

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：17501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560277

研究課題名(和文) 足底面への力触覚提示による歩行リハビリテーションのパラダイムシフトを目指して

研究課題名(英文) For paradigm shift of gait rehabilitation with haptic device for plantar surface

研究代表者

菊池 武士(Kikuchi, Takehito)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：10372137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本申請課題では、(1)足底面の触覚機能の役割等を調査すること、(2)要求仕様を満たす足底面への刺激提示デバイスを開発すること、(3)デバイスを用いた仮想環境歩行システムを開発すること、を目的とした。(1)に関して心理物理実験を実施し、足底面の圧力覚は床面の形状(表面の大雑把な形状と床面自体の傾斜)および硬さ認知に大きく影響していることを示した。(2)に関して、磁性エラストマーを用いたハプティックインタフェースを開発した。(3)に関して、ハプティックインタフェースを用いた仮想環境歩行システムのソフトウェアおよびハードウェアを開発しシステム全体を構築した。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this study are follows; (1) investigations of functions and roles of plantar haptic senses, (2) development of haptic device for sole, and (3) development of virtual walking system with the haptic device. With regard to (1), three different senses of foot were investigated, which are planter pressure on the foot sole, vibration on it and ankle motion of ankle joints. The result showed that the distribution of the plantar pressure is a possible resource to identify the shape, elasticity and tilt angle of the ground. With regard to (2), we developed a haptic control unit by using a magnetic field sensitive elastomer (MSE) as a friction control surface. Experimental results show that the mechanical property of the haptic unit can be modeled with the adjustable friction element. With regard to (3), we developed software and hardware of the virtual walking system with the haptic device.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：歩行リハビリ 足底 バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

従来の理学療法で行われていた手技では、力覚刺激のみでなく、「触覚」刺激(皮膚の表面感覚への入力)も重要かつ効果的であることが知られており、力覚と触覚を同時に提示できる装置がさらなるリハビリ効果の向上に有効である。特に、歩行中には脚部の運動による力覚のみでなく、足底面が地面に接することで生じる触覚が感覚認知や運動制御に大きな影響を与えることが知られている。歩行リハビリテーションにおいてそのような複合的な刺激提示デバイスは実現されていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、下記を目的にした

- (1) 足底面の触覚機能の役割等を調査し、これらを刺激するデバイスの仕様や制御方法を決定すること
- (2) 上記の要求仕様を満たす足底面への刺激提示デバイスを開発すること
- (3) 上記デバイスを用いた仮想環境歩行システムを開発すること

3. 研究の方法

(1) 足底面の触覚機能の役割調査

(1-1) 感覚遮断による調査

ヒト足部の3つの感覚入力として、足底面への圧力覚(Plantar pressure)、足底面への振動覚(Vibration on sole)、足関節の運動覚(Ankle motion)を取り上げ、それらが外部環境(床面形状や硬さ)の認識にどのように寄与しているのかを調査した。

被験者はヘッドマウントディスプレイを装着し、視覚と聴覚を遮断された。被験者は安定した台の上に座り、静止した状態から足底面に様々な床面を押し当てられる。床面素材としては、形状の異なるサンプル3種類(ドットタイプの点字ブロック、バータイプの点字ブロック、フラット)と硬さの異なるサンプル4種(合板:厚さ 16.3 mm、弾性率 40 MPa、ジョイントタイル(合板+EVA 発泡樹脂):厚さ 9.2 mm、弾性率 9 MPa、EVA 発泡マット:厚さ 10.6 mm、弾性率 0.9 MPa、カーペット:厚さ 5.8 mm、弾性率 0.5 MPa)が選定された。この二つのグループについて試験し、被験者はそれぞれのグループの内、どのサンプルが押し付けられたかを与えられた感覚のみで言い当てることを要求される。

サンプルは、オフィスチェアで使用されている空気ばねを使用して一定の荷重で押し上げられた。被験者に足底板のみを有するプラスチック装具を履かせ、足底面の圧力分布を遮断した場合を足底面圧力遮断と定義する。また、足関節まで固定するプラスチック装具を装着させ、前述の圧力分布に加えて足関節の運動を遮断した場合を圧力および関節運動遮断と定義する。さらに、サンプル押しつけ時に、初めから足部をサンプルに接触させた状態で足部とサンプルの衝突による

振動を低減させた場合を振動遮断と定義する。これらの遮断パターンのいずれか、もしくは組み合わせによって表1のような遮断パターンを定義し、それぞれの遮断パターンに対して試験を行った。表の×印は遮断を示す。被験者は健常男性10名(22才~24才)である。

表1. 感覚遮断のパターン

	a	b	c	d	e	f
Plantar pressure	×	○	×	×	×	○
Vibration on sole	○	×	○	×	×	○
Ankle motion	○	○	×	○	×	○

(1-2) 圧力提示時間による調査

足底面への圧力提示時間が床面の認知に与える影響について調べるため、ソレノイドを用いて刺激の提示時間を調整し、この時の感覚認知の違いを官能試験により調査した。ドットタイプの点字ブロックの一つの凸部を切り出し、ソレノイドの先端に張り付けたソレノイドへの電流入力時間に対する応答特性を事前に調査し、ヒト足部に圧力を提示する時間を0.1秒の精度で求めた。

1秒を標準刺激として提示し、次に0.1, 0.4, 0.7, 4.0, 7.0, 10秒の6つの刺激をランダムに提示した。マグニチュード推定法を用い、標準刺激に対する各刺激の量を5つの項目(時間の長さ、鋭さ、硬さ、押される力の強さ、温かさ)で解答させた。被験者は健常男性6名(22才~23才)である。

(1-3) 圧力提示時間による調査

(1-1)と同様の方法によって異なる傾斜角度サンプル(0度, 5度, 10度, 20度)の知覚試験を実施した。被験者は健常男性7名(21才~24才)である。

(2) 足底面への刺激提示デバイスの開発

磁性エラストマー(Magnetic-field sensitive elastomer(以下 MSE))を用いたハプティックインタフェースの基本構造として図1に示す4種類の構造を提案した。Type Aは、MSEを圧力提示部の直下に配置し、その弾性率変化を利用するものである。Type Bは、MSEの磁場方向に伸びる特性を応用し、圧力提示部の側面に配置することによって摩擦力を制御するものである。さらに、Type Iは、MSEへの磁場印可時の磁束の方向が圧力提示方向と垂直な場合、Type IIは、それが水平な場合である。

Type AIとAIIはいずれも磁場を印加することによってMSEの弾性率が向上する。例えば、複数のユニットを同一平面に並べ、場所によって弾性率を変化させることで荷重に対する圧力分布を制御する。Type BIとBIIも同様の使い方が可能であるが、これらはいずれもMSEのPinへの接触摩擦力を調整するものである。さらに、Type BIとBIIでは

逆応答のデバイスを実現することができる。我々は既報において A 型デバイスの試作を行い、その特性を評価した。弾性率の明確な変化を確認することができたが、触覚提示として十分な変形量を確保するためには MSE が厚くなり均一で十分な磁場を印加することが困難となりうるということが分かった。そこで Type BI デバイスを試作し、その特性を評価した。

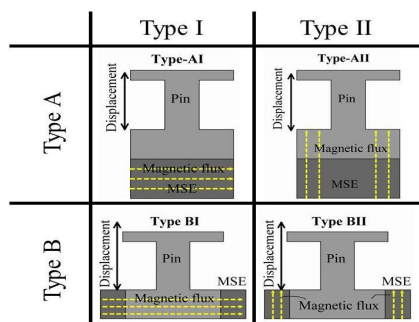


図 1 . M S E デバイスのタイプ

(3) 仮想環境歩行システムの開発

仮想環境歩行システムのグラフィックおよび外部機器を制御するためのフレームワーク(図2)を提案した。本フレームワークはオープンソースのデジタルマップ(OpenStreetMap), 市販のいくつかの3D-CGソフトウェア(CityEngine, 3dsMAX, Metasequoia, and Texture Packer), および DirectX をベースとした自作のソフトウェアからなる。

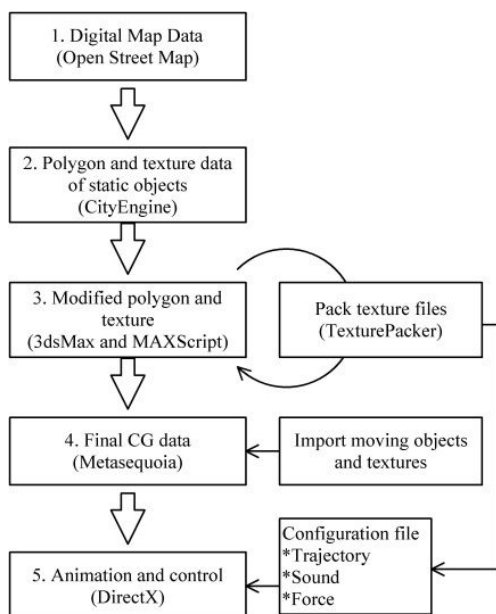


図 2 . 仮想歩行システムのフレームワーク

4. 研究成果

(1) 足底面の触覚機能の役割調査

(1-1) 感覚遮断による調査

各遮断パターン同士の結果を比較するため、Friedman の検定と Steel-Dwass の多重比較法

により p 値を求め、有意水準 5%以下として有意差を調べた。床形状については、障害パターン b および f がその他のパターンと比較して多くの場合有意差が確認された。床素材については、障害パターン b が合板とジョイントタイルの一部の条件に対してその他のパターンと有意差が確認されたが、発泡マット、カーペットでは確認されなかった。

実験結果より、床面形状の認知に対して圧力覚が大きく影響しており、その他の感覚入力ほとんど影響していないことがわかる。また、床の硬さに対する認知に関しても圧覚が一部影響していることも考えられる。発泡マットとカーペットでは弾性率が近かったため違いを知覚できなかったものと考えられる。

(1-2) 圧力提示時間による調査

Kruskal-Wallis 検定と Steel-Dwass の多重比較法により p 値を求め、有意水準 5%以下として有意差を調べた。時間の長さや鋭さについての質問のみで有意差が見られた。

時間の長さについては、基準刺激 1 秒を境にして大小の評価ができていた。ただし、基準刺激 1 秒よりも短いグループ同士、もしくは長いグループ同士では有意差はない。これは、刺激時間 1 秒を境にして異なる皮膚受容器(速順応型と遅順応型)が支配的であり、異なる受容器の応答に対しては異なる知覚を得やすく、同じタイプの受容器に対して異なる時間の刺激が加えられても知覚の変化として意識され難いことを意味している。

鋭さに関する評価でも一部で有意差が見られることは興味深い。提示時間の変化が接触面積の変化として認識され、結果として鋭さの違いとして評価された可能性がある。

(1-3) 圧力提示時間による調査

Friedman の検定と Steel-Dwass の多重比較法により p 値を求め、有意水準 5%以下として有意差を調べた。傾斜 0 度では圧力覚遮断に対して、傾斜 5 度、10 度では足関節の運動覚遮断に対して有意差が確認された。

実験結果より傾斜の有無に関しては足底面の圧力覚が影響しており、傾斜角度の認識には足関節の運動覚が影響していることが考えられる。傾斜 20 度では有意差が見られなかったが、傾斜度が大きいと脚部の感覚入力の影響が大きくなるためと考えられる。

(2) 足底面への刺激提示デバイスの開発

B 型のユニット(図3)の提示可能反力を測定した。試験はフォースゲージとピンの初期接触点を原点とし、0.5 mm ずつ最大 5mm まで圧縮した。MSE の厚さとの関係を調査するため、厚さ 0.1mm (Case1), 0.2mm (Case2), 0.3mm (Case3), 0.4mm (Case4), 0.5mm (Case5), 1.0mm (Case6) のものを用意した。それぞれの厚さに対して磁路のギャップも同様に調

整した。

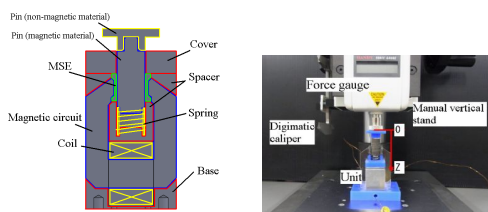


図3 MSEを用いたハプティックデバイスと評価試験の様子

測定結果より、MSEの厚さが小さいものほど大きな反力を示した。これは、MSEの厚さが小さい程MSE内の磁束密度が上昇し、MSEのピンへの磁気吸引力が向上した結果だと思われる。

足踏みハプティックデバイスとしてB型のユニットを複数組み合わせ配置し、複数のピンで足裏に反力を提示するデバイスを製作した(図4)。図はアルミ製フレームに上記ユニットを5列5行の25個を配置したもので、おおよそ前足部への圧力提示を可能とする大きさとなった。一つのユニットの圧力提示部位は20×20mmの正方形である。提示部位同士の間隔は31mmである。デバイスの最大変位は5mmとなっている。

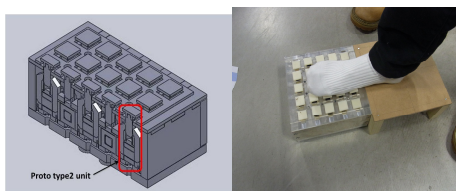


図4 足踏みハプティックデバイス

(3) 仮想環境歩行システムの開発

図2のフレームワークを構築し、仮想都市開発ソフトウェアを開発した。これにより、簡易にCGデータが作成可能となり様々な環境での散歩が室内にいながらにして可能となる。図4の足踏みハプティックデバイスと仮想環境データの連動によって仮想歩行を実現した。これらのシステムが高齢者、障害者のQOLの向上等の一助になることを期待して研究を継続している。



図5 仮想環境歩行システム

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Takehito Kikuchi, Kohei Sakai, Kohei Ishiya, Gait analysis for automatic speed-controlled treadmill, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.27 No.5. pp.528-534 (2015.10)(査読あり)

菊池武士, 機能性材料を用いた福祉機器の開発, 第23回大分県リハビリテーション医学会誌, pp.22-27 (2014.10)(査読あり)

菊池武士, (解説)MR流体のロボティクス・メカトロニクスへの応用方法, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.5, pp.23-26 (2013.6)(査読なし)

〔学会発表〕(計10件)

藤井祐輔, 菊池武士, 藤井智恵子, 松川真弓, 大石愛美, 安部真由, 國廣功, 吉永充伸, 植木志保, 吉村高, 重症心身障がい児・者が寝たきり状態でも楽しめるバーチャルリアリティ歩行システムの開発のための基礎研究, 日本機械学会2016年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, in press (2016.6)(パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市)

森啓介, 阿部功, 菊池武士, VR自転車システムの臨場感の向上とその評価に関する研究, 日本機械学会2015年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集(DVD), 2A2-102 (2015.5)(みやこメッセ, 京都府京都市)

Takehito Kikuchi, Framework and Software to Build Large Scale Digital City for Virtual Walking / Cycling System, Proceedings of 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.33-36 (2014.10)(東京ビックサイト, 東京都江東区)

森啓介, 菊池武士, VR自転車を用いた心理的負担・危険認識の評価に関する基礎研究, 2014年日本機械学会九州支部大分講演会予稿集, 3F3 (2014.9)(ホルトホール, 大分県大分市)

菊池武士, 酒井紘平, 仮想空間ウォーキング・サイクリングシステムのためのソフトウェア構築と応用, 日本機械学会2014年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集(DVD), 1P1-A04 (2014.5)(富山国際会議場, 富山県富山市)

酒井紘平, 菊池武士, 自動速度調節トレッドミルによる歩行分析の基礎研究, 日本機械学会2014年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集(DVD), 1A1-A02 (2014.5)(富山国際会議場, 富山県富山市)

Takehito Kikuchi, Contribution of

senses of foot for identification of shape, elasticity and tilt angle of ground, Proceedings of the 23th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2013), no.16, (2013.12) (日本科学未来館, 東京都江東区)

菊池武士, 酒井紘平, 仮想空間歩行・自転車走行システムのためのソフトウェア日本機械学会九州支部第 67 期講演会, 906 (2014.3) (九州工業大学, 福岡県北九州市)

酒井紘平, 菊池武士, 障害者向け自動速度調節トレッドミルの歩行分析・安全装置日本機械学会九州支部第 67 期講演会, 310 (2014.3) (九州工業大学, 福岡県北九州市)

菊池 武士, 足底面圧力による傾斜感提示のための基礎的検討, 第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.146-149 (2013.9) (グランフロント大阪, 大阪府大阪市)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 歩行訓練用安全装置
発明者: 菊池武士, 酒井紘平
権利者: 大分大学
種類: 特許
番号: 2014-049237
出願年月日: 2014.3.12
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://www2.hwe.oita-u.ac.jp/kikuchilab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 武士 (KIKUCHI Takehito)
大分大学・工学部・准教授
研究者番号: 10372137