

リニア振動アクチュエータを用いた方向提示デバイスの開発

鈴木 隆史^{*1} 曲谷 一成^{*2}

Development of the Navigation Device Using Liner Oscillatory Actuators

by

Takashi SUZUKI^{*1} and Kazushige MAGATANI^{*2}

(Received on Oct. 5, 2016 and accepted on Jan. 12, 2017)

Abstract

The objective of this study is to develop a device which gives a pulling sensation for the disabled. Various haptic devices for the visually impaired have been developed over the years. We consider that it is necessary to develop a simple device which provides a high fidelity haptic sense for the visually impaired. In addition, we have developed an electromyogram (EMG) prosthetic hand. To enable physically handicapped people to accurately control this hand, the developed device is also designed to feed back the haptic sense of the hand. This study aims to develop and evaluate such a device, which enables a pulling sensation in a specified direction to be felt. The device consists of four stack linear oscillatory actuators on each of the three axes (X-axis, Y-axis, Z-axis). The linear oscillatory actuators generate linear reciprocating motion from the internal moving magnet. We produced a pulling sensation in a specified direction by driving the magnet of the actuators using a driving pulse with a sharp rise and slow decay. These actuators are mounted on an acrylic base plate which was embedded in a resin sphere with a diameter of 50 mm. Angles in to be displayed are transformed to spherical polar coordinates in our device. The microprocessor produces pulse signals based on the spherical polar coordinates. These pulse signals drive 12 actuators. We evaluated the device with a three-axis acceleration sensor. The results of the evaluation clearly confirmed a pulling sensation in an arbitrary direction. In the future, it will be possible to guide the visually-impaired in arbitrary directions and to feed back the haptic sense of the EMG prosthetic hand.

Keywords: Haptic device, Liner oscillatory actuator, EMG

1. まえがき

近年、触覚提示によって直感的に周囲の状況を被験者に伝える研究が行われてきた^{1)~9)}。

視覚障害者が在宅時に活用するナビゲーションシステム、あるいは、近年急速に広まりつつある Virtual Reality に用いるフィードバックシステムへの導入を目的とした、シンプルで高度な触覚提示が行えるデバイスの開発が必要である。

ナビゲーションに最適な触覚提示方法として、仮想的な牽引力の提示がある。雨宮らは加速度に対する知覚の非線形性利用により^{2), 3), 4)}、また、塚田らは振動感覚の提示により⁵⁾、國安らは直接ベルト駆動により⁶⁾仮想的な牽引力を提示するための手法を提案している。しかし、これらにはそれぞれ、構造が複雑であり、さらに堅牢性や経済性に乏しく、実用化が難しいという課題がある。そこで我々は、直感的で高度な触覚提示を行いつつも、上記の課題を解決し、低いコストで製作できるデバイス

の開発を目指してきた^{7), 8), 9)}。

本研究では、12個のリニア振動アクチュエータを用い、任意の方向に振動を発生させ、振動方向を被験者の指先に提示する方向提示デバイスを開発している。このデバイスは、極座標系における2つの角度である方位角 θ 、仰俯角 ϕ を入力すると、指定した方位角に仮想的な牽引力を発生させることができ、さらに被験者に対して任意の振動パターンを与えることで、牽引力以外の高度な触覚の提示を可能とするものである。

また本研究室では、これまでに EMG を利用した筋電義手の開発を行ってきた。今回開発した方向提示デバイスは、筋電義手を操作する際の高度な触覚フィードバック装置として用いることも目標としている。

2. リニア振動アクチュエータ

2.1 リニア振動アクチュエータの構造

*1 工学研究科電気電子システム工学専攻修士課程

*2 工学部電気電子工学科教授

任意の方向に振動を発生させるため、日本電産コパル株式会社製のリニア振動アクチュエータ LD14-002 を採用した。リニア振動アクチュエータは、Fig.1 に示す構造を有する本デバイスにおける振動の発生源である。厚さの薄い直方体の長手方向に 2 本のシャフトが貫いており、このシャフトに沿って可動するように錘となる磁石がシャフトに巻かれたパネによって吊られている。磁石と相対して直方体の一面にコイルが固定されており、このコイルに間欠電流を流すことで、錘となる磁石が長手方向に往復直線運動を行う。

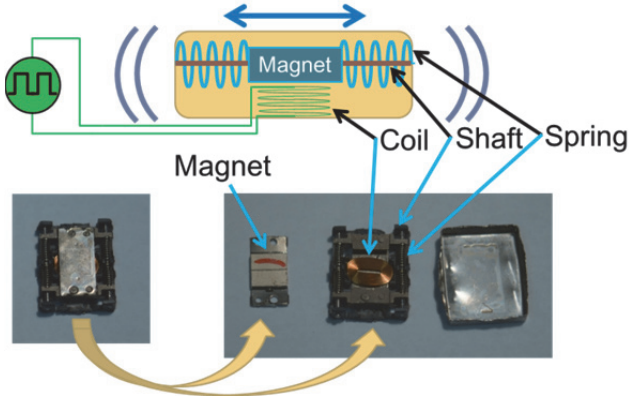
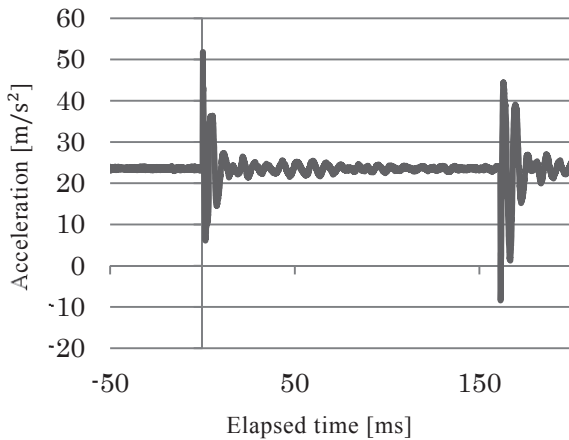
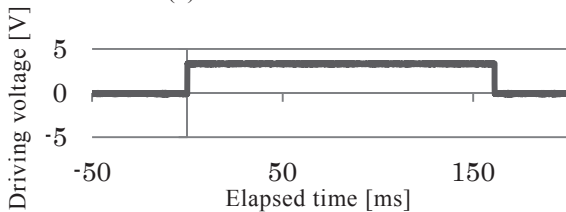


Fig.1 A structure of linear oscillatory actuator.

2.2 牽引力提示



(a) Acceleration waveform.



(b) Driving waveform

Fig.2 Generated acceleration using square wave.

牽引力の提示には、加速度に対する知覚の非線形性を利用する。本デバイスは、往復運動により振動を起こすことを目的としたデバイスであるリニア振動アクチュエ

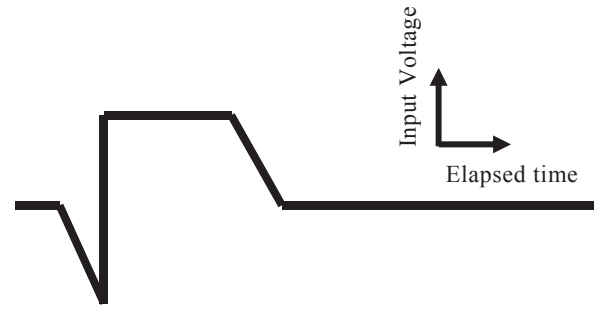


Fig.3 Driving waveform in our system.

ータを用いる。このため振動子となる錘の質量は小さく、この錘の移動に伴う反力をそのまま牽引力とするには、無理がある。そのため我々は、知覚の非線形性を利用する必要があると考えた。この知覚の非線形性とは、方向提示デバイスの正方向の加速度の絶対値の最大値と負方向の加速度の最大値とが異なり、最大値が大きい方向の加速度をもつ時間が、最大値が小さい方向の加速度をもつ時間よりも短い場合、方向提示デバイスを把持している被験者は、この呈示方向への擬似的な力覚(並進力覚)を知覚することを示す¹⁰⁾。

本研究では、正方向への加速度の絶対値を負方向よりも大きくするアプローチとして、リニア振動アクチュエータの駆動波形の傾きに変化をつける方法を採用した。

Fig.2(a)(b)に示すように、リニア振動アクチュエータに方形波を入力すると、方形波の立ち上がり時は、正方向への加速度の絶対値が負方向よりも大きくなる特性がある。一方で入力方形波の立ち下がり時は、負方向への加速度の絶対値が正方向よりも大きくなる。この負方向への加速度を抑えるため、駆動方形波の立ち下がり意図的に傾きをつけ、時間をかけて入力電圧を下げるようにした。この入力信号波形を Fig.3 に示す。錘となる磁石を正方向へ移動させるときに駆動波形が急峻に立ち上がり、直流電圧が印加され、錘が逆方向へ移動するときも直流電圧を印加し続けたのち、徐々に直流電圧を低下させて電圧の印加を終える。

この駆動波形は、マイクロコントローラで生成し、8bit の R-2R 型 D/A コンバータでアナログ波形に変換され、ワンチップの D 級パワーアンプへ入力される。D 級パワーアンプの出力にリニア振動アクチュエータを接続し、指定方向への加速度提示を行うシステムを製作した。このシステムブロック図を Fig.4 に示す。

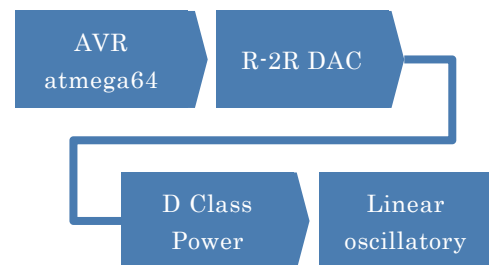


Fig.4 A block diagram of the actuator driving system.

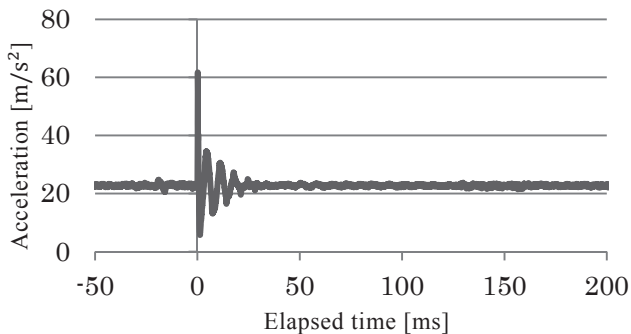
3. 牽引力の提示

3.1 提示実験

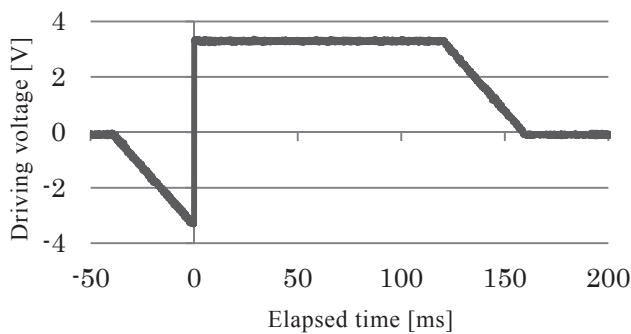
先に説明した駆動波形を用い、1 個のリニア振動アクチュエータを駆動した。リニア振動アクチュエータの上部に絶縁テープで加速度センサを固定し、提示方向の加速度をオシロスコープで計測した。また、加速度波形を積分することにより変位波形を導いた。

3.2 実験結果及び考察

Fig.5 に牽引力提示実験の結果を示す。Fig.5(a)が加速度波形で、Fig.5(b)が駆動波形である。横軸は、駆動波形の立ち上がり時間を 0[ms]として表示している。縦軸は、加速度波形においては加速度[m/s²]、駆動波形においては電圧 [V] を示す。Fig.5(a)より、正方向の加速度が負方向の加速度の 2 倍となっており、知覚の非線形性を利用するために必要となる駆動が行えていることが確認できる。しかし、加速度の提示時間が著しく短く、加速度の大きさが 62(m/s²)と雨宮ら²⁾の“ぶるなび3”と比較して小さいため、複数のアクチュエータを平行に動作させ、加速度の大きさをより大きくする必要があると考えた。この考えに基づき、開発した方向提示デバイスでは、1 軸につき 4 個のリニア振動アクチュエータをスタックし、アクチュエータの数で加速度の大きさを補う方法を採用した。



(a) Acceleration waveform



(b) Driving waveform

Fig.5 Generated acceleration using the pulse with sharp rise and slow decay.

4. 方向提示デバイス

4.1 デバイスの構造

本デバイスは、前述のリニア振動アクチュエータを 12 個用いて構成した。極座標系における X 軸、Y 軸、Z 軸に沿うように、リニア振動アクチュエータを各軸につき 4 個ずつ配置している。その構造は、Fig.6 に示す通りである。

具体的には、円形のアクリル板上にリニア振動アクチュエータを接着してデバイスの骨格を作成した。これをレジンで固めて、直径 5cm の球状方向提示デバイスとした。これを Fig.7 に示す。

リニア振動アクチュエータは、密閉構造ではないため、レジンが含浸し振動子が固着することを防ぐため、ポリイミドテープで予め覆っている。リニア振動アクチュエ

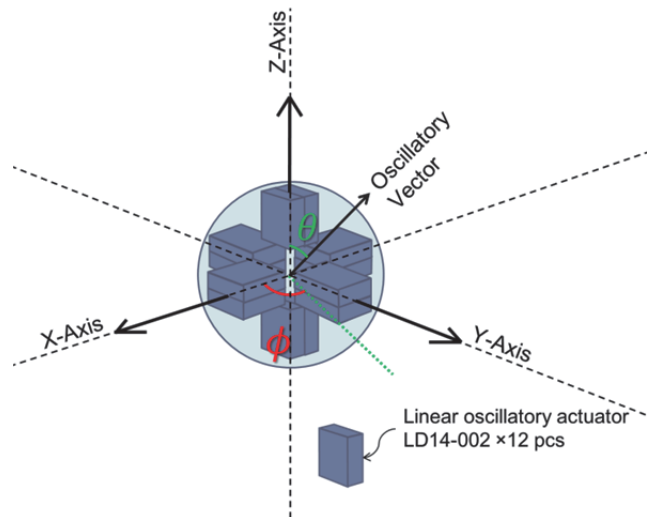


Fig.6 Structure of the developed device.

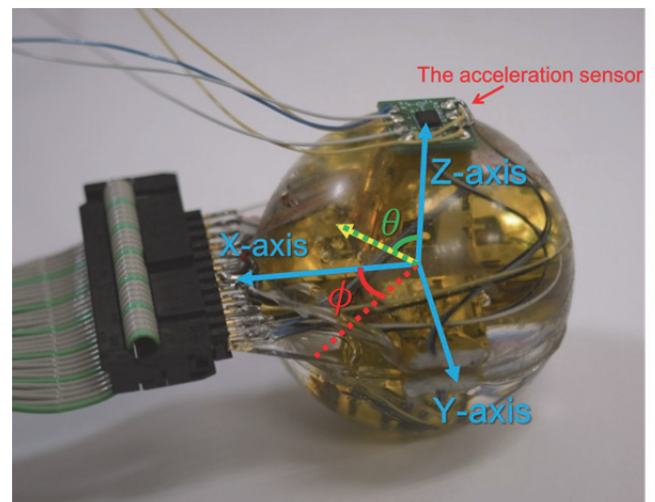


Fig.7 A developed device.

ータの駆動用ケーブルは AWG30 の単線ワイヤーを用いた。このワイヤーとポリイミドテープの隙間からレジンが侵入しないように、ワイヤーとポリイミドテープの隙間はエポキシパテで埋められている。駆動用の単線ワイヤーの一端は、球体の外側に取り付けられた 2×12 のピンヘッダーに接続されている。

4.2 デバイスの駆動回路

本デバイスでは、8bit マイコンである Atmel 社の atmega-64A を用い 3 軸 (X 軸, Y 軸, Z 軸) 毎に独立した駆動波形を 1 周期出力する度に演算し、各軸 8bit の波形データをマイコン外部に出力する。この各軸の波形データは、3 個の 8 bit R-2R 型 D/A コンバータに入力され、連続波形に変換される。これを TI 社製の D 級パワーアンプ IC である TPA2006 に入力し、アクチュエータを駆動する信号を作り出す。リニア振動アクチュエータ 1 個につき、1 個のパワーアンプ IC を用いるため、ここでは 12 個の TPA2006 が使用されている。

5. 方向提示

3 自由度の方向提示を実現するため、次に示す式(1)-(3)を用い、入力角度に応じた各軸のリニア振動アクチュエータの駆動電圧を決定する。すなわち図 5(b)を基準駆動電圧波形とし、これに式(1)-(3)で求められる入力角度に応じた各軸の駆動係数を乗じることにより各軸の駆動電圧を決定している。

$$X \text{ Axis Input Voltage Ratio} = \sin(\theta) * \cos(\phi) \quad (1)$$

$$Y \text{ Axis Input Voltage Ratio} = \sin(\theta) * \sin(\phi) \quad (2)$$

$$Z \text{ Axis Input Voltage Ratio} = \cos(\theta) \quad (3)$$

ただし、方位角: ϕ , 仰俯角: θ

これらの式に示されるように駆動電圧比に比例して、リニア振動アクチュエータが生ずる加速度が変化し、被験者に 3 自由度の牽引感覚を与えることができる。

5.1 方向提示実験

$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ の範囲で、 45° 刻みの値を、それぞれ θ と ϕ に設定し制御マイコンに入力した。開発した球状方向提示デバイスを駆動した状態で、Fig.7 に示すように、本デバイスの頂点に取り付けた加速度センサ AXDL-335 の出力電圧をオシロスコープで計測し、X 軸-Y 軸と、Y 軸-Z 軸における加速度 [m/s^2] のリサージュ波形を観測した。この時、方向提示デバイスは、右手で把持した。右肘は机に触れた状態で、手の揺れはオシロスコープの管面で観測できない程度に抑えて計測した。

また、軸間のセパレーションを確認するため、一軸毎に図 5(b)の基準入力を加え、そのときの各軸の加速度を計測した。この時方向提示デバイスはシリコン製の台座に乗せて計測を行った。

5.2 実験結果及び考察

Fig.8 は、 $\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$ における X 軸-Y 軸の、Fig.9 は、 $\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$ における Y 軸-Z 軸のリサージュ波形を示す。

Fig.8, Fig.9 より X-Y 軸間および Y-Z 軸間の加速度の相関係数の 2 乗値が 0.9 で正の相関があることから各軸間の加速度の位相差が抑えられており、理想に近い 3 軸振動合成が行われていることが確認できる。一方で、開発した方向提示デバイスの質量がアクチュエータ内の磁石の質量に比してかなり大きい (磁石の質量は 0.91g, 方向提示デバイスの質量は 86g)。このため一軸あたり 4 個のアクチュエータを同時に駆動しても発生する加速度は磁石の加速度の 1/22 程度になってしまうことになる。実際に計測された加速度はリニア振動アクチュエータ単体で得られた加速度よりもかなり小さいものであった。1 軸につきアクチュエータを 4 個並列動作させているにもかかわらず、リニア振動アクチュエータ単体よりも加速度が小さくなってしまったことは開発したデバイスにおける大きな課題であると言える。

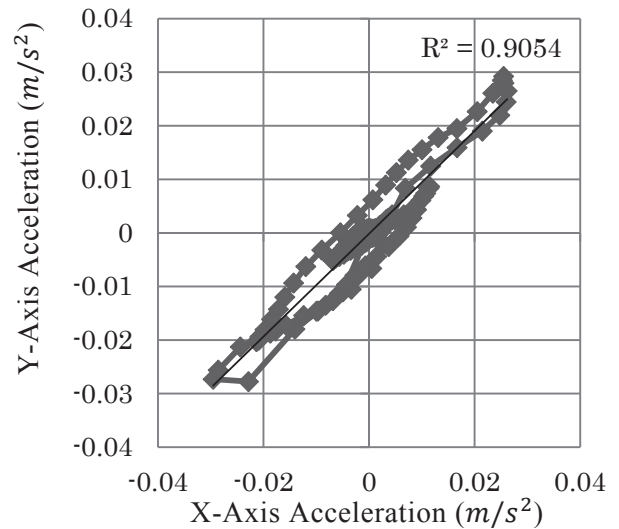


Fig.8 A lissajous figure between X and Y axis acceleration.

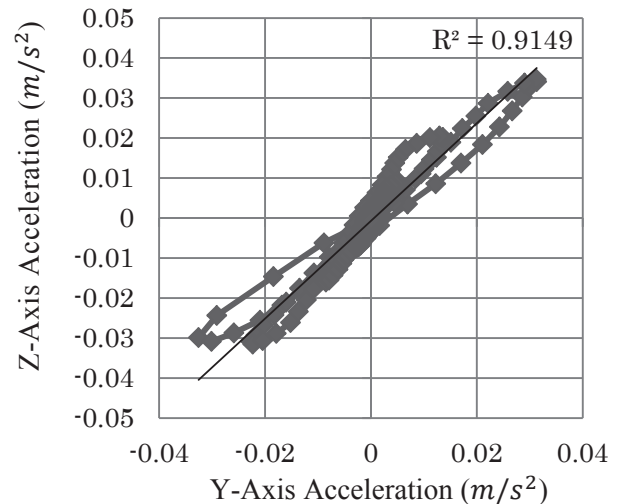


Fig.9 A lissajous figure between Y and Z axis acceleration.

成人健常者 3 名に開発したデバイスを把持させ、5.1 の実験方法と同様の駆動を行い、感想を求めたところ、方向の違いは認識できるものの、牽引感覚自体が小さく、正方向と負方向の向きの違いは不明瞭であるとの全員一致の回答を得た。

Table 1 Separations between each axes.

	X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
X-Axis		0.31	0.22
Y-Axis	0.23		0.15
Z-Axis	0.23	0.22	

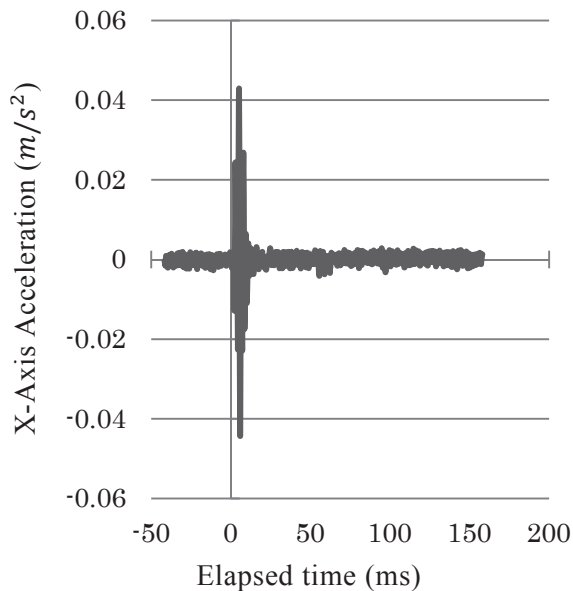


Fig.10 Acceleration generated in the X-axis direction.

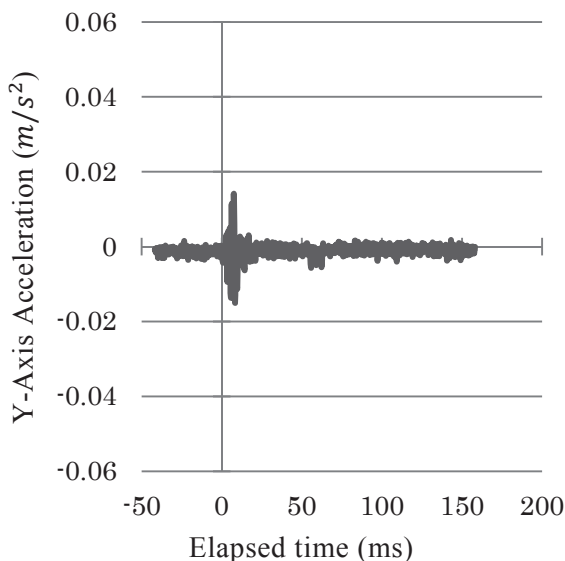


Fig.11 Acceleration generated in the Y-axis direction.

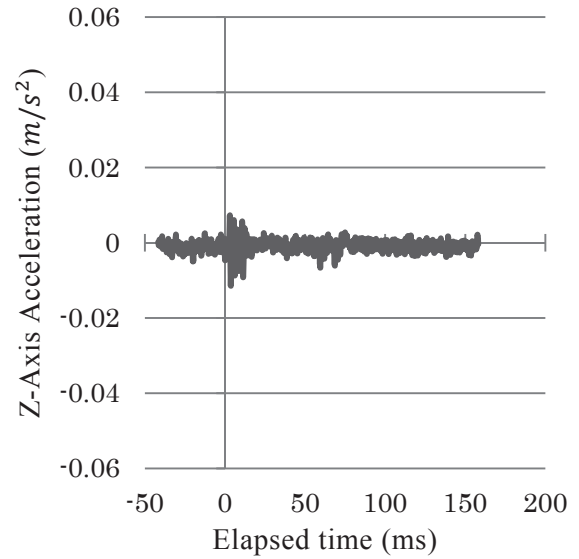


Fig.12 Acceleration generated in the Z-axis direction.

一軸毎に図 5(b)の基準入力に加え、そのときの各軸の加速度を Table 1 に示す。すなわち、単独で基準入力を与える軸を X 軸、Y 軸、Z 軸と変えた時の各軸に発生する加速度の最大ピーク値を計測し、基準入力を与えた軸の最大ピーク値を 1 として正規化した時の他の軸の値を Table 1 に示す。

またその一例として X 軸に基準入力を与えた時の各軸の加速度波形を Fig.10~Fig.12 に示した。

入力信号の無い軸に 10~30%の加速度が生じていたものの、実際にデバイスを把持し感じられる感覚的なセパレーションは良好であったため、この程度は許容できる値であると考えられる。

また Fig.8, Fig.9 に示されるように式(1)-(3)より求めた各軸のアクチュエータ駆動電圧波形により、提示したい方向の加速度ベクトルを発生することが可能であることも確認できる。

6. まとめ

汎用のリニア振動アクチュエータ単体を用いて牽引力が生成できることが測定した加速度波形から確認された。これによって既存の廉価な汎用部品を用いて軽量で小型な方向提示デバイスが製作可能なことが確認された。さらに、3 軸合成によって加速度が三次元に拡張できることも各軸のセパレーションの良さや、位相差特性から確認された。しかし、リニア振動アクチュエータの錘の質量に対し、開発した方向提示デバイスの質量が大きすぎたため、提示される合成加速度が極端に小さくなってしまった。

今後はデバイスの軽量化と、アクチュエータドライブ電圧および、駆動パターンの最適化を行ったのち、複数の被験者に利用させ、本デバイスの評価をしたいと考えている。

参考文献

- 1) C. Alvaro, R. Carson, and M. Ishikawa, Augmenting spatial awareness with Haptic Radar, 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers, pp. 61-64(2006).
- 2) T. Amemiya, S. Takamuku, S. Ito and H. Gomi, Buru-Navi3 Gives You a Feeling of Being Pulled, NTT Technical Review, Vol. 12 No. 11 (2014).
- 3) T. Amemiya and H. Gomi, Pedestrian Navigation System Utilizing Effectiveness of Dynamic Exploration for Force Direction Perception, the Institute of Electronics Information and Communication Engineers, Vol. J97-D No.2 (2014).
- 4) T. Amemiya, Assistive Technology on Human Spatial Navigation by Haptic Displays, Proceedings of the Bioengineering Conference, Annual Meeting of BED/JSME, (2010).
- 5) K. Tsukada and M. Yasumrua, ActiveBelt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, Proceedings of UbiComp2004, Springer LNCS3205, pp.384-399 (2004).
- 6) K. Yuki, M. Sato, S. Fukushima and H. Kajimoto, Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin, AH '12 Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference, Article No. 16 (2012).
- 7) T. Suzuki, K. Magatani, Development of the Haptic Device Using Linear Oscillatory Actuators for the Disabled, International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, Volume 6 (2016).
- 8) T. Suzuki, K. Magatani, Development of the Haptic Device with Linear Oscillatory Actuators, the 55th Annual Conference of JSMBE, (2016).
- 9) T. Suzuki, K. Magatani, Development of the Haptic Device with Linear Oscillatory Actuators, the 16th SICE SI Division Annual Conference (2015).
- 10) 日本電信電話株式会社. 擬似力覚発生装置. 特開 2016-150294. 2016-08-22.