

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21020

研究課題名（和文）非電気系により駆動する自壊型ロボットによる侵入不可能領域の構造物補修の実現

研究課題名（英文）Realization of structure repair in impenetrable area by self-destructing robot driven by non-electric system

研究代表者

松本 光春（Matsumoto, Mitsuharu）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：70434305

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では非電気系により駆動する自壊型ロボットによる侵入不可能領域の構造物補修の実現を目標としている。非電気駆動については音響刺激による共鳴現象に着目し、筒状物体に音波を当てることで駆動する現象の利用や穴が開いた中がヘルムホルツ共鳴器を利用した駆動を検討した。どちらも駆動には成功したが、前者については実験的な再現性が確保できたものの理論的な裏付けまでは困難であった。一方、ヘルムホルツ共鳴器を利用した駆動については実験的な進展に加え、理論的な解析についても進展があった。また、駆動後の自壊ロボットの実現のため、2種類のプロトタイプを作成し、その修復性能について調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では音響共鳴を利用した非電気駆動アクチュエータの開発と外部からの熱刺激により反応する自壊型ロボットの開発に取り組んだ。特にヘルムホルツ共鳴器を用いた非電気駆動アクチュエータについてはこれまでにその利用に関する報告がなく、理論的・実験両面からその可能性を提示したことの学術的な意義は大きいと思われる。本研究で目標とする非電気系により駆動する自壊型ロボットによる侵入不可能領域の構造物補修の実現は従来型の災害支援ロボットのもつ限界を解決する一つの可能性を提示するものであり、本研究の進展の持つ社会的意義は大きなものになると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to realize the structure repair in the impenetrable area by the self-destructing robot driven by the non-electric system. In order to realize a non-electric drive that solves this problem, we focused on the resonance phenomenon caused by acoustic stimulation. We also investigated driving using Helmholtz resonance caused by applying sound of frequency. Both were successful in driving, but the former was difficult to prove theoretically, although experimental reproducibility was ensured. On the other hand, the drive using Helmholtz resonator has progressed not only experimentally but also theoretically. To realize a self-destructing robot after being driven, we also created two prototypes and investigated their repair performance.

研究分野：知覚情報処理、知能ロボティクス

キーワード：ロボット 非電気駆動

### 1. 研究開始当初の背景

近年では構造物を補修するためのロボットとして様々なロボットが研究されている。これらのロボットは人間が直接作業することが難しい狭隘部や高所、危険領域の修復を行うことが想定されており、その実用展開には大きな期待が寄せられている。

このように従来型のロボットは実用上、大きな利点を持つ一方で、故障し、回収できなくなった際には環境に大きな負荷を与えてしまうという問題点も存在する。この問題は電気・機械駆動による従来型のロボットが持つ構造的な問題であり、その解決には従来の電子工学・機械工学的発想から脱却した挑戦的な学術領域の開拓が不可欠である。

### 2. 研究の目的

構造物を補修する際、人間が直接作業不可能な場所ではロボットを用いた修復が行われる。しかし、機械駆動のロボットは回収できなかった際に環境に大きな負荷を与えてしまう。この問題を解決するため、本研究では従来型ロボットが侵入不可能な領域の構造物の補修に焦点を当て、非電気系により駆動する自壊型ロボットによる侵入不可能領域の構造物補修の実現を研究の目的として定め、非電気駆動アクチュエータにより駆動し、自らの構造そのものを修復材料として用いる自壊型ロボットの実現可能性について検討する。

### 3. 研究の方法

本課題を解決する非電気駆動の実現のため、音響刺激による共鳴現象に着目した。具体的な駆動方法として、筒状の物体に音波を当てることで駆動する現象の利用や穴が開いた中が空洞の球に特定の周波数の音を当てることにより起きるヘルムホルツ共鳴を利用した駆動を検討した。どちらについても駆動には成功したが、前者については実験的な再現性が確保できたものの理論的な裏付けまでは困難であった（本成果については国際会議にて報告済）。一方、ヘルムホルツ共鳴器を利用した駆動については実験的な進展に加え、理論的な解析についても進展があった。これらの進展を踏まえ、本報告ではヘルムホルツ共鳴器に関する結果についてその詳細を記載する。実験の手順は以下のようになる

#### (1) ヘルムホルツ共鳴の理論値計算と共鳴器の選定：

研究の第1段階としてまず穴をあけた球に対して音波をあてることによって起きるヘルムホルツ共鳴によって吹き出す空気での移動についてその可能性を調査する実験を行い、ヘルムホルツ共鳴に関する共鳴周波数の理論値との比較を行った。実験では直径44mmのラージボールピンポン玉を用い、5mmと5.5mmの響孔を空けヘルムホルツ共鳴器とした。

#### (2) ヘルムホルツ共鳴器を用いた非電気駆動アクチュエータのプロトタイプを作成：

ヘルムホルツ共鳴器を組み合わせることで駆動が実現可能かについていくつかのプロトタイプを作成した。また、作成したプロトタイプを用いた実験の結果を踏まえ、アクチュエータの改良を行った。

一方、駆動後の自壊ロボットの実現のため、アルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウムのゲル化反応によるプロトタイプとゼラチンのカプセルに修復材を入れたプロトタイプを作成し、その修復性能について調査した。

### 4. 研究成果

#### (1) ヘルムホルツ共鳴の理論値計算と共鳴器の選定：

まず初めにヘルムホルツ共鳴によって生じる風の風速を響孔の直径毎に測定した。この実験を行ったときの室温が10.1℃であったため式5, 6より5mm, 5.5mmの響孔の共鳴周波数はそれぞれ547.1Hz, 573.8Hzと求められる。

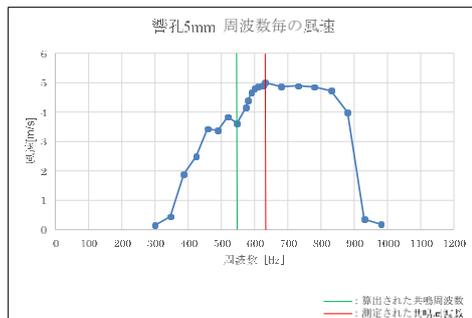


図1 響孔5mmでの風速と周波数の関係

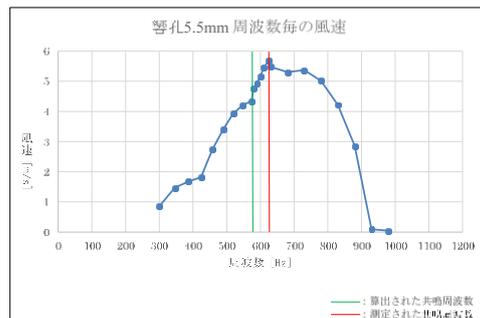


図2 響孔5.5mmでの風速と周波数の関係

緑色の線は計算により算出された共鳴周波数であり、赤色の線は実験により測定された共鳴周波数である。結果としては、算出した共鳴周波数と実際の測定値では10%程の違いが生じていた。原因としては主に測定器の設置状態による測定誤差や、式5, 6において考慮できていない環境条件などが挙げられる。また、響孔5mmでの最大風速は約5.01m/sに対し、響孔5.5mmでの最大風速は約5.68m/sであり、5.5mmの方が周波数全体で見た最大風速が速かった。これらの実験の結果を踏まえ、以降の実験では響孔5.5mmのラージボールを用いて移動実験を行うものとした。



図3 作成したプロトタイプ

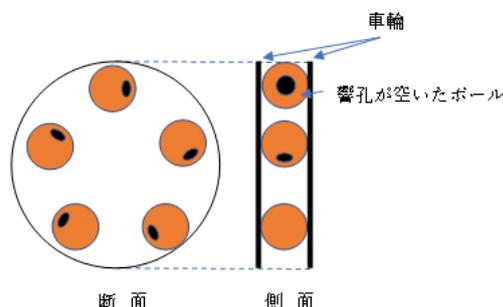


図4 改良したプロトタイプの設計

(2) ヘルムホルツ共鳴器を用いた非電気駆動アクチュエータのプロトタイプの作成：

ヘルムホルツ共鳴器の挙動を確認するため、ヘルムホルツ共鳴器のみ、車輪を付けたもの、先が細い棒状の足を取り付けたもの、先が丸い棒状の足を取り付けたものの計4パターンの構造を作成した(図3)。実験では、4つの構造それぞれに対し共鳴周波数となる音を当て、その挙動を観察した。実験の結果、棒状の足を取り付けたヘルムホルツ共鳴器については音を当てても動かなかった。一方、ヘルムホルツ共鳴器のみ、及び、車輪付きヘルムホルツ共鳴器については回転することにより穴の位置も動くため往復運動をしてしまった。これらの結果をふまえて往復運動ではなく一方向への移動をするようにアクチュエータの改良を行った。

実験結果をもとに、アクチュエータの再設計を行った。図4に、改良したアクチュエータの設計を示す。図4において、左図は改良型アクチュエータの断面図、右図は側面図をそれぞれ示している。図4に示すように、2つの車輪により5つのボールが挟まれている。ボールの響孔は車輪の接線方向と平行になるように配置されており、これによりアクチュエータの往復運動が防がれることが期待される。この設計で再度同様の移動実験を行った。実験を行った結果、改良型アクチュエータは往復運動することなく直進することが確認された(図5)。

この成果について国内会議で発表を行い、優秀ポスター賞を受賞した。また、その成果を英語論文としてまとめ、国際論文誌にて公表した。

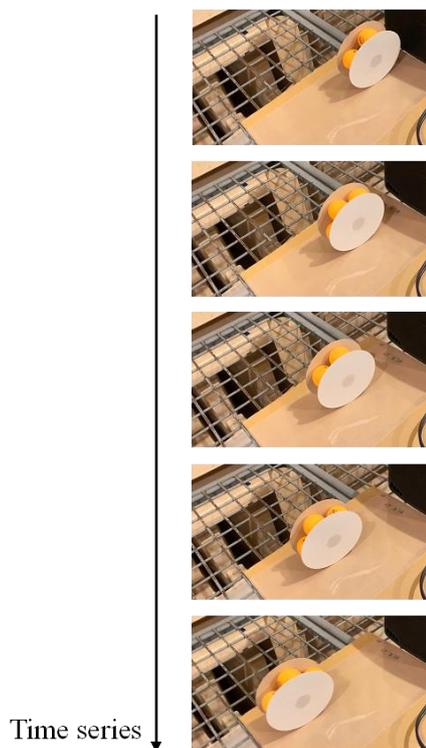


図5 改良したプロトタイプの動作

(3) 自壊型ロボットのプロトタイプデザイン：

本ロボットにより想定する補修のプロセスを図6に示す。目標とするロボット像は、有機素材の外皮内に修復材を持ち、特定箇所まで移動させた後何らかの方法で自壊することにより中から修復材を出し特定箇所の傷を修復するものである。

想定する補修プロセスを実現するためには、特定の条件で破壊させられる外皮が必要であり、その特定条件に応じて様々な外皮が考えられる。温度上昇により破壊させるのであれば融解温度が低い外皮、化学変化により破壊するのであればそれに適した素材の外皮を用いるなど、用途に応じて様々なパターンが考えられる。今回の実験では、検討が容易で実現しやすいと思われる温度上昇による破壊を想定し、2種類のプロトタイプを作成した。

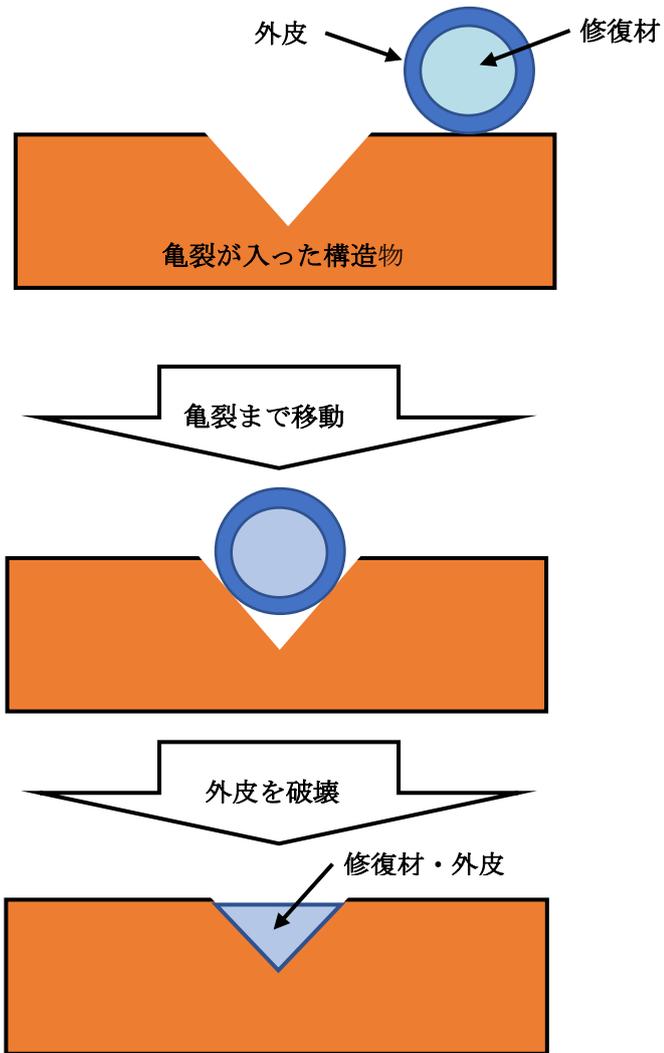


図6 ロボットの補修プロセス



図7 イクラ型構造の写真



図8 ゼラチンカプセル型構造の写真

1つ目のプロトタイプとしてアルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウムのゲル化反応によるイクラ型構造を検討した。作成したプロトタイプの写真を図7に示す。この反応はアルギン酸ナトリウム水溶液にCaイオンを加えた時に起こるイオン架橋によるゲル化反応である。このプロトタイプを水に入れ熱したところ、水温が90℃を超えても外皮が融解することなく逆に固まってしまった。

2つ目のプロトタイプとしてゼラチンカプセル型構造を検討した。これは市販しているゼラチンのカプセルに修復材を入れた構造である。作成したプロトタイプの写真を図8に示す。このロボットに上から熱湯をかけたところ即座に融解し、中からボンド水溶液が流れ出た。



図9 外皮融解後の修復の様子

事前に行った実験結果を踏まえた破壊の容易さ及び製造の容易さを考慮し、ゼラチンカプセル型ロボットを用いて傷の修復実験を行った(図9)。実験は以下の手順に従っている。

- ① 修復ロボットと同じ程度の大きさの傷が二つ付いた木の板を用意する。
- ② 用意した傷に修復ロボットを入れる。
- ③ 上から熱湯をかけ修復ロボットの外皮を融解させる。
- ④ その後一定時間放置し、中から出た修復材によりどの程度傷をふさぐことが可能かを観察する。

修復箇所に対してショアAデュロメーターで硬度の測定を行った結果、元の木材に対し、70%~80%の硬度での修復が実現できることが確認できた。これらの結果については国内会議にて発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Niwano Takeru, Matsumoto Mitsuharu	4. 巻 11
2. 論文標題 Sound Driven Actuator Using Helmholtz Resonance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act11060163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shinichi Otake, Mitsuharu Matsumoto
2. 発表標題 Investigation of driving principle of non-electrically driven robots using sound waves as a power source
3. 学会等名 The 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庭野尊, 松本光春
2. 発表標題 構造物補修を目的とした自壊型ロボット
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庭野尊, 松本光春
2. 発表標題 ヘルムホルツ共鳴を用いた音響駆動アクチュエータ
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2022年電子情報システム部門大会優秀ポスター賞

--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------