



粒子ジャミングを用いた靴型路面感覚提示装置の開発

Development of a Shoe-shaped Device Which Shows Road Surface Sensation with Particle Jamming

増田宗一郎, 満田隆

Soichiro MASUDA and Takashi MITSUDA

立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

概要: モーションキャプチャを用いてユーザが足踏みをすることで仮想空間内を前進できるインターフェイスと、粒子ジャミングによる可変剛性要素を用いた路面感覚提示装置を開発した。ユーザは装具を靴のように足に履いて、靴底に設置された粒子袋の内部気圧が真空状態で硬い路面を体感でき、大気圧状態で柔らかい砂浜を体感できる。ユーザが足を上げることで、踏まれて粒子袋の側面に寄っていた粒子が粒子袋の底に落ちて溜まる。その集まりを踏むことで柔らかい感触が得られるので、大気圧状態で何度踏んでも砂を踏み潰す感覚が持続できる。

キーワード: 路面感覚、粒子ジャミング

1. はじめに

2016 年は VR (バーチャルリアリティ) 元年と呼ばれ、「PlayStation VR」や「Oculus Rift」、「HTC Vive」など高性能な HMD(ヘッドマウントディスプレイ)が販売された。以降、スマートホンディスプレイとした安価な HMD が販売されたり、VR を利用したアミューズメントパークができたり、一般ユーザに VR が浸透した。

仮想環境を歩くことができる VR では、アスファルトや木、泥、砂など人がその路面を歩く感覚を提示することで没入感を高めることができる。足に直接、物理的に路面感覚を提示するインターフェイスには、トレッドミルのように路面が足の動きに追従して動く方式と、足に装着した靴型の装置を利用する方式[1-4]がある。

靴型のインターフェイスには、振動を用いたもの[1][2]や空気圧アクチュエータによる圧覚を用いたもの[3]、磁気粘性流体を利用したもの[4]などが提案されている。野見山らは振動を利用して川の流れ、水の抵抗、砂利を踏んだ触覚を提示した[1]。Takeuchi は振動を利用して硬い路面や柔らかい路面、凹凸のある路面を提示した[2]。岡野らは 10mm 間隔で 128 個並んだ小型空気圧アクチュエータで足裏を押して刺激することで生じる圧覚を利用して仮想物体の位置や形状を提示した[3]。Son らは磁気粘性流体を利用して靴底に取り付けた MR アクチュエータにより接地時の粘性を変化させることで硬い路面や柔らかい路面を踏んでいるような感覚を提示した[4]。

これらの研究ではできなかった砂浜の質感と平坦な硬い路面を 1 つの装具で提示することを本研究では可能にした。安全に、よりリアルな砂浜の路面感覚を提示して没入感を高めるために、本研究では、平坦な硬い路面と砂浜の質感をもつ柔らかい路面を提示できる軽量のインターフェイスとして、粒子ジャミングによる可変剛性要素を用

いた路面感覚提示シューズを開発した。粒子ジャミングは粒子を内蔵した袋を真空化することで袋が圧縮され、粒子が凝集して袋が固化する現象で、真空圧を調節することで硬さの調節が可能である。路面感覚提示シューズでは、粒子を入れた袋を靴底に取り付け、これを踏むことで砂浜を歩くような質感を提示する。

2. 粒子ジャミングを利用した路面感覚提示シューズ「ジャミングシューズ」

2.1 原理

粒子のジャミング転移とは、粒子の集まりが、流体のような状態から剛体のような状態に変わる現象である。粒子を詰めた気密性の高く柔らかい袋内部の空気を排出し真空状態にすると袋が固くなり、空気を戻し大気圧状態にすると袋が柔らかくなる。大気圧状態では袋は、伸び、縮み、曲げ、捻り等、自由に変形させることができる。変形した状態で空気を抜き真空状態にすると、変形した状態を保ったまま固くなる。袋の剛性は内部真空圧に比例する。粒子ジャミングを利用した受動要素は柔軟かつ軽量で人間が装着することに適している。満田らは粒子ジャミング転移を利用して身体装着型の力学提示装置を開発した[5]。

2.2 機構

ジャミングシューズは図 1 に示すように、気密性が高く柔らかい塩化ビニル製のボール(厚さ 1mm、直径 38cm、質量 160g、)、発泡スチロールビーズ(直径約 1.5mm、発泡倍率 15 倍、比重 0.066、ヤング率 11Mpa)、シューズカバー(RAIN SHOE COVER、Factshop)、エアチューブ(内径 6mm)で構成されている。シューズカバーはショートブーツ型の履物で、靴を履いたまま装着することができる。ボールに粒子約 3L を入れて、エアチューブを取り付けた。ボール上部にシューズカバーを接着剤で接着

し、固定した。真空状態では真空ポンプが粒子袋内を真空化し、真空状態から大気圧状態に切り替えるときはコンプレッサーから圧縮空気を0.3秒間だけ送ることで早く大気圧状態に切り替えることができた。砂浜の路面感覚を提示するときは、装具を大気圧状態にした。図3に示すように、足を上げると粒子が袋の底に落ちるので何度踏んでも柔らかい感触を得ることができた。硬い平面の路面感覚を提示するときは、ユーザが片足を上げた瞬間に、接地している粒子袋を真空状態にすることで、粒子袋が真空化されるまでの時間を確保した。また、このとき片足に全体重がかかるので袋部分が平らになった。真空化が完了すると平らになった状態で維持されるので硬い平面を提示することができた。

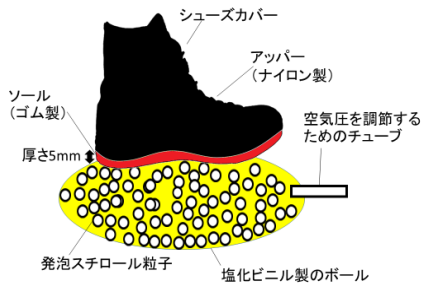


Figure 1 路面シューズの構造



Figure 2 路面シューズの写真

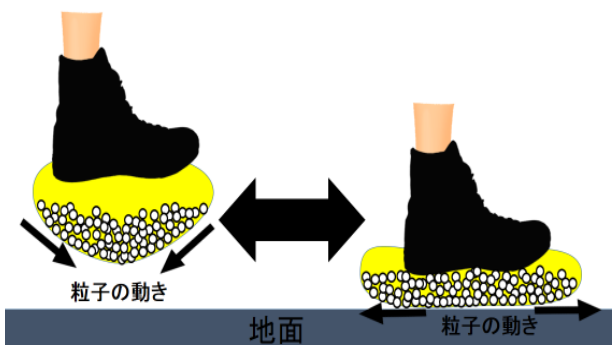


Figure 3 大気圧状態のときの粒子の動き

3. ジャミングシューズの性能評価

3.1 剛性

粒子袋の硬さと気圧の関係について評価実験を行った。実験は被験者1人(大学生,男性,年齢24歳)で行った。実験手順を示す。まず被験者にジャミングシューズを履かせ、粒子袋内部の気圧を0kPaにして硬くて平らな床の上で足

踏みをさせて感触を提示した。その硬さを基準値として評価値1とした。粒子袋内部の気圧を-70kPaにして硬くて平らな床の上で足踏みをさせて感触を提示した。その硬さを基準値として評価値10とした。次に0、-5、-10、-15、-20、-30、-50、-70kPaの中からランダムに1つ選び、粒子袋内部をその気圧にして、被験者に10歩分足踏みをさせて感触を提示した。選んだ気圧は被験者に分からないようにした。語群(図4)の中からその感触に近いものを1つ選んで1~10の評価値をつけてもらった。各気圧が2回提示されるまで繰り返した。結果を表1と図5に示す。気圧を低くすればするほど感じる硬さも増すことがわかった。

①コンクリート	②グラウンドのトラック	③砂利道	④体操マット
⑤泥道	⑥硬めの雪	⑦柔らかめの雪	⑧お風呂マット
⑨砂浜	⑩敷布団	⑪掛け布団	⑫田んぼ
⑬毛足の長いカーペット	⑭その他()		

Figure 4 被験者の選択肢として用意された語群

Table 1 PMC の各真空圧における路面感覚

kPa	0	-5	-10	-15	-20	-30	-50
語群	砂浜	毛足の長いカーペット	敷布団	敷布団	お風呂マット	掛け布団	体操マット
	砂浜	泥道	泥道	泥道	お風呂マット	体操マット	グラウンドのトラック

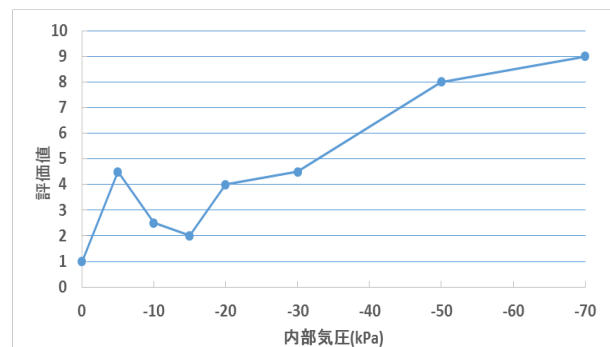


Figure 5 PMC の真空圧と路面の硬さ感覚の関係

4. 海水浴場を歩く感覚を提示するシステム

4.1 システム構成

HMDと装具を着けたユーザがKinect (Kinect for xbox one、Microsoft) のカメラの前で足踏みをすると仮想空間を前進でき、歩く路面によって路面感覚を切り替えるシステムをUnityを用いて開発した。ユーザは両足に装具を履き、Kinectのカメラに対して正面を向いた。最後にHMDを装着した。システムが起動するとユーザの視界に海水浴場の映像が映り、ユーザが砂浜の上にいる状態から始まるようにした。ユーザがその場で足踏みをすると、仮想空間で前進するようにした。ユーザが装具を履いて足踏みをした様子とユーザが見たVR映像を図6に示す。Unity上でユーザが操作するキャラクターの体は不可視のカプセル型になっており、体全体に当たり判定を持っている。体が

どの路面に当たっているかによって装置の内部圧力を変化させた。砂浜を踏んでいるときは大気圧状態にして柔らかくし、木板を踏んでいるときは真空状態にして硬くした。真空状態から大気圧状態にするときは両足の粒子袋を同時に大気圧状態に切り替えた。大気圧状態から真空化するときは、図6左のように片足が接地してもう一方の足が上がっている状態で切り替えた。接地している足の粒子袋のみを真空化し、次の一歩で接地している足を入れ替えたときにもう片方の粒子袋を真空化した。上げる足の膝が接地している足の膝よりも3cm高くなったことを「片足を上げた」と見なし、接地している足の粒子袋を真空化した。こうすることで、接地している足に全体重がかかるため粒子袋が平らになった。



Figure 6 ユーザが装具を履いて足踏みをした様子(左)とユーザが見たVR映像(右)

4.2 装置全体の構成

路面感覚提示装置全体の構成を図7に示す。装具に接続されたエアチューブ(内径 12mm)を空気の通り道とした。3ポート電磁弁 A(VEF3141,SMC)を開閉することでコンプレッサー(PCR3010、フローバル)から粒子袋に圧縮空気を0.3秒間だけ流入して真空状態から早く大気圧状態にした。3ポート電磁弁 B(VEF3141,SMC)を真空ポンプ側と大気流入口に分けた。真空ポンプ(DA-60S、ULVAC)で33Lタンク(SAT-33HB-100,ANEST IWATA)を真空化することで、3ポートバルブの真空ポンプ側が開いたときに粒子袋を速く真空化した。電磁弁はマイコン(Arduino UNO R3、Arduino)で表2のように制御した。

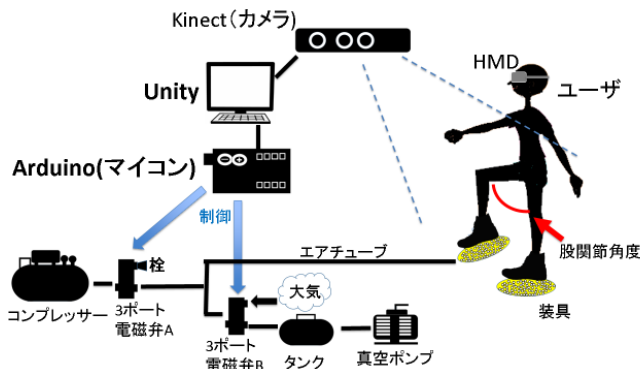


Figure 7 路面感覚提示装置の構成

Table 2 電磁弁の制御

	3ポート電磁弁A		3ポート電磁弁B	
	装具側	栓側	真空ポンプ側	大気側
砂	c bse	c bse	c bse	open
砂→板	c bse	c bse	c bse→open	open→c bse
板	c bse	c bse	open	c bse
板→砂	c bse→open→c bse	c bse	c bse	open

4.3 歩行動作の検出方法

モーションキャプチャとして Kinect を用いた。足踏み中のユーザの股関節角度を読み取り、1/60 秒ごとの変化量から雨宮、八木、塩崎、藤田、渡部らが提案した歩行速度推定法[9]にしたがって歩行速度を算出した。この推定法は各時刻における瞬時値を使用しているため、各時間での歩行速度計算が可能であり、足踏み中の任意の姿勢での停止が可能である。

4.4 被験者によるシステム全体の評価実験

4.4.1 実験方法

作成したジャミングシューズを履いて、足踏みで仮想空間内を移動した場合(条件1)とジャミングシューズを履かず、被験者自身の靴を履いて足踏みで移動した場合(条件2)の実験を行った。条件1のあとに条件2を行った被験者が2人、条件2のあとに条件1を行った被験者が2人の計4人(全員大学生、男性4人、平均年齢23歳)で行った。条件1と条件2の間に1分間の休憩時間を設けた。実験終了後にアンケートを取り、以下の質問にそれぞれ「-3、-2、-1、0、1、2、3」の7段階評価で答えてもらった。評価値の値が大きいほど良い評価である。「問1.木板の感覚があったか」「問2.砂浜の感覚があったか」「問3.木板→砂浜の切り替え時、違和感はなかったか」「問4.砂浜→木板の切り替え時、違和感はなかったか」「問5.装置ありのほうは無しのほうと比べて没入感が増したか」。

条件1では、被験者はHMDを装着し、靴下の上からジャミングシューズを履いた。Kinectのカメラに対して身体の正面を向くように立った状態で実験を開始した。開始時、仮想空間上では被験者は砂浜に立って木の板の方向を向いている状態であった。5m間隔で砂浜と木の板を交互に体験してもらい、被験者がゴール地点につくと終了した。システムを一旦リセットし2周目を行った。2週目も1週目と同じコースを移動させた。図8に移動したコースを示す。

条件2では、被験者はHMDを装着し、ジャミングシューズを履かずに被験者自身の靴を履いた。Kinectのカメラに対して身体の正面を向くように立った状態で実験を開始した。移動したコースは条件1と同じであった。

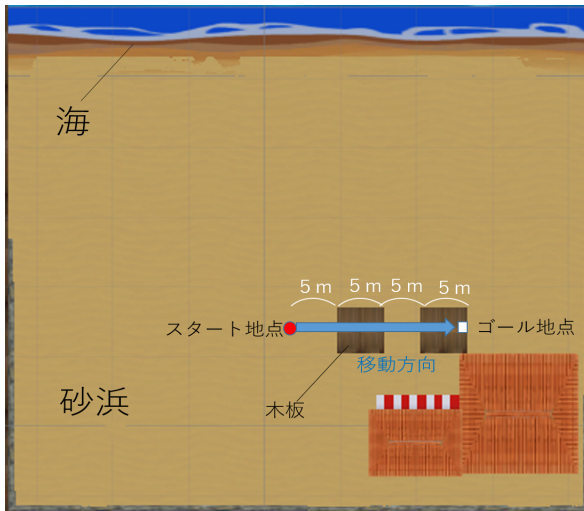


Figure 8 被験者が歩いたコース図

4.4.2 結果と考察

実験結果を図9に示す。4人中3人が全ての設問に対して正の評価をした。1人の被験者のみが問4だけに-1の評価をした。その被験者からは「砂浜から木板に移動するとき、接地している足の周りがギュッと収縮して固まるような感覚があった」という感想をもらった。問4の評価が比較的良かった理由としては、粒子袋内が真空化したときに、粒子間の隙間がなくなって粒子が凝集することで被験者の足が圧迫されたからであると考えられる。問3に対しては「靴底に空気が衝突するような感覚があった」という感想をもらった。粒子袋に圧縮空気が流入する感覚がソールを通して伝わったと考えられる。問1、2、5の評価はいずれも評価値 2.75 以上であることや「砂浜の歩きにくい感覚を体験できた」という被験者の感想から、砂浜と木板の感覚を提示することと没入感を高めることができたと考えられる。

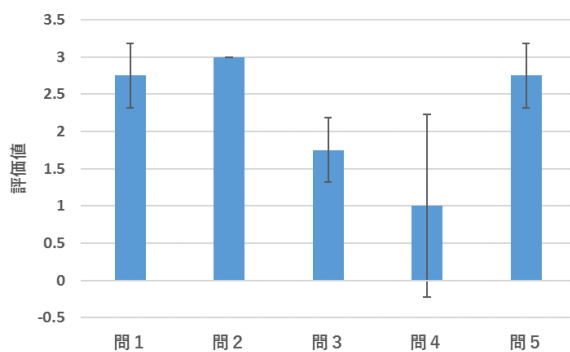


Figure 9 被験者4人の装置に対する評価値の平均(エラーバーは標準偏差) 問1. 木板の感覚があったか」「問2. 砂浜の感覚があったか」「問3. 木板→砂浜の切り替え時、違和感はないか」「問4. 砂浜→木板の切り替え時、違和感はないか」「問5. 装置ありのほうは無しの方と比べて没入感が増したか(エラーバーは標準偏差) 問1. 木板の感覚があったか」「問2. 砂浜の感覚があったか」「問3. 木板→砂浜の切り替え時、違和感はないか」「問4. 砂浜→木板

の切り替え時、違和感はないか」「問5. 装置ありのほうは無しの方と比べて没入感が増したか

5. おわりに

本研究では、ユーザがモーションキャプチャカメラの前で足踏みをすることで仮想空間を前進できるインターフェイスと、粒子ジャミングによる可変剛性要素を用いた路面感覚提示装置を開発した。この装置の課題点としては路面感覚を切り替えときの違和感を失くしきれないことである。圧縮空気が流入するときの勢いを緩衝したり、粒子の圧縮が伝わらないようにシューズカバーの側面と粒子袋の間に緩衝材を設置したりする必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会科研費 18K04064 の助成により実施した。

参考文献

- [1] 野見山 雄太, 矢島 佳澄, 木村 孝基, 山岡 潤一, 鎌田 洋平, 大島 遼, 笈 康明: 川歩き感覚を提示する長靴型触覚デバイス RiverBoots の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 109(466), pp133-134, 2010-03-05.
- [2] Takeuchi : Gilded gait: reshaping the urban experience with augmented footsteps, UIST '10 Proceedings of the 23rd annual ACM Yuichiro symposium on User interface software and technology, pp185-188.
- [3] 岡野 哲大, 日岐 桂吾, 広田 光一, 野嶋 琢也, 北崎 充晃, 池井 寧: 圧覚を用いた足裏への触覚提示に関する研究, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, vol26, 2016.
- [4] Hyunki Son, Inwook Hwang, Tae-Heon Yang, Seungmoon Choi, Sang-Youn Kim : "RealWalk: Haptic Shoes Using Actuated MR Fluid for Walking in VR" ,IEEE World Haptics Conference (WHC), 2019.
- [5] 満田 隆, 久下 幸子, 若林 将人, 川村 貞: 粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力覚提示装置への応用, 計測自動制御学会論文集, vol37, pp1134-1139, 2001.
- [6] 雨宮, 八木, 塩崎, 藤田, 渡部 : 足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol6, no.3, pp221-228, 2001.