磁性エラストマーを用いた力触覚提示デバイス(MSED)に関する研究

Study on Magnetic-field Sensitive Elastomer Device (MSED)

○増田 恭伸, 正 菊池 武士, 小林 慧吾, 三俣 哲, 大堀 優 (山形大)

Yasunobu MASUDA, Keigo KOBAYASHI, Takehito KIKUCHI,
Tetsu MITSUMATA and Suguru OHORI (Yamagata University)

Magnetic-field sensitive elastomer (MSE) is a compound of the magnetic materials and a non-magnetic elastomer. This elastomer has a feature in which the viscoelasticity can be adjusted with the external magnetic field. In this study a haptic controllable device for the sole feet with the MSE have been development. First, The material tests and the sensory evaluations of MSE is experimented. In the material tests of MSE, the difference of the elastic variation according to the thickness and the efficiency of haptics in the sensory evaluation is researched. Finally, as a device to control the magnetic field the electromagnet is designed. For the future work, the virtual simulation of the haptics application during the walking motion in different ground will be made.

Key word : Magnetic-field sensitive elastomer, haptics, virtual reality, walking simulator

1. 緒言

力触覚提示システムに関する研究はこれまで振動モーター[1]や空気圧[2]などを使用することで進められてきたが, その多くは指や手に対してであり, 足底に対しての力触覚提示システムは数少ない. そこで本研究の目的は, 磁性エラストマーを使用した足底に対しての力触覚提示デバイスを開発し, さらにVR空間と連動させるで力触覚を提示する歩行シミュレータを開発することである. 磁性エラストマー(Magnetic-field sensitive elastomer(以下 MSE))とは近年開発された新しい機能性材料の一種である. この材料は非磁性のエラストマーに磁性材料を混合した混合物であり, 外部磁場によってその粘弾性を調整することができる. 従来の MSE はその弾性率変化がせいぜい数倍であったが, 近年, 大堀, 三俣ら[3]は最大で240倍のせん断弾性率変化を示すMSEを開発しており, 振動制御, スマート構造, ハプティックデバイス等, 実用的な研究課題への応用が期待されている. そこで今回は MSE の基礎的検討として, 材料試験と官能試験を実施した. また, 磁場制御装置として電磁石の設計を行った.

2. MSE

本研究で使用した MSE 作製のため, ポリオールに触媒とジオシアンートを添加し, 磁性微粒子であるカルボニル鉄を分散させた. 仕込みの磁性微粒子濃度は 70wt.%である. これを鋳型に流し込み 100℃で2時間半硬化させることで作製した[3].

3. 材料試験

3.1 実験方法

磁場の強度や方向による MSE の弾性変化を調査するために材料試験機による圧縮試験を実施した. 図1に示すように, 材料試験機(AIKOH ENGINEERING, MODEL-1840, maximum range of load cell:500N)に特性の圧縮治具(直径:6.5mm)を装着し, MSE を圧縮した時の変位と荷重を測定する. 磁場の発生源としてネオジウム磁石(直径:20mm, 高さ:10mm, 表面磁束密度:0.435T, 飽和磁束密度:1.25T, 保磁力:907kA/m)を用意し, アクリル板に表面が平らになるように埋め込んだ(図2). 材料試験は MSE の厚さによる試験と磁場の方向による試験を実施した.

Fig. 1 Testing machine

Fig. 2 Neodymium magnet

MSE の厚さによる試験では, 厚さ 10mm(Case1)と 5mm(Case2)の MSE を用意し, 磁場の有無による特性の違いを評価した. 磁場ありの場合では, ネオジウム磁石を 1 個使用し, 図3の3カ所で試験を実施した. 磁場なしの場合はネオジウム磁石の埋め込まれていないアクリル板に MSE を乗せ, 試験を実施した.

Fig. 3 Method of material tests

磁場の方向による試験では、磁場方向を垂直(Case3)と水平(Case4)とするために図 4 のようにネオジウム磁石を配置し、それぞれの特性の違いを評価した。MSE は厚さ 10mm を使用。MSE と磁石の間にスペーサーを 0~3mm 挟み、測定箇所は磁場垂直方向では磁石中心位置、水平方向では磁石間の中心位置として荷重と変位を計測した。

Fig. 4 Material tests for Case3 and Case4

3.2 MSE の厚さによる試験結果および考察

Case1 に対する実験結果を図 5 に、Case2 に対する実験結果を図 6 に示す。横軸は変位[m]を試料の平均初期厚さ[m]で割ってひずみに換算した値[-]、縦軸は荷重[N]を圧子の断面積[m²]で割って応力に換算した値[kPa]である。Case1 の場合、磁石中心位置から離れるに従い応力が低下する。一方、Case2 では磁石中心位置よりも磁石中心位置から 10mm 離れた位置のほうが応力が高い。この結果を考察するため、有限要素解析の静磁場解析により磁束密度分布を求めた。解析ソフトとして ANSYS Workbench Ver.12(ANSYS Inc.)を使用し、MSE の材料特性として図 7 の B-H カーブデータを使用した。Case1 に対する解析結果を図 8 に、Case2 に対する解析結果を図 9 に示す。Case1 は中心に向かい磁束密度が高く、山なり状に分布している。それに対して Case2 は高磁束密度の分布が広く、中心付近よりも外側に集中している。この結果から、磁束密度の高い部分が最も応力も高くなると考えられる。

Fig. 5 SS-curves of Case1 (thickness:10mm)

Fig. 6 SS-curves of Case2 (thickness:5mm)

Fig. 7 B-H curve of the MSE

Fig. 8 Result of magnetostatic analysis for Case1

Fig. 9 Result of magnetostatic analysis for Case2

3.3 磁場方向による試験結果および考察

Case3 に対する実験結果を図 10 に、Case4 に対する実験結果を図 11 に示す。Case3 と Case4 どちらもスペーサーを挟むほど応力は低下するが、Case4 ではスペーサーの有無による

応力の差は小さい。また、磁場解析より平均磁束密度を求めた結果を表 1 に示す。尚、表の同じ色は平均磁束密度のほぼ同じものを示している。平均磁束密度のほぼ同じものの応力-ひずみ線図を比較すると、垂直方向と水平方向で応力の差はあまり見られない。このことから、磁場方向による弾性変化の違いはそれほどないと考えられる。

Fig. 10 SS-curves of Case3

Fig. 11 SS-curves of Case4

Table. 1 Average of magnetic flux density

Direction of magnetic field	Average of magnetic flux density[T]	
	Vertical	Horizontal
Non-spacer	0.381	0.302
Spacer 1mm	0.314	0.292
Spacer 2mm		
Spacer 3mm		

4. 官能試験

4.1 実験方法

MSE の力触覚提示性能を評価するために官能試験を実施した。官能試験は MSE の厚さによる試験と接触部位による試験を行った。

MSE の厚さによる試験の実験方法は、磁石上(a)とアクリルプレート上(b)に置かれた MSE をそれぞれ交互に押し、どちらが硬く感じるかを答えるものとした(図 12)。MSE は厚さ 10mm(Case1)と 5mm(Case2)を使用し、接触部位は人差し指とかかとでそれぞれ行った。磁場の発生には材料試験で使用したネオジウム磁石を 1 個準備し、図 2 のようにして使用した。被験者は健康な男性学生 5 人(22~23 歳)とし、アイマスク着用で視覚による情報は無い。上記の(a)と(b)で 1 セットと

して、(a)と(b)の順番は 1 セットごとにランダムに設定して 13 セット実施した。

Fig. 12 Method of sensory evaluation

接触部位による試験の実験方法は、前足部とかかと部にそれぞれ MSE を置き、その片方の MSE の下に磁石を配置し、どちらの MSE が硬く感じるかを答えるものとした。磁石を前足部に配置した場合を Case5、かかと部に配置した場合を Case6 とする(図 13)。MSE の厚さは両方とも 10mm、ネオジウム磁石はこれまでと同じものを 2 個使用し、それぞれの表面が N, S 極となるようにしてアクリルプレートに埋め込んだ。また、2 つの磁石の間隔は中心間距離 30mm である。被験者は健康な男子学生 5 人(22~23 歳)である。Case5 と Case6 の順番をランダムにそれぞれ 13 セットとなるよう計 26 セットで実施した。

Fig. 13 Sensory evaluation for foot

4.2 検定方法

「磁場の有無による力触覚変化を知覚できるか」を χ^2 検定法により確認する。帰無仮説(H_0)を「磁場の有無による力触覚変化はない」として、この仮説が棄却できるかどうかを考える。この帰無仮説における試行の発生確率は成功確率(p)が 0.5、失敗確率($q=1-p$)が 0.5 の二項分布に従う。以下のように置き換えることができる。

$$H_0 : p = 0.5 \quad (1)$$

今回、試行の回数が 10 を超えているために近似的に 1 自由度の χ^2 分布を使用する。全試行回数を $n(=13)$ 、期待値を $e(=n \times p=6.5)$ 、成功回数 s とした時の χ^2 値は次式で計算できる。

$$\chi^2 = \frac{(s-e)^2}{e} + \frac{((n-s)-e)^2}{e} \quad (2)$$

上記の式から求めた χ^2 値を表 2 に示す。1 自由度の χ^2 分布表を確認すると、5%の有意水準に対して帰無仮説を棄却するには 3.84 以上の χ^2 値(s が 11 以上)を必要とする。

Table. 2 Chi square values of this test

s	χ^2
0	13.0
1	9.31
2	6.23
3	3.77
4	1.92
5	0.692
6	0.0769
7	0.0769
8	0.692
9	1.92
10	3.77
11	6.23
12	9.31
13	13.0

4.3 MSE の厚さによる試験結果および考察

試験結果を表 3, 4 に示す。表 3 は人差し指による結果、表 4 はかかとによる結果である。前述の統計結果より、表の水色の部分(11 以上)は有意水準 5% で知覚できた結果である。また、A~E は被験者である。

人差し指では MSE の厚さ 5mm よりも 10mm のほうが硬さ変化を知覚できている。一方、かかとでは MSE の厚さ 10mm で 1 人しか知覚できていない。足底において、接触部位 1 箇所では硬さ変化を知覚することは難しいと考えられる。

Table. 3 Result of sensory evaluation(finger)

Subject	A	B	C	D	E
Case1	13	13	12	12	13
Case2	12	13	4	13	2

Table. 4 Result of sensory evaluation(heel)

Subject	A	B	C	D	E
Case1	11	10	7	10	8
Case2	10	10	5	3	10

4.4 接触部位による試験結果および考察

試験結果を表 5 に示す。前足とかかとに MSE を置くことで硬さ変化を知覚できている。このことから、2 つの MSE の相対的な硬さの違いにより判断できていると考えられる。

Table. 5 Result of sensory evaluation(foot)

Subject	A	B	C	D	E
Case5	13	11	13	12	10
Case6	11	11	11	8	13

5. 電磁石装置および歩行シミュレーション

磁場を制御する装置として電磁石を開発した。図 14 のように、前足部とかかと部に電磁石を設置する。図 15 は電磁石の断面図(CAD によるモデル)であり、コの字型につめをつけた鉄芯にコイルを 2 つ取り付けた。コイルは直径 0.4mm の導線を 840 巻きにしたものである。また、電磁石による MSE 内の磁束密度分布を磁場解析によって求めた(図 16)。解析結果は電流値 1A であり、本研究で使用したネオジウム磁石よりも大きな磁束密度を得られることを確認した。

Fig. 14 Device of Electromagnets

Fig. 15 Electromagnet

Fig. 16 Analysis for Electromagnet

歩行シミュレータは、足踏み型インタフェースとしてパナソニック Wii ボードTM(任天堂株式会社)を使用する。図 17 のように、Wii ボードに電磁石装置を乗せたものが全体の構造となる。システムとしては、電磁石は DA ボード、電流アンプを介して制御を行い、Wii ボードは Bluetooth により通信を行う。

Fig. 17 Wiiboard and devices of electromagnets

6. 結言

本研究は MSE を使用した足裏に対しての力触覚提示デバイスおよび歩行シミュレータの開発を目的とし、本稿では MSE の基礎的検討として材料試験と官能試験を行った。官能試験では、かかとのみで MSE の硬さ変化を知覚することは困難であるが、前足とかかとの両方に MSE を配置することで知覚できることを確認した。また、磁場制御装置として電磁石の開発を行い、解析により高磁束密度を得られることを確認した。今後の課題として、開発した電磁石装置を用いた官能試験と、プログラミングによる VR 空間の製作を行う。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省による若手研究者の自立的な研究環境整備促進プログラム(山形大学)、および財団法人科学応用研究財団平成 22 年度調査研究助成の補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- [1] 飯尾裕一郎, 橋本直己, 佐藤誠, "力覚と触覚の組み合わせによる接触感提示に関する検討", 電子情報通信学会, pp.25-29, 2007
- [2] 田中豊, 山内久幸, 雨宮賢一, "空気圧を用いた装着型力触覚提示装置", 山梨講演会講演論文集, pp.171-172, 2001.
- [3] 大堀優, 三俣哲, 山本憲, 法上, "ポリウレタン磁性エラストマーの巨大磁気粘弾性効果", 第 59 回高分子討論会予稿集, 59, 3868(2010).