

表面の感触を足に提示する ハプティックボードの作製と性能評価

M2021SC007 中川 高輔

指導教員：奥村 康行

1 はじめに

人間は触覚を通じて、身の回りの衣類や家具など、あらゆるものから、粗さや硬さ、材質といった情報を知覚している。しかし、現在のパソコンやスマートフォンをはじめとする情報機器から人間への情報提示は、視覚や聴覚を利用したものが多くを占める。インターネット上の膨大な情報に触れる機会が増えている現代において、従来の手法だけでは効率的な情報の取得が困難になってきている。そこで、さらなる情報伝達手段として触覚が注目されている。情報伝達に触覚を使用することの利点は、視聴覚情報を束縛しない情報伝達や、視聴覚情報の補助を行い、より直感的な伝達が可能になるなどの応用が期待できる。

本研究では、視聴覚情報に、足を横に動かした際の感触を振動情報のみで提示するシステムの提案を行う。また、作製した機器の性能評価を行い、有用性を提示するための実験を行った。

2 研究目的

本研究では、足で地面をなぞったり、擦ったりしたときに足裏にフィードバックを与え、視聴覚情報に加えて、更に情報を直感的に伝えることを目的として機器の作製を目標とする。再現する感触の例は、床の表面で足を横に動かしたときに足裏に感じる感触である。これらの感触は、ネットショッピングなどでカーペットの材質や、フローリングなどの木の材質の選定などに役立つことが期待できる。その他の用途として、その場には存在しない平面のテクスチャ画像上で足を横に動かすことにより仮想的にその材質を体験することも期待できる。本研究で作製する装置をハプティックボードと呼ぶことにする。現在のインターネットの視聴覚情報のみでは、感触情報が伝わりにくく、想像することでしか感触情報を受け取ることができない。

本研究では、視聴覚情報のみでは伝わりにくい情報を感触情報により伝わりやすくすることを目的としたハプティックボードの作製を行った。提示する感触情報は足を横に動かしたときに足裏に感じる感触を振動情報のみで再現するものに絞って制作を行った。

3 先行研究との比較

先行研究に、さまざまな足に感触を提示する装置に関する研究がある。足裏に圧覚を提示する「高密度足裏圧覚提示デバイス」[1]という研究がある。この研究では、エアシリンダを利用して大きな凹凸を実際に足裏に力を加えて提示するものである。これに対して本研究では振動のみを用いて感触の提示を行った。

図1 足裏への感触提示の先行研究との比較

	先行研究 [1]	先行研究 [2]	先行研究 [3]	先行研究 [4]	本研究
感触提示方法	圧力	DCモータ	スピーカ	ソレノイド	振動スピーカ
提示感触	地面の凸凹	歩行時	歩行時	方向	足を横に移動
感触提示目的	疑似体験	疑似体験	疑似体験	空間認識	疑似体験
実現する感触	歩行時床反力	歩行時床反力	雪上歩行	振動	表面の素材感
主な用途	VR	遠隔操作	VR	ゲーム、音楽	Webサイト等

「分散床反力をヒト足底に提示可能な足底力覚提示装置の開発」[2]では、VR体験時の歩行時の床から足裏に加わる反力を再現する力覚提示装置が開発された。使用者は椅子に座った状態で、装置に足を乗せた状態で使用する。「足裏への音圧刺激による雪上歩行感の表現 さっぽろ雪まつりアーカイブ」[3]という研究では、雪の上の歩行を板に埋め込まれたポータブルスピーカによるサウンド刺激で表現して、映像に合わせた感触を提示する装置である。これらの先行研究では、足裏には歩行時の感触提示に関する研究が多くあった。本研究では先行研究ではされていない足で地面をなぞったときの感触を再現する機器の作製を行った。

「床型触覚提示装置を用いた足底感覚評価とその展望」[4]という研究では、足裏で空間把握が可能かどうかを検証した研究である。板に対称にソレノイドが取り付けられた板に足を乗せた状態で、方向認識の検証が行われていた。この研究では、足裏による空間認識が目的とされていたが、本研究では、足裏の感触の疑似体験を目的とする。

本研究では、靴を脱いでいる状態で足裏の感触提示を想定している。例えば、カーペットや畳、草原や砂浜をなぞったときの感触を振動情報のみを用いて再現を目指した。また、アプリケーションやWEBサイトの画面の中に「触感」を組み込んだときの使用を想定している。表1に先行研究と本研究の足裏への感触の提示の比較を示す。

4 ハードウェアの作製

本研究で作製する機器は、大きく分けてハードウェアとソフトウェアから構成される。機器の全体構成を図2に示す。

本研究におけるハードウェアとは感触を出力するオーディオアンプとハプティックボード全体の構造を指す。素材の表面の感触を提示するハプティックボードの作製に当たって必要な条件を、床に振動が逃げていかない構造であること、ケーブルの着脱が容易であること、十分な振動が出力可能であることを設定する。機器のハードウェア

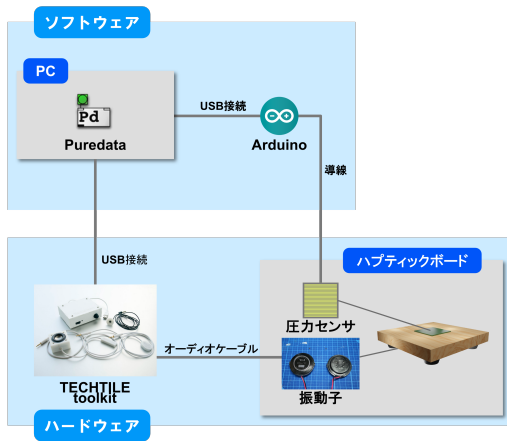


図 2 機器の全体構成

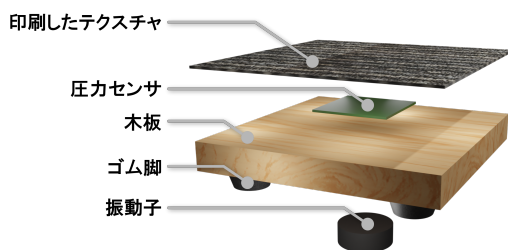


図 3 ハードウェアの構成

アの作製には TECHTILE toolkit[5] とバイプロトランスデューサを用いる。TECHTILE toolkit は、マイクを用いてモノをなぞることで音声信号から触覚情報を記録・再生することができるデバイスである。従来の振動モータ等を試用した単一的な振動触覚とは異なり、リアルタイム性と、振動の分解能が高まったことで、触覚再現の応用が期待されていることからこのデバイスを選択した。足裏への触覚提示には振動アクチュエータを用いる。使用する振動アクチュエータは振動スピーカと呼ばれる音声信号を機械的な振動に変換するボイスコイル型アクチュエータを用いる。

足裏に触覚を提示するハプティックボードを図 3 に示す。材質は、主に木の板を使用する。厚さ 18mm、長さ 110mm の正方形の板に振動アクチュエータとゴム脚と圧力センサを取り付けて作製する。触覚情報は TECHTILE toolkit から音声情報としてバイプロトランスデューサへ出力し、音声による振動の情報を触覚情報として使用する。

5 ソフトウェアの構成

本研究におけるソフトウェアとは、圧力センサから入力された情報を Arduino と PC に送信し、触覚情報を出力するためのものである。ソフトウェアの作製にあたって必要な条件を、PureData を使用してソフトウェアの作製を行うこと、身体には何も取り付けないこととする。PureData と Arduino を連携させて、主にサウンド処理に PureData を用いた。具体的な実装内容は Arduino に

接続した圧力センサのデータをもとに触覚情報の出力の大きさを調整するものである。

6 触覚情報の作製

ハプティックボードを作製する上で触覚情報の作製について以下に述べる。本研究における触覚情報とは、ハプティックボードの上に足を乗せ、そのまま横に動かした際に、そこにはない表面の素材を提示するものである。誰でも分かりやすい触覚情報を提示するために作製にあたって必要な条件を、足を横にスライドさせたときに、そこにはない素材を感じられるような触覚情報を作製すること、表面の素材感を振動のみで再現させることとする。触覚情報の作製にはマイクで実際のカーペットなどをなぞったときの音声波形を使用した。

7 マイクを用いた触覚情報の録音

触覚情報の作製には主に TECHTILE toolkit の付属のマイクで素材の表面をなぞった際に録音された音声を無加工または加工したものを使用する。音声の解析には MATLAB を用いる。サウンド解析にはスペクトログラムと波形全体のスペクトル解析を利用する。スペクトログラムは、音声の周波数成分と時間成分の両方を知ることができるグラフである。短時間フーリエ変換と言われることもある。スペクトログラムでは、音の時間的な変化、音色、高さ、大きさを同時に読み取ることが可能である。横軸が時間、縦軸が周波数、色が音の大きさを表す。波形全体のスペクトルとは、音声波形を時間領域から周波数領域にフーリエ変換したグラフである。

7.1 圧力・速度を変えて録音した際の違い

素材の表面をなぞっての録音の際には、様々な条件が想定される。具体的には、マイクで素材の表面を押し付ける圧力や、なぞる速度や、なぞる方向などである。実際に足で地面をなぞる際にもそれらの条件は常に変化する。それらが変化することにより、音声である触覚情報がどのように変化するかを分析を行った。速度を変える録音はメトロノームを用いた。具体的には、イヤホンでメトロノームの音を聴きながら、定規で定めた距離をマイクでなぞって録音するという方法である。この方法により速度を一定にして録音することが可能となる。圧力を変える録音には、Arduino と圧力センサを用いた。3 つに連結させた圧力センサから入力されたアナログ値をディスプレイに表示させ、強さを確認しながら、すべてのセンサの値が一定になるように力を調整しながら録音を行った。録音する際の圧力は、足で踏んだ際の圧力を参考にした。以下で述べる圧力の値は、Arduino に入力されたシリアル値をおおよその g に変換した値である。本研究では、3 種類のカーペットについて、それぞれ 4 段階の速度と 5 段階の圧力で録音を行った。

録音したカーペットの特徴を以下に述べる。1 つ目は、凹凸が少なく薄めの素材で規則的に縫い目のあるカーペット、2 つ目は、凹凸が多くある程度厚みのあるカーペット、3 つ目は、毛が長くふわふわした厚みのあるカーペットである。図 4 のように録音した音声は、波形とスペクトロ

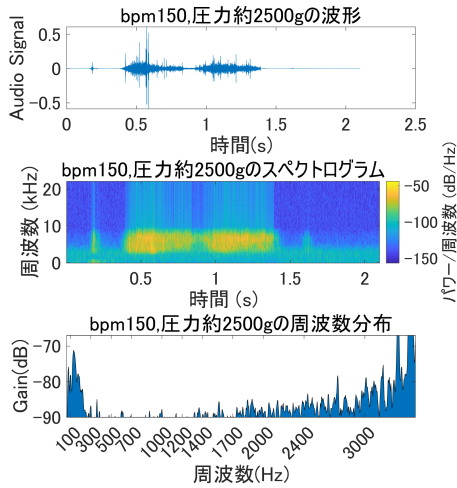


図4 録音した音声の分析結果の例

グラムと波形全体のスペクトルの分析を行った。まず、速度の条件を一定にしてそれぞれのデータを観察した。感触再生に重要な100~1000Hzを中心にとどの周波数が大きいかが観察を行った。低域の周波数成分が大きくなったのは、「凹凸の多いカーペット」で、圧力が強すぎる場合ではなく、弱めの圧力の場合であった。ピークが現れる周波数は100~300Hzで、大きさは-67~77dBであった。

次に、圧力の条件を一定にしてそれぞれのデータを観察した。低域の周波数成分が大きくなった場合は、BPM190のなどの一番動かす速度が速いときではなく、BPM150やBPM170の場合のデータであった。ピークが現れる周波数は100~300Hzで、大きさは-67~81dBであった。

次に、どのカーペットが低域部分が強調される調べるために、圧力を約1500gに一定にしたときの、それぞれの速度ごとに比較した。どの速度でも「凹凸の多いカーペット」では、低域が強調される結果であった。毛の長いカーペットはあまり低域部分が強調されていなかった。

次に、3種のカーペットごとの「波形全体のスペクトル」の違いを比較した。「凹凸の少ないカーペット」については、マイクを押し当てる圧力が大きくなるにつれて、高域・低域部分が目立ってくる傾向があった。BPM150, 圧力約1000gの場合に、一番低域部分が大きかった。「毛の長いカーペット」については、低域・高域ともに目立つことがなかった。BPM150, 圧力約500gとBPM150, 圧力約2000gの場合に一番低域部分が大きかった。「凹凸の多いカーペット」については、他の2つとは違い、高域部分が目立つことが多かった。低域部分も目立つことが多かった。BPM150, 圧力約1000gの場合に一番低域部分が大きかった。

7.2 方向を変えて録音した際の違い

カーペットの表面をマイクでなぞる方向を変えた際に、録音される波形の違いについて観察を行った。今回の検証では、「凹凸の多いある程度の厚みのあるカーペット」のみで行った。圧力と速度は、一定で、図5の矢印のように、3つのなぞる方向で録音を行った。なぞる速度は、BPM130で、圧力は約1000gで行った。

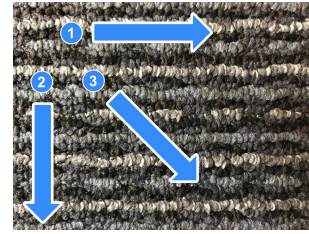


図5 3種類のカーペットをなぞる方向

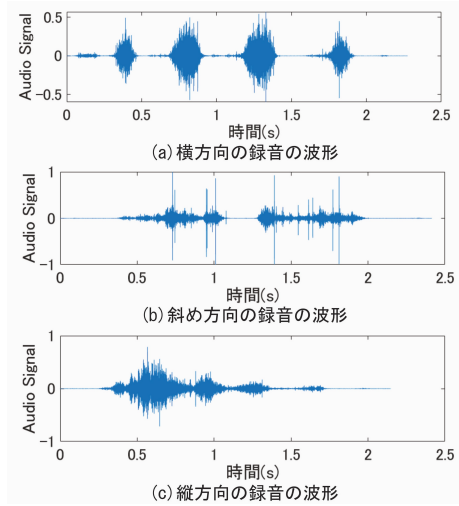


図6 なぞる方向による波形の違い

録音した波形の比較を図6に示す。斜め方向になぞったときは、細かな振幅のピークが現れ、縦方向になぞった際は、振幅の強い部分はあまり現れなかった。横方向になぞった際には、波形の切れ目がくっきりと現れた。これは、実際にマイクで録音する際にも、引っかかりを感じたため、それが原因だと考えられる。斜めに録音した際にも、繊維の引っ掛かりを感じた。スペクトログラムの違いはあまり現れなかった。周波数分布の低域部分でピークが現れる部分は、あまり違いはなかったが、2000Hz付近のピークが現れる部分は大きく異なることが読み取れる。このことから、カーペットのなぞる方向により高域部分の周波数分布が変化することが分かった。

8 機器の性能評価

本章では、本研究で作製するハプティックボードの性能の評価方法について解説する。性能を評価するに当たって必要な条件を、本研究で提案するシステムを実際に試用して、どれほど効果があるのかを判断できる実験を行うことと、様々な条件で記録を行った足裏感覚を提示して、感じ方の違いを判断できる実験を行うこととする。

8.1 感触の精度を問う実験

この実験は、実験対象者がハプティックボードを試用し、足裏に様々な振動による感触を提示し、実際のカーペットと比較して、どの程度感じたかを調査する実験である。この調査の目的は、実際に感じやすい感触の傾向と、カーペットの凹凸感を感じる感触の選定のために行う。

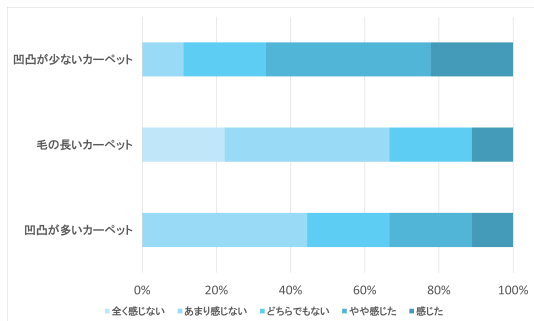


図 7 カーペット別の主観評価

実験は、合計 9 名の被験者に参加してもらい、参加者全員にアンケートに回答してもらった。アンケートの内容は、感触を提示しているとき、実際のカーペットのような感触があったかどうかを、5 段階で評価するものである。3 種類のカーペットについてのアンケートの結果は、以下の図 7 のようになった。このとき提示した感触の速度・圧力はそれぞれ、BPM150、圧力約 1000g で録音したものである。「感じた」「やや感じた」と答えた人の割合が 1 番多かったのは、「凹凸が少ないカーペット」で、逆は「毛の長いカーペット」であった。「感じた」「やや感じた」と答えた人が多かったカーペットの共通点は、低域部分の利得が大きいことであった。一方、「凹凸の多いカーペット」に関しては、被験者の意見の中に、実際のカーペットの厚みがあるため、ハプティックボードのような平らな面では感じにくいとの意見があった。

8.2 録音の圧力・速さによる最適な感知情報の選択

マイクをなぞる圧力と速度を変えて録音した感知情報で、どの条件で録音したものがより感じるかどうかを判定するための実験を行った。圧力を変化させて感触を提示する際には、速度を BPM150 に固定し、速度を変化させて感触を提示する際には、圧力を約 1000g に固定した。圧力は弱を約 500g、中を約 1500g、強を約 2500g、速度は小を BPM130、中を 150、大を 190 の 3 段階に分けて、それぞれ 3 種類のカーペットに関して実験を行った。

「凹凸の少ないカーペット」に関しては、BPM150 の場合に最も「感じた」と答える人が多かった。波形全体のスペクトルを読み取ると、低域の 100Hz 付近に -72dB 程度のピークが現れていた。「毛の長いカーペット」に関しては、「圧力大」の場合に最も「感じた」と答える人が多かった。波形全体のスペクトルを読み取ると、低域の 100Hz 付近に -74dB 程度のピークが現れていた。「凹凸の多いカーペット」に関しては、BPM150 の場合に最も「感じた」と答える人が多かった。波形全体のスペクトルを読み取ると、低域の 100Hz 付近に -72dB 程度のピークが現れていた。

全体的な傾向として、「圧力弱」のときに「感じない」と答えた人の割合が高くなった。速度については BPM150 の場合に「感じた」と答える人の割合が多かった。被験者の意見の中には、BPM190 の場合では、実際に足でなぞったときの差異を感じるとの意見が存在した。

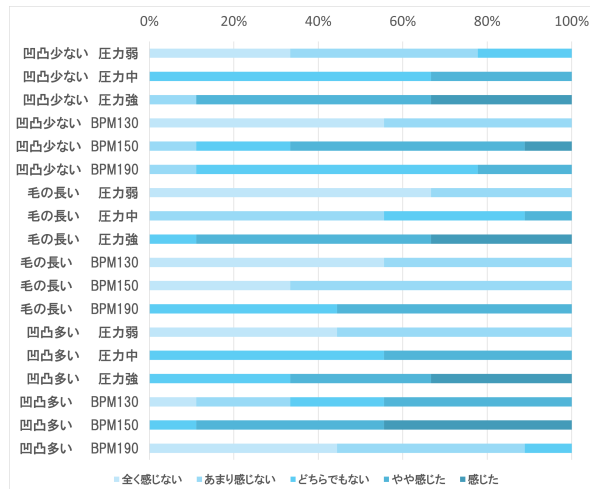


図 8 圧力・速度による主観評価結果

9 まとめ

本研究では、表面の感触を足裏に提示するハプティックボードの作製を行った。今回は、足で素材の表面をなぞったときに足裏に感じる感触を振動により再現することを目指して作製を行った。アンケートにより再現できている感触は、カーペットの糸の縫い目などの凹凸は感じるとの意見があったが、摩擦感や素材の厚みなどは再現できていない。改善点として、摩擦感に関しては、振動以外の手段で物理的に抵抗感を提示する方法が考えられる。素材の厚みに関しては、足で板に加える力に応じて、足裏に力を加える方法などが考えられる。また、今回は、ハプティックボードに加える圧力のみで動作するソフトの作製を行ったが、足を横に動かす速度などによって、出力する感触を変化させた方が感触のずれがなくなるため、モーションセンサ等の実装が改善点として考えられる。また、視覚情報に関して、VR や AR を用いて 3DCG 上に提示する感触のイメージを表示させ、動きに対応させて視覚情報も変化させるなどの改善点も考えられる。

参考文献

- [1] 岡野, 日岐, 広田, 野嶋, 北崎, 池井, “空気圧駆動型デバイスを用いた足裏への触覚提示による物体の位置認識,” VR 学会第 21 大会予稿集, 11A-05, 2016.
- [2] 大谷拓也, 高西惇夫, “分散床反力をヒト足底に提示可能な足底力覚提示装置の開発,” 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 6, pp. 567-573, 2020.
- [3] 山口唯, 松永康祐, “足裏への音圧刺激による雪上歩行感の表現 さっぽろ雪まつりアーカイブ,” 情報処理学会インタラクティブ, 2019.
- [4] 岡崎菜琳, 柏野善大, 堀江新, 稲見昌彦, “床型触覚提示装置を用いた足底感覚評価とその展望,” エンタテイメントコンピューティングシンポジウム, 2021.
- [5] YCAM Inter Lab, “TECHTILE toolkit,” <http://www.techtile.org/techtiletoolkit/>, 参照 Aug. 20. 2022.