

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04340

研究課題名(和文) ランダム周波数入力に対応するSMAワイヤの高速応答手法に基づく新原理音声デバイス

研究課題名(英文) Novel Principle Sound Device based on High-Speed Response Method of SMA Wire for Random Frequency Input

研究代表者

原田 宏幸 (Harada, Hiroyuki)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90301936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来、高速に駆動させるのが難しいとされてきたSMA (Shape Memory Alloy, 形状記憶合金) のワイヤを、最も反応の良い条件に維持することによって音声周波数帯域で駆動し、音を発生させる方法を実験的に検討した。電力制御によって、発生させたい周波数の交流信号に対し、一定の電力バイアスを付加することによって、目標としていた7kHzまでの周波数で安定した駆動が可能であることを示した。また、周波数ごとの発生音量の特性を明らかにした。さらに、音声デバイス構造の検討、ランダムな周波数を含む入力に対する出力調整手法、深層学習による入力波形の最適化などに取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

急速なAIの発展により、スマートフォンなどの通信デバイスとのコミュニケーション手段として、音声の重要性が増している。そのような背景の中、本研究は新しい形式の音源の提案を行った。従来、高速に駆動させるのが難しいとされ、音源としては用いられてこなかったSMAアクチュエータを音声周波数帯域で高速駆動させる方法を開発し、音の生成が可能であることを示した。SMAアクチュエータは柔軟で細いワイヤであることから、装置の小型化や軽量化など、デバイス設計により大きな自由度を与える可能性がある。本研究をさらに発展させることで、ウェアラブル機器や医療・福祉機器への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：An experimental investigation was conducted to examine sound generation by driving a shape memory alloy (SMA) wire, which has conventionally been considered difficult to drive at high speeds in the audio frequency range by maintaining the wire under the most responsive conditions. It was demonstrated that stable driving was possible at frequencies up to 7 kHz by applying a constant power bias to the AC signal at the desired frequency through power control. Furthermore, the characteristics of the volume generated at each frequency were clarified. Additionally, the structure of the voice device was investigated, a method for adjusting the output for inputs containing random frequencies was explored, and the optimization of input waveforms using deep learning was examined.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：形状記憶合金 Shape memory alloy SMA アクチュエータ 音響計測 強化学習

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやウェアラブルなスマートデバイスと AI の発展により、音声によるコミュニケーションの重要性が増している。現在、イヤホンやスピーカに用いられている音源のほとんどは、コイルと磁石によるボイスコイルモータ (VCM) である。本研究では、新しい音源として SMA アクチュエータの可能性について検討する。通電加熱により駆動されるワイヤ状の SMA アクチュエータは、重量あたりの発生力が大きく、電気抵抗値の計測により状態観測可能な収縮型のスマートアクチュエータである。動作原理は温度変化に伴う相変態であり、通電による自身のジュール発熱を利用した加熱により迅速に収縮できるが、伸長は放熱に依存するため遅く、冷却速度がアクチュエータの応答性を律速する。そのため、SMA の高速な伸縮駆動は困難であるというのが定説であった。また、SMA の温度-ひずみ関係に存在する非線形性やヒステリシス性と、これらの応力負荷依存性によりその運動を制御することは容易ではない。研究代表者らは、過去に SMA アクチュエータを、最も高い応答が期待できる温度条件に保持する手法を開発し、それにより 1kHz を超える周波数帯域の入力信号に対しても応答が得られることを示した。本手法を音の生成に応用できれば、SMA を新しい音声デバイスとして利用できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、音声周波数帯域の信号入力に対して SMA アクチュエータを応答させ、音としての出力を獲得する手法を確立することである。目標の周波数帯域は、現在の光通信による電話の周波数帯域の上限に相当する 7kHz とする。そのために、様々な条件が SMA の応答性と出力周波数帯域に与える影響について実験的に検証する。さらに、音声周波数帯域のランダムな周波数入力に対して、最適な駆動条件を維持しながら出力を得る手法を開発する。これらを通じて実用化に向けた知見を獲得する。

### 3. 研究の方法

SMA アクチュエータの温度-ひずみ関係は非線形かつヒステリシスを有する。そのため、SMA アクチュエータの温度を、温度の変化率に対するひずみの変化率が大きい領域内に保つことができれば、応答性の高い状態が維持されると考えられる。そこで、SMA アクチュエータの温度を適切な領域で保持するため、図 1 のように入力信号に直流のバイアスを付加して SMA に与える手法を開発した。この手法をベースに、以下のような取り組みを行った。

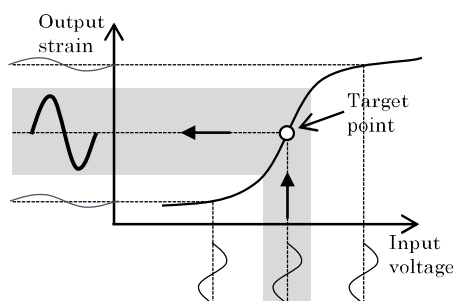


図 1 高速駆動法の考え方。図中の Target point 付近で駆動することで、同一振幅の入力に対して、より大きな応答を得る。

(1) 図 2 に示すような、SMA に接続された振動膜から発生する音の大きさをマイクロフォンで測定する実験装置を構成し、最適な駆動条件を実験的に検討する。さらに、様々な実験条件を与えて、音の出力特性を獲得する。また、得られた出力特性を利用して、ランダムな周波数を含む入力に対する適切な信号処理および SMA の駆動方法を開発する。

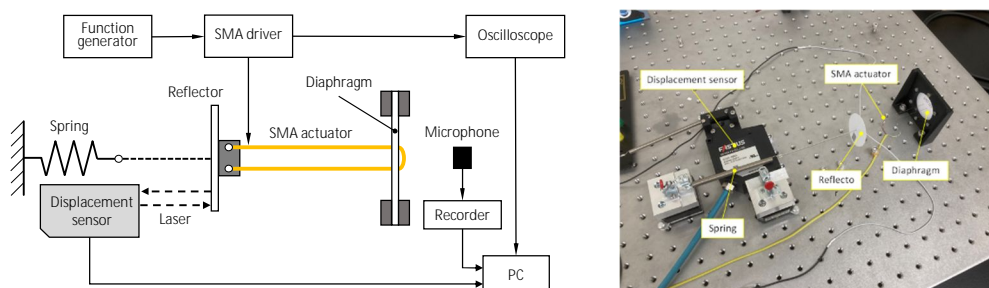


図 2 実験装置の概要。構成要素は実験目的に応じて適宜変更。

(2) 音声デバイスの構造を検討する。シリコン膜に SMA を縫い込んだ要素を用いた駆動機構や、図 2 中の振動膜の両側に SMA を取り付けて強制的に往復運動させる、拮抗駆動式の実験装置を構成し、その出力特性についての知見を得る。

(3) 特定の条件においては、正弦波よりもパルス波を入力した方が、音量が大きくなる場合がある。ただし、パルス波を入力した場合は、出力に高調波成分が多く含まれるため、音質が劣化する。そこで、強化学習を用いて、入力波形を最適化する手法を検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 制御方法について、電圧制御、電気抵抗値制御、電力制御を試みた結果、電力制御によって、高周波帯域でも安定した出力が可能であることがわかった。続いて、各周波数における出力音量とひずみの関係を調査した結果、図 3 のように、ひずみの中間領域で最も大きな音量が得られ、その両端では音量が低下するという特性が得られた。また、上記中間領域においては、ひずみの違いによる音量の変化は比較的小さいことがわかった。このことは、電力をシビアに調整しなくとも、音の生成が可能であることを示している。

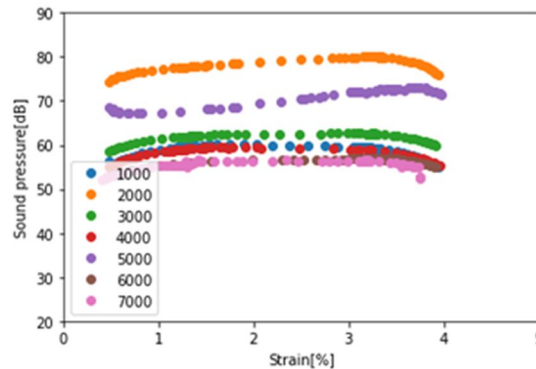


図 3 SMA の平均ひずみ量に対する出力音量の変化の一例

続いて、0.2kHz から 7kHz の周波数範囲で入力波形の振幅に対する出力音量を調査したところ、すべての周波数で対数関数に似た増加関数の形となることが分かった。この関係から入出力関係の数式モデルを作成することができた。この数式モデルを利用してフィルタを構成し、ランダムな周波数を均等に有する入力に適用した。結果を図 4 に示す。フィルタを適用しない左図では、周波数によって音圧が異なるのに対し、フィルタを適用した右図では、よりフラットな特性な実現できていることが分かる。

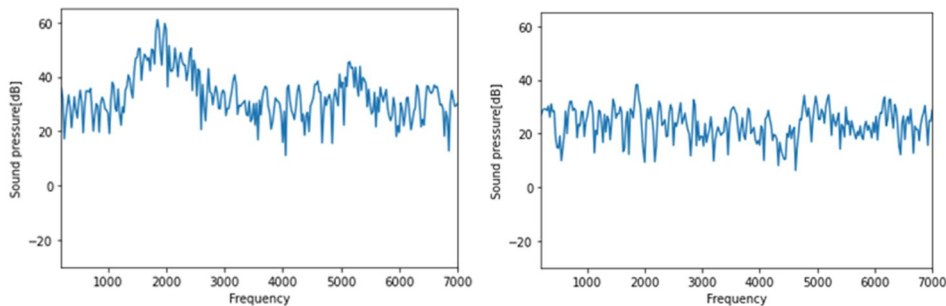


図 4 SMA の特性を考慮した出力調整手法適用の結果  
左：フィルタ適用前、右：フィルタ適用後

(2) デバイス構造のバリエーションとして、図 5 のように、復元力を、振動膜周囲を取り囲む、SMA ワイヤを縫い込んだシリコン膜から得る方法や、上述の拮抗駆動方式について検討した。その結果、図 5 のような構造の採用により、ばねを用いずに復元力を確保できることが分かった。デバイスの形状や SMA アクチュエータの縫い込み方の組み合わせによって、広い周波数帯で高い応答性を期待できることがわかった。拮抗駆動方式においては、片側駆動よりも高い音圧が得られ、さらにばねの復元力を減少させても応答性がほとんど変化しないことがわかった。これにより、ばねを小型化または使用しない、よりシンプルかつ従来よりも高い応答性を持つデバイス構造の実現が期待できる。

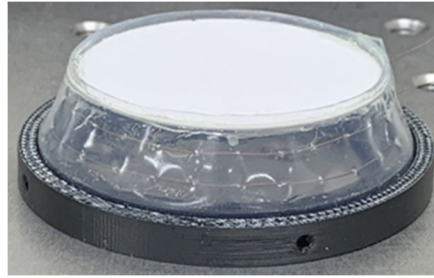


図5 音声デバイス構造候補の一例

(3) 音量および音質の両立が可能な波形の生成を目的として、強化学習のひとつであるモンテカルロ法を用いた入力波形の最適化を行った。その結果、図6に示すように、低周波数帯域においては正弦波（青点）が最も適した波形であることが示唆された。一方、高周波数帯域においては、音量と音質を両立した、正弦波とは異なる波形が生成された（赤点）。生成波形の一例を図7に示す。

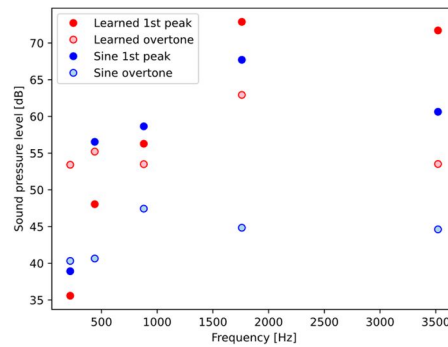


図6 波形の違いによる発生音量の違い

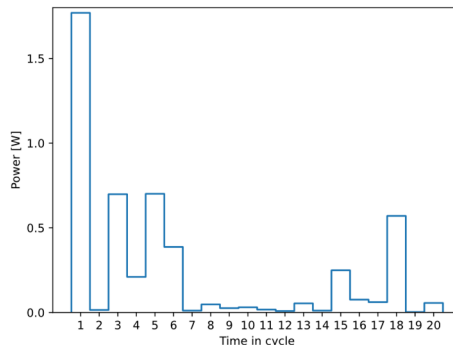


図7 生成波形の一例。一波長分を20分割に離散化。  
周波数 1760 Hz, 平均電力 0.25 W

本結果を応用して、複数の周波数が同時に再生されるMIDI形式の音源ファイルを入力として応答を調査したところ、音階の周波数に応じて正弦波と学習波形を組み合わせた合成波は、正弦波同士を組み合わせた合成波よりも大きい音量を出力可能であることが示された。

以上が本研究によって得られた主要な成果の概要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 野澤 勇人, 原田宏幸, 田島悠介, 諏訪田幸一, 秋山望実
2. 発表標題 SMAアクチュエータによって駆動される音響発生器の構造検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022 (ROBOMEH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Harada, Nozomi Akiyama, Yusuke Tajima, Koichi Suwada, Yuto Nozawa
2. 発表標題 Sound measurement-based study on SMA actuator characteristics for application of audio devices
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山望実, 原田宏幸, 田島悠介, 野澤 勇人, 和久井隆光
2. 発表標題 応答特性を考慮したSMAアクチュエータによる音声周波数帯域の音生成
3. 学会等名 IIP2023 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 諏訪田幸一, 原田宏幸, 田島悠介, 秋山望実
2. 発表標題 SMAアクチュエータの変位量に対する応答特性の変化
3. 学会等名 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田宏幸, 田島悠介, 諏訪田幸一, 秋山望実, 野澤勇人
2. 発表標題 音声周波数帯域におけるSMAアクチュエータの応答特性
3. 学会等名 IIP2022情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田島悠介, 原田宏幸, 野澤勇人, 和久井隆光
2. 発表標題 SMAアクチュエータの音生成における入力波形の最適化
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和久井隆光, 原田宏幸, 田島悠介, 野澤勇人
2. 発表標題 拮抗配置したSMAアクチュエータによる音生成
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野澤勇人, 原田宏幸, 田島悠介, 伊藤壮生, 和久井隆光
2. 発表標題 SMAアクチュエータによる音生成における強化学習を用いた入力波形の最適化
3. 学会等名 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	田島 悠介  (Tajima Yusuke)  (00849375)	北海道科学大学・工学部・助教   (30108)	削除：2022年4月20日

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	田島 悠介  (Tajima Yusuke)		2022-2023年度
研究 協力者	伊藤 壮生  (Ito Soki)  (60845668)	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・産業技術環境研究 本部工業試験・研究職員  (80122)	2022-2023年度

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------