。そこで、足裏感覚提示パターンが容易に切り替えられるコントロール画面を制作した。また、30秒ごとに自動で異なる足裏感覚のパターンへ遷移できるようにもしており、ユーザーと会話しながら、自然なパターン切り替えを行える設計とした。



図 4.16: パターンコントロール画面

4.1.4 足裏感覚のデザイン

前章で、歩行動作を変化させる足裏感覚には、柔らかさを感じる触感が有効であるとの仮説を立てた。この仮説に基づき、歩行動作を変化させる足裏感覚のデザインを行い、Haptic Engine のソフトウェアへ組み込む。具体的には、2種類の足裏感覚を実装した。

べたべたする足裏感覚

1つ目は、「べたべたする足裏感覚」である。図 4.17 [21] が足裏へ提示したいイメージ像である。地面から足を引きはがすような足裏感覚を提示することで、歩行動作を変化させることを見込む。歩行周期の分類を用いれば、支持足の上を越えて身体を前へ移動させていく「ターミナルスタンス」に焦点を当てている。ターミナルスタンスから、かかと部が地面から離れはじめ、遊脚期へ移行しはじめる。



図 4.17: ガムを踏んだかのようなべたべた感 [21]

上記した足裏感覚を提示するにあたって、Haptic Engine が DOWN シグナルを得たときに音声ファイルを再生するようにする。これにより、足をひきあげた時にターミナルスタンスのタイミングで足裏感覚を提示することができる。

図 4.18 が、音声ファイルの詳細を示す。左図は、横軸が時間を示し、縦軸が振幅の大きさを示す一般的な波形の示し方である。右図は、横軸が時間、縦軸が周波数、各点の明るさや色が周波数の強さを表すスペクトログラムという表示形式だ。図が示す通り、冒頭の急激な振幅の増大がポイントであり、この変化率の大きさがガムを踏んだときのような感覚につながるのではないかと考えた。

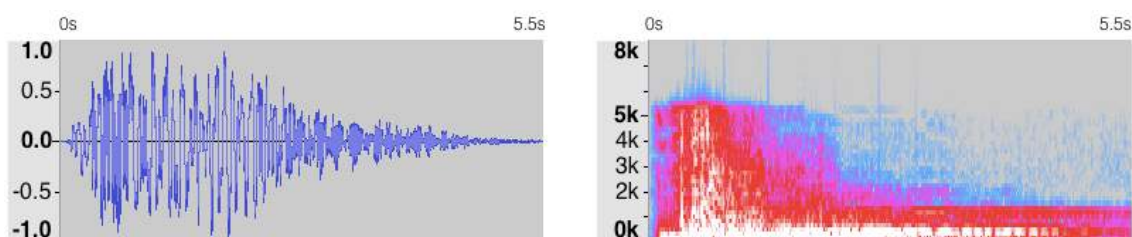


図 4.18: べたべたする触感

ぐによぐによする足裏感覚

2つ目は、「ぐによぐによする足裏感覚」である。図 4.19 [21] が足裏へ提示したいイメージ像である。足に水気のあるものがまとわりつくような感覚を提示することで、歩行動作が変化することを期待する。前述した足裏感覚と同様に、歩行周期の分類を用いれば、足と体幹の安定性を確保する「ミッドスタンス」に着目する。触感提示のタイミングは、UP シグナルの時とする。これにより、足裏の全面が地面に着くタイミングで足裏感覚を提示することができる。

図 4.20 が、振動アクチュエーターへ送る音声を示す。べたべたする触感とは異なり、3種類の音源を同時再生して合成するかつ、直接的に水を想起させる音声を用いた。1列目が、お湯が沸騰する音、2列目はストローで液体に空気を吹き込む音、3列目は水面に石を投げ込む音をイメージした効果音である。以上の音声を使うことで、水気、加えて足にまとわりつく足裏感覚の演出を見込む。



図 4.19: 長靴の中に水が入ったかのようなぐによぐによ感 [21]

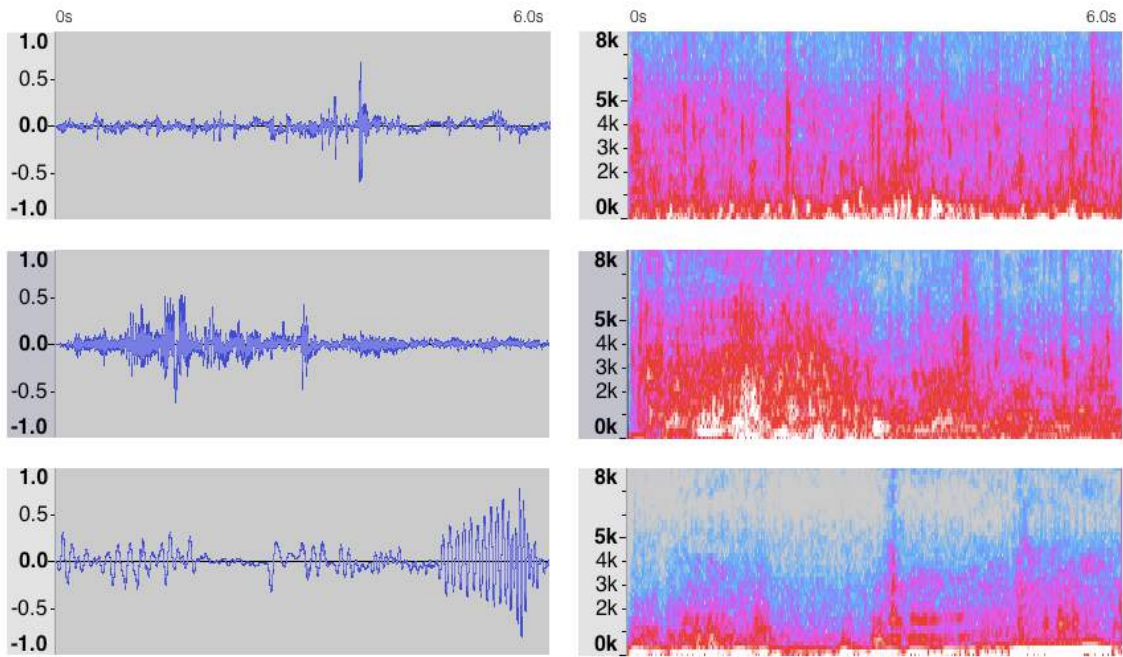


図 4.20: ぐによぐによする触感

4.1.5 1st プロトタイプの全体像

以上の実装をまとめ,1st プロトタイプの全体像を図 4.21 で示す.



図 4.21: 1st プロトタイプの使用機材一式

表 4.2: 1st プロトタイプの使用機材一式

機材名	機材の種類
振動アクチュエーター	バイプロトランスデューサー Vp210
圧力センサ	FSR400 SHORT
アンプリファイア	TECHTILE toolkit
オーディオインターフェイス	Roland - OCTA-CATURE
コンピューター	Macbook Air 13inch

4.2. 実証実験 (1st プロトタイプ)

1st プロトタイプを用いて、以下のイベント及び学会でデモンストレーション展示を展開した。そして、これらの場を利用して STEP の実証実験を行った。ここでは、その結果について報告する。

- *SXSW2016 Tradeshow*(2016.03.13 - 2016.03.16)
 - アメリカ・オースティンで毎年開催される音楽・映画・ネット技術の祭典
 - *Fujitsu interactive shoes hub* として合同出展
- *Fujitsu Forum*(2016.05.20)
 - 株式会社富士通が毎年開催する広報イベント
- *Euro Haptics2016*(2016.07.06)
 - ヨーロッパ地域で開催される触覚分野の学会 (2016 年はイギリス開催)

4.2.1 実験概要

目的

足裏感覚を操作することによって、歩行動作が変化するかを確かめるにあたり、今回の実験では、2つの目的を設定した。

- 提示する2つの足裏感覚が想定通りの感覚として、ユーザーに知覚されているか評価すること
- 以上の仮想的な知覚が、歩行動作に影響しているかのような反応をユーザーが感じられているか評価すること

手順

以下,5つの手順を追って,検証を行う.

1. STEP の装着
2. 足裏感覚の提示を行わず,STEP の履き心地になれてもらうために,自由に歩きまわってもらう。(例:その場で足踏み・駆け足・ジャンプなど)
3. 「べたべたする足裏感覚」を提示して,歩きまわってもらう.
4. 「ぐにょぐにょする足裏感覚」を提示して,歩きまわってもらう.
5. 足裏感覚を提示している時,図 4.17・図 4.19 の様な感覚があったかを 5段階評価のアンケートに回答してもらう。(1:全く感じなかった,2:感じなかった3:どちらでもない,4:感じた,5:強く感じた)

実験の様子

図 4.22 は,デモ展示のセットアップイメージを示す. 次ページの図 4.23 と図 4.24 は,STEP を体験してもらっている様子を示す.



図 4.22: デモ展示のセットアップイメージ



図 4.23: STEP を装着する様子



図 4.24: STEP を体験してもらっている様子

4.2.2 実験結果

3つのデモンストレーション展示を合わせて、通算約100名に体験してもらうことができた。また、その内の27名にアンケートに回答してもらった。ほとんど全ての体験者が、はじめに驚いた顔を見せ、その後に笑みを浮かべていたのが、2つの足裏感覚提示において共通していた点であった。

べたべたする足裏感覚

まず、「べたべたする足裏感覚」を提示すると、筆者がイメージしていたガムを踏んでしまった感じをまさに知覚した人もいれば、ガムテープの上をべたべたと歩いているような感じと表現した人もいた。5段階評価アンケートでは、27名の平均は4.07であった。この足裏感覚を提示した時に、体験者からよく聞かれた感想として、「足が重くなった」「足がだるい」「足が上からおさえつけられる気がする」「引き剥がす力を感じる」といったものがあつた。また、これらとは反対に「足が跳ね上げられて軽くなったような気がする」と表現する人も少数みられた。

ぐによぐによする足裏感覚

続いて、「ぐによぐによする足裏感覚」の提示結果である。水の上を歩いている感じと答える人の他には、雪の上を歩いている感じや砂利道を歩いている感じと答える人が少数みられた。提示した足裏感覚に対する5段階評価アンケートの平均は4.0であった。歩行動作に与える感覚としては、「足が沈み込む感じがする」「踏み込みが安定する気がする」などという意見が多かつた。また、「一步一步を意識して歩きたくなつた」という意見も述べる人もあつた。2つの足裏感覚を比べると、こちらの感覚を好む人の方が多く、もう1度体験したいとのリピートも多かつた。

実装に関して

実装に関していえば、ケーブルの長さを気にして、恐る恐る歩く人が多かつた。また、多くの人が脱着し、大きな重圧が繰り返しかかる中で、特にセンサー部分の配線

が破損することが多く、振動アクチュエーターも何度か破損してしまった。

4.2.3 考察

足裏感覚を操作されるのは、ほとんどの人にとって初めての体験であり、それが驚きや笑いにつながったのだと考える。提示した2つの足裏感覚は、アンケートの結果も鑑みて、満足度の高いものであったといえる。知覚された足裏感覚が、歩行動作にどう影響しているかを語ったユーザーの言葉はどれも興味深い。振動アクチュエーターによる振動が、足を重く感じさせたり、足の沈みこみを錯覚を生み出しているのだと考えられる。そのような錯覚が実際の歩行動作にどのような変化を及ぼすのかを、次の実証実験で確かめる。

ただし、実装においては問題点が見受けられた。ケーブルの長さが限定的であること、センサー部分の配線が破損しやすいことがあげられる。まずは、2nd プロトタイプをつくり、問題点を改善する。

4.3. 2nd プロトタイプ

1st プロトタイプの考察を経て,Haptic Shoes と Haptic Engine それぞれに改善を施し,2nd プロトタイプを実装した.

4.3.1 Haptic Shoes の改善

1st プロトタイプを用いた実証実験では,靴内部のケーブル配線が多かったため(図 4.16),多くの人が脱着し,重圧がかかる中で,特にセンサー部分の配線が破損することが多かった.そこで,2nd プロトタイプでは,*Fujitsu interactive shoes hub*が提供する開発キットを使用することにした. 開発キットに搭載された Bluetooth Low Energy モジュールを通じて,無線通信することによって,配線を少なくすることができ,故障を防げると考えた. 並びに,将来的にインソールモジュールとして活用するためのワイヤレス化に向けた1歩となった. Bluetooth Low Energy モジュールとコンピューターとは,node.js を使用したプログラムでペアリングさせる.



図 4.25: ソール中央部へのモジュール埋め込み

4.3.2 Haptic Engine の改善

1st プロトタイプでは,Haptic Engine を床置きする設計であり,歩行可能範囲がコードの長さに制限されていた.そこで,2nd プロトタイプでは,Haptic Engine をリュックに格納することで,歩行範囲の限定をとりはずす.軽量化を図るために,コンピュータのサイズを小さくし,オーディオインターフェースをコンピュータ上の Audio Midi 設定で置き換えることとした.アンプリファイアへの電源供給は,モバイルバッテリーを用いる.

リュックは,体へ密着するコンパクトなものを使用した.Haptic Shoes へと伸びるケーブルはリュック背面に穴を開けて,通している.ユーザーの背の高さに合わせて,ケーブルを引き出すことができる設計である.



図 4.26: Haptic Engine をリュックへ収納

4.3.3 2nd プロトタイプの全体像

以上の改善を施した2nd プロトタイプの全体像を図4.27に示す。破線で囲まれた部分がリュックの内容物を示す。



図 4.27: 2nd プロトタイプ使用機材

表 4.3: 2nd プロトタイプの使用機材一式

機材名	機材の種類
振動アクチュエーター	バイプロトランスデューサー Vp210
圧力センサ	FSR400 SHORT
アンプリファイア	TECHTILE toolkit
モバイルバッテリー	Poweradd 23000mAh
コンピューター	Macbook Air 11inch

4.4. 実証実験 (2nd プロトタイプ)

2nd プロトタイプを用いて、足裏感覚をデジタルにコントロールすることが、歩行動作を能動的に変化させ得るかを評価する。具体的には、足裏感覚の操作により、歩行動作のパラメーターの1つである歩幅に変化が起きるかどうかを検証する。1st プロトタイプを使った実証実験では、足裏感覚を提示することで、「足が重く感じる」、「足が沈みこむ感じがする」などの歩行動作に対する錯覚を確認することができたが、本実験では、モーションキャプチャを使って、それらの錯覚が実際の歩行に対してどのような変化を及ぼしているか客観的なデータとして表す。

4.4.1 実験概要

実験イメージ



図 4.28: 実験イメージ

図 4.28 は、実験のイメージを示す。左足の膝にモーショントラッカーをつけ、図の左上に位置するモーションキャプチャで歩行動作の動きを追う。

手順

1. STEP の装着
2. 左足の膝にモーショントラッカーを取り付ける
3. スタート地点から左足をはじめの一步として5歩前方に歩いて止まる
(3種の足裏フィードバックをランダムに提示)
4. 第3手順を15回繰り返す(それぞれのフィードバックを5回提示する)

提示する3種のフィードバックは、「フィードバックなし」・「べたべたする足裏感覚」・「ぐによぐによする足裏感覚」の3つである。

4.4.2 実験結果

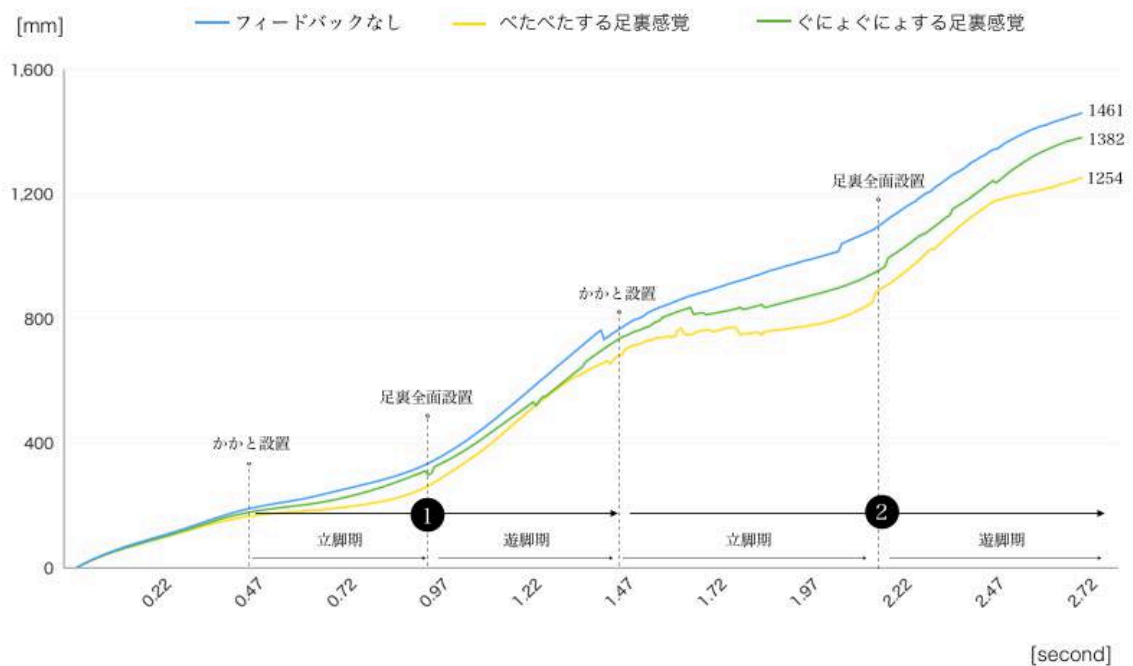


図 4.29: フィードバック別の前方移動距離

20代から30代の男性5名の被験者を得た。図4.29は、横軸が時間、縦軸が左膝に取り付けたトラッカーが前方へ進んだ距離を示している。個々人の3種類のフィードバックごとの平均移動距離を算出し、さらに5名の平均をとってグラフ上にプロットした。グラフをみると、左足は2回の歩行周期を行っていることがみてとれる。前方への移動量が少ない部分が立脚期であり、移動量が増加する部分が遊脚期である。フィードバックなしの時が最も前方への移動量が多く1461mmであった。続いて、「ぐによぐによする足裏感覚」を提示した時は1382mm、最も移動量が少なかったのは「べたべたする足裏感覚」を提示した時であり、1254mmであった。フィードバックなしの時と比べれば、その差は2歩行周期分で200mmとなった。

4.4.3 考察

実験結果から「べたべたする足裏感覚」を提示した時に、足が重くなったように感じられる錯覚は、歩行動作の歩幅に影響することが明らかになった。また、「ぐによぐによする足裏感覚」を提示したときに、「足が沈み込む感じがする」といった錯覚も、歩幅をわずかに減少させることも読み取れる。

以上より、足裏感覚をデジタルに操作することにより、歩幅という観点でみれば顕著な差を確認することができ、結果として歩行動作に変化がもたらされることが発見された。

第5章

結 論

本研究は、足裏感覚をデジタルに操作することで、(1)「いま・ここ」にない床の質感を「いま・ここ」に演出し、(2)歩行動作を能動的に変化させることを試みた。そのために、本研究は、従来の研究では提示されてこなかった「柔らかさ」軸の周辺に位置する触感に注目した。足と床の接触時に柔らかさを感じる触感を提示することで、1歩1歩を丁寧に踏みしめて歩きたくなる感覚を生み出し、歩行動作を変化させることが本研究のゴールであった。

以上のゴールに対し、本論文は「STEP：足裏感覚を操作して歩行動作を変化させるハプティックシューズ」のシステム提案とその実装及び、目的に対する実証実験を行い、その結果を示した。

1st プロトタイプでは、デザインした足裏感覚が想定通りの足裏感覚として捉えてもらうことができ、その知覚が歩行動作に対して影響を与えているかのような「足が重くなった」「足が沈み込む感じがする」などといった興味深いユーザーの錯覚をひきだすことができた。

また、2nd プロトタイプでは1st プロトタイプでユーザーが言及した錯覚が、実際の歩行に対してどのような変化を及ぼしているかをモーションキャプチャを用いて客観的なデータとして表すことに試みた。その結果、上記した足裏感覚によって生まれた錯覚は、歩幅という観点で顕著な差を確認することができ、足裏感覚をデジタルに操作すると、歩行動作が変化することが証明された。

今後の研究としては、足裏を通したこれらの効果を、感覚が麻痺してしまった足に強調した歩行感覚を与えることによる効率的なりハビリや、地面をしっかりと掴んだ正しく・疲れにくい歩き方の誘導などのアプリケーションに発展させていきたい。

謝 辞

本論文をまとめあげることができたのは、多くの方々からの協力をいただいた賜物です。ここで、一部ではありますが、協力してくださった方々へ感謝の意を述べたいと思います。

まず、指導教員である稲蔭正彦教授には、研究指導に際して、いつもユーモアに富んだ的確な指導をしていただきました。心から感謝します。本研究の副査である南澤孝太准教授には、*Fujitsu interactive shoes hub* との協創がはじまった頃より、研究指導ならびに論文執筆などでいつも優しく、的確な指導いただきました。心から感謝します。植木淳朗先生には、いつも気をかけていただき、大変お世話になりました。本研究においては、実装のサポートもしていただき、作品を作る楽しさを教えていただきました。心から感謝を申し上げます。実装にあたっては、神山洋一さんにも、多大なるサポートいただきました。心から感謝申しあげます。また先輩方にもお世話になりました。特に本研究を行うにあたって、多くの知識と励ましをいただいた花光宣尚先輩に心から感謝いたします。本研究を行うきっかけをくださった株式会社富士通の *Fujitsu interactive shoes hub* プロジェクトの方々に感謝します。そして、大学院生活で出会った KMD 同期の友人達にも感謝します。最後に、私の学生生活を支えてくれた父と母に感謝します。ありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] Frank J Penedo and Jason R Dahn. Exercise and well-being: a review of mental and physical health benefits associated with physical activity. *Current opinion in psychiatry*, Vol. 18, No. 2, pp. 189–193, 2005.
- [2] I-Min Lee and David M Buchner. The importance of walking to public health. *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 40, No. 7 Suppl, pp. S512–8, 2008.
- [3] 原野健一. アスリートを支えるソフトマテリアル スポーツシューズ. 日本ゴム協会誌, Vol. 83, No. 5, pp. 133–137, 2010.
- [4] Fitbit. <https://www.fitbit.com/> (参照 : 2016-12-16) .
- [5] 富士通株式会社. interactive shoes hub. <https://www.interactive-shoes-hub.com/index.html> (参照 : 2016-12-16) .
- [6] Kirsten Götz-Neumann, 月城慶一ほか. 観察による歩行分析. 月城慶一, 山本澄子, 盆子原秀三 (訳), 医学書院, 東京, pp. 5–80, 2005.
- [7] 石井喜八, 西山哲成. スポーツ動作学入門. 市村出版, 2002.
- [8] Jacquelin Perry and Judith M Burnfield. Gait analysis: normal and pathological function. 1992.
- [9] 大杉紘徳. 足底感覚. 理学療法ジャーナル, Vol. 49, No. 11, pp. 1023–1023, 2015.

-
- [10] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. In *the First Int'l symp. on the Skin Senses, 1968*, 1968.
- [11] Xiaoyan Fu and Dahai Li. Haptic shoes: representing information by vibration. In *proceedings of the 2005 Asia-Pacific symposium on Information visualisation-Volume 45*, pp. 47–50. Australian Computer Society, Inc., 2005.
- [12] Anita Meier, Denys JC Matthies, Bodo Urban, and Reto Wettach. Exploring vibrotactile feedback on the body and foot for the purpose of pedestrian navigation. In *Proceedings of the 2nd international Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction*, p. 11. ACM, 2015.
- [13] Martin Frey. Cabboots: shoes with integrated guidance system. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. 245–246. ACM, 2007.
- [14] Seiler Brock. 振動履物装置及び振動履物装置と共に使用するエンタテインメントシステム. 特表 2010-532181 号.
- [15] Yon Visell, Alvin Law, Jessica Ip, Severin Smith, and Jeremy R Cooperstock. Interaction capture in immersive virtual environments via an intelligent floor surface. In *VR*, pp. 313–314, 2010.
- [16] Rolf Nordahl, Amir Berrezag, Smilen Dimitrov, Luca Turchet, Vincent Hayward, and Stefania Serafin. Preliminary experiment combining virtual reality haptic shoes and audio synthesis. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 123–129. Springer, 2010.
- [17] 白井暁彦, 佐藤勝, 草原真知子, 久米祐一郎. 足インターフェイスによる複合現実感アミューズメントシステム: ファンタスティックファントムスリッパ (i 特集; 複合現実感). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 691–697, 1999.

- [18] Tomohiro Yokota, Motohiro Ohtake, Yukihiro Nishimura, Toshiya Yui, Rico Uchikura, and Tomoko Hashida. Snow walking: motion-limiting device that reproduces the experience of walking in deep snow. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 45–48. ACM, 2015.
- [19] 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司. オノマトペを利用した触り心地の分類手法, 2010.
- [20] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, p. 26. ACM, 2012.
- [21] Retrieved from <https://unsplash.com/> (参照 : 2016-12-16) .