

Pendulum Resonator: 振り子の共振と運動の特性を利用した動的な出力を離れた場所で行えるシステム

伊藤大貴^{†1} 橋田朋子^{†1}

概要：物理現象や材料特性を活用したデバイスの研究が盛んに行われているが、これらの多くは入力位置と出力位置が一致しているものが多く、離れた位置でのインタラクションや表現を実現していない。この課題を解決するため、振り子の共振特性に注目し、ユーザーから離れた位置で複数の出力を繰り返し選択的に動作させるような空間に展開可能なシステム、Pendulum Resonator を提案する。さらに出力部で使用する機構として、力を瞬発的に複数回加えることが出来る振り子の運動特性と磁力を用いることで、電流や、回転運動を生み出す機構を提案し、ユーザーの周りの空間を演出する応用的な表現例を紹介する。

1. はじめに

SDGs の第 7 目標に「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」が掲げられていることもあり[1]、最近では電力を必要としない動的な装置への注目が集まっており、このような観点からの開発は今後さらに重要と考えられる。HCI 分野では以前から、物理現象や材料特性を活用したデバイスの研究が盛んに行われる中で、結果的に電力を用いることなく動的な出力が可能なシステムが、多様な形で開発されている[2][3][4]。これらの多くは基本的に、入力あるいは制御位置と出力位置が一致しており、その場でのインタラクションや表現を実現している。筆者らは電力を用いないという点は共通しつつも、入力と離れた位置の複数の出力を繰り返し選択的に動作させるような、空間的に展開可能なシステムの実現を目指している。

そこで本研究では振り子に着目し、その共振特性や運動特性を活用することを考える。まず、共振特性により空間内で水平に張った糸に、同じ長さの振り子を間隔を空けて 2 個配置し、一方を入力として揺らすともう一方も出力として同期して揺らせる。この特性を拡張し、1 つの振り子を入力として同じ長さの複数の振り子を同時に揺らすことや、複数の長さが異なる振り子を入力として、それらに対応する複数の振り子を揺らすことも可能である。これらより、1 対 1、1 対多、多対多の入出力が実現できる。次に、振り子の運動特性として、加えることが出来る力は瞬発的ではあるが、その力を複数回加えられることに着目する。出力側の振り子に磁石を取り付け磁力を活用することで、瞬発的に電流を生み出したり回転したりといった出力を複数回繰り返し行うことが可能となる。

以上より、本研究では、ユーザーが振り子を揺らすという単純な入力で、電力なしに離れた位置にある複数の出力装置を、選択的かつ反復的に一定時間動作させ、発電や回転などの動的な出力が可能な仕組み、Pendulum

Resonator を提案する (図 1)。本稿では Pendulum Resonator の実装の詳細を述べるとともに、発電や回転を LED 点滅や、モアレアニメーションとして応用することでユーザーの周りの空間を演出する表現の例を紹介する。

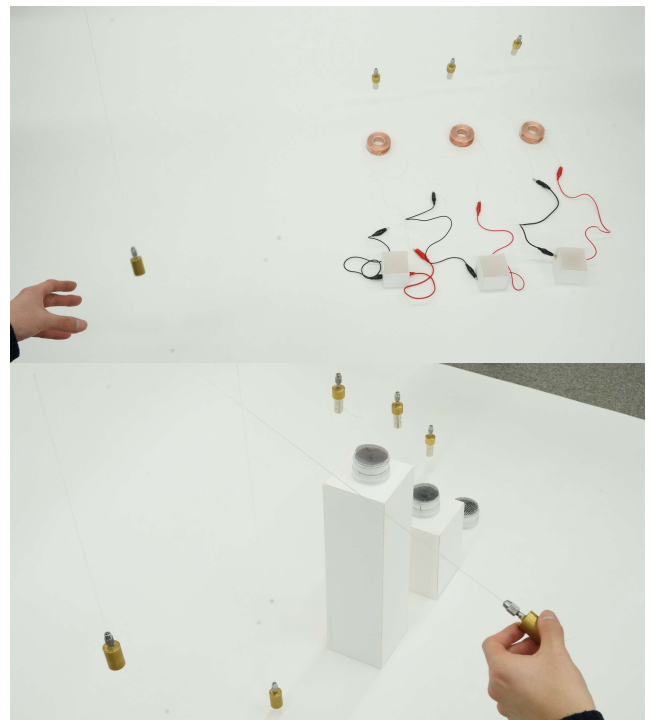


図 1 Pendulum Resonator

2. 関連研究

物理現象や材料特性に着目したデバイスの先駆的な事例として、納豆菌のハイグロモーフ現象を用いたアクチュエータである bioLogic[2]、植物の静脈構造を模倣した液体ディスプレイ Venous Materials[3]、磁気ピンと磁気シートを組み合わせることでさまざまな形状や動きを出力できる

^{†1} 早稲田大学

ペンディスプレイである **MagneShape**[4]などが挙げられる。これらの手法では、熱エネルギーや空気圧を与える必要がなく、入出力に電力が必要ないアクチュエータを実現しているが、入力と出力の位置が同じでスケラビリティは低い。本研究は振り子の特性を活用し、入力に対して出力を離れた地点で繰り返し発生させ、空間的に展開する仕組みである点が異なる。

本研究と同様に振り子に着目した試みも多数ある。**Resonant Bits**[5]は、振り子の共振特性を模した様々な場面で利用可能な入力システムであり、振り子の共振特性をデジタルで再現している。一方、フィジカルな世界で実際に動く振り子を活用した作品事例も多くある。**syncrowd**[6]は、振り子の同期現象と自己組織化という物理特性を利用した作品であり、**PENDULUM**[7]では舞台演出の一部として振り子が使われている。**SONIC PENDULUM**[8]は環境音のピッチを解析し、AI が生成したエンドレスなメロディーを会場に設置された振り子の中に埋め込まれたスピーカーから流す、サウンドインスタレーションであり、手紙からの採集[9]は、モーターで定規を振り子のように動かすことで、方位磁針に付けられた切手が回転するという作品である。これらはいずれも、動的な出力のための動力源としてモーターやセンサーを利用しており電力を必要とするという点や共振特性を利用していない点で本研究とは異なる。

3. Pendulum Resonator

Pendulum Resonator は、ユーザーが振り子を揺らすという単純な 1 回の入力で、離れた地点にある 1 個あるいは複数の出力装置を電力なしに一定期間繰り返し選択的に動作させ、動的な出力が可能な仕組みを目指す。以下に振り子の共振特性や運動特性を考慮した設計指針を示す。

本システムで着目する振り子の基本的な動作原理として、まず 1 本の糸を空間内に張りそこに振り子を 1 本吊り下げた時、振り子を静止位置から少し引き上げ離すと自励振動を起こす。この周波数は糸の長さによって一意に定まり、共振（固有）周波数と呼ばれる。この振り子に対して、振り子がつり下がっている糸を揺らしたり、もう 1 本同じ長さの振り子を加えて揺らしたりといった形で、同じ共振周波数の外力を加えると、振り子はたとえその外力が弱くとも次第に揺れ始め、やがて大きく揺れるようになる。この現象を共振という。本研究ではこの共振の特性を活用し、2 本の振り子を同じ 1 本の糸に吊るして 1 つを入力、もう 1 つを出力とし、入力側を揺らすと出力側も同期して揺れる仕組みを最も基本的な構成として実現する。さらに共振の実験を進める中で 1 本の入力で 1 本の出力だけでなく、同じ糸に吊り下げた 1 本の振り子の入力で、同じ長さの同じ長さの複数の振り子を揺らせることや、さらに、入力側で複数の長さが異なる振り子を揺らすと、それらに対応し

た同じ長さの振り子を複数揺らせることに気がついた。そこでこのような共振特性及びその応用的な特性を活用して、1 対 1、1 対多、多対多の入出力が可能な振り子を構成し、空間的な広がりのある仕組みを実現する。

次に、振り子の運動特性として、揺れの力は非常に弱く一定の力を常に加え続けることが出来ないが、瞬発的な力を複数回（繰り返し）加えることが出来るという特性がある。この特性を効果的に活用するため、本研究では振り子に磁力を組み合わせ、磁力の変化を瞬発的に起こすことを考える。磁石のついた振り子の先にコイルを設置することで、コイル内の磁束を瞬間的に変化させ電磁誘導を起こし、電流を生み出すことができる。あるいは、磁石のついた振り子の先に方位磁針のようなものを設置し、瞬間的に磁石に引き寄せられたり引き離されたりを繰り返すことで回転運動を起こすことができる。このようにして、出力側の振り子の揺れの小さな力から動的な出力を実現する。

4. 実装

4.1 基本のシステム

Pendulum Resonator の基本構成として入力と出力に同じ長さの振り子を 1 つずつ設けたものを図 2 に示す。提案システムではまず、机 2 つにクランプを 1 つずつ固定し、テグスをリーズロックに通して固定して張る。入力部として、この水平に貼ったテグスにおもり吊り下げ用のテグスをきつく結び、振り子のおもりとして金属棒を固定する。金属棒には上面から底面まで円形の穴をあけておき、穴にピンバイスを挿入し、接着剤を用いて固定する。ピンバイスにおもり吊り下げ用のテグスを通し、固定することで長さを可変に出来る振り子を実装する。さらに出力部として、入力部で実装したものと同様の振り子 1 つに対しネオジウム磁石を取り付けておく。さらに発電や回転のための機構を振り子の下部に離して設置する。

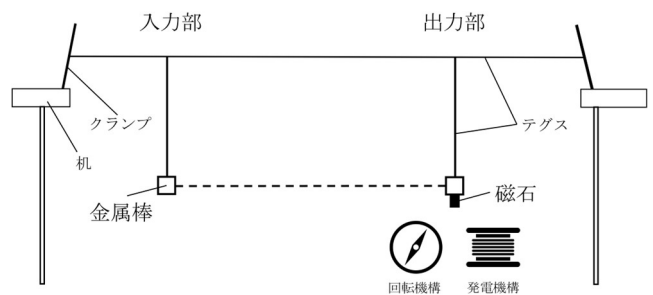


図 2 **Pendulum Resonator** の基本構成

4.2 動的な出力のための機構

動的な出力のために今回実装する機構は 2 種類である。まず発電機構はボビン、エナメル線、ミノムシクリップ付きコード、紙やすりで構成する。ボビンにエナメル線を均等に 3000 回巻き付け、巻き始め、終わりの 10cm 程度を

ポピンから出しておき、それぞれの両端から約3cmのエナメルコーティングを紙やすりで剥がしておく。その部分にミノムシクリップを取り付け、誘導電流を得られるようにしておく。実装した発電機構を図3に示す。なお、振り子の運動エネルギーは揺れの軌道における最下部分が最も大きくなり、速度が最も速いため、発電機構は出力側の軌道における最下部分からわずかに離れた場所に配置する。

回転機構はネオジウム磁石、さら小ネジ、円筒型のクリアケース、厚紙、釘で構成する。ネオジウム磁石の上面と底面にさら小ネジを取り付け、方位磁針と同じ回転機構を作成する。作成した方位磁針のネオジウム磁石の側面には釘を取り付け、円筒型のクリアケースに円形に切った厚紙をはめ込み、釘を固定する。クリアケースの底に、釘を立たせるための土台を配置しておく。これにより、作成した方位磁針がうまく回転するようになる。実装した回転機構を図4に示す。回転機構は振り子の磁石に影響を受けつつも、振り子の磁石と回転機構の磁石とが磁力により接着しない場所に配置する。

これらの機構のどちらかを、必要に応じて出力側の振り子の下部に置く。

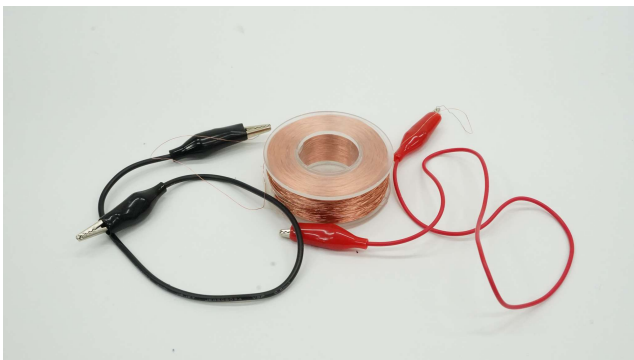


図3 発電機構



図4 回転機構

4.3 複数の入出力のための構成

入力と出力の振り子の個数と長さを変えることで、入出力が1対多対応のシステムと1対1, 多対多対応のシステム

を実装する。

1対多対応の構成を図5に示す。入力部には1つの振り子を、出力部には複数の振り子を設け、それらの長さは全て同じものとする。これにより入力部の振り子Aを揺らすと、出力部の振り子A', B', C'すべてが大きく揺れる。

1対1, 多対多対応の構成を図6に示す。入力部に異なる長さの複数の振り子を設け、出力部には入力部のそれぞれの振り子と同じ長さの振り子を複数個設ける。この構成により、例えば、入力部の振り子Aのみを揺らすと出力部の振り子A'のみが大きく揺れる。また、入力部の振り子BとCを同時に揺らすと、出力部の振り子B'とC'が大きく揺れる。

各システムの入力部と出力部の距離や、各振り子の長さは比較的自由に設定可能である。目視で共振周波数の違いが出るようにすることと、入力部から出力部へ揺れが伝わるようにすることを念頭に置き、出力先で用いる機構や応用の方法により適宜調整する。

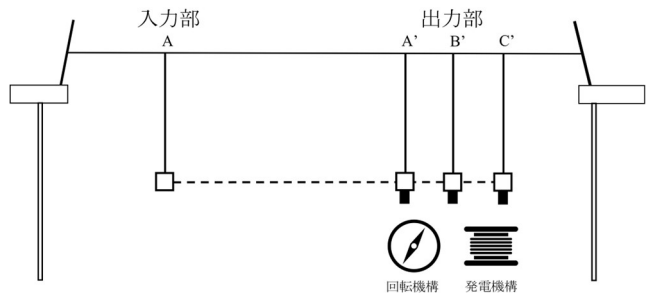


図5 入出力1対多対応の Pendulum Resonator 構成図

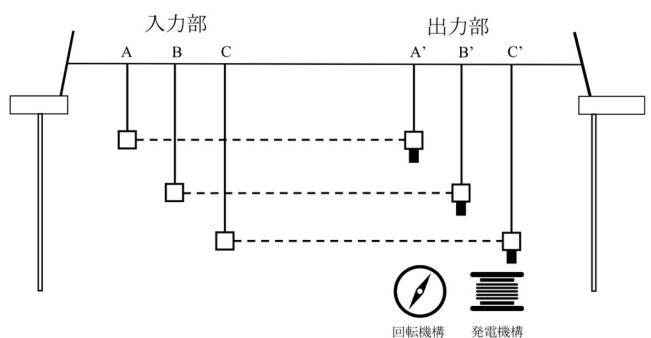


図6 入出力1対1, 多対多対応の Pendulum Resonator 構成

5. 応用

実装した発電機構や回転機構による動的な出力を利用して、ユーザーの周りの空間を演出する例として、発電機構ではLED点滅を、回転機構ではモアレアニメーションを起こす応用的な表現を実装した。また、Pendulum Resonatorにより実現される空間的な広がりを確認するため、LED点滅では1対多対応システムを、モアレアニメーションでは1対1, 多対多対応システムを用いた。

5.1 1対多対応 LED 点滅システム

発電機構に LED を取り付け、その LED を上面のみトレーシングペーパーで覆った立方体の中に入れた (図 7 (上)). LED は赤、青、緑の 3 色を設けた. 実装した 1 対多対応 LED 点滅システムの全体像を図 7 (下) に示す. 今回振り子吊り下げ用のテグスの長さは全長 170cm とし、振り子の長さは 60cm、入力部と出力部では間隔を 40cm あけ、出力部の振り子はそれぞれ 20cm の間隔で並べた. 発電機構は振り子軌道の最下部分から 1cm 離れた位置に配置した.

入力部の振り子を振ってから、平均して 60 秒後に出力部の振り子が大きく揺れることが確認できた. また、その揺れは 2 分以上は安定して続き、出力が複数回反復的に行われることが確認できた. 1 対多の入出力の対応が確認でき、1 つの振り子を揺らすことで、出力先にある三つの LED がすべて光ることが確認できた (図 8). 1 回の入力で LED 全てが光るが、同時に光らず、バラバラに光った. これは、吊り下げている糸の長さに誤差が生じていることや、入力側の振り子から出力側の振り子までの間隔に差があることが原因であると考えられる.

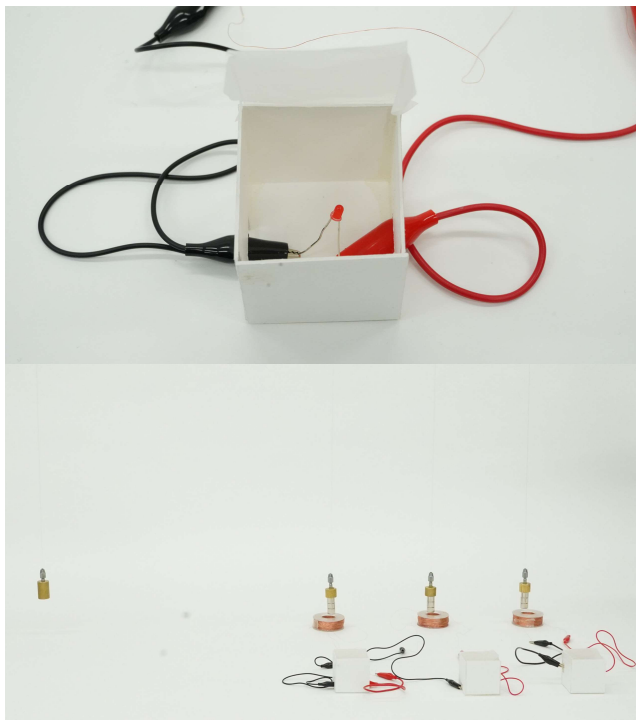


図 7 LED 付き発電機構(上)とシステム全体像(下)



図 8 赤、青、緑それぞれの LED が光っている様子

5.2 1対1, 多対多対応モアレアニメーションシステム

回転機構に回転によるモアレアニメーションを起こす模様を取り付けた (図 9 (上)). 幾何学模様を同心円状、放射状、波状に配置し、OHP フィルムと普通紙にそれぞれ印刷した後、円筒形クリアケースと同じ径の円状にカットした. 普通紙は上面の厚紙に張り、OHP フィルムは方位磁針にセロハンテープで接着した. 実装した 1 対 1, 多対多対応モアレアニメーションシステムの全体像を図 9 (下) に示す. 振り子吊り下げ用のテグスは全長 170cm とし、入力部と出力部の振り子はそれぞれ左から順に 25cm, 45cm, 60cm、入力部と出力部では間隔を 30cm あけ、入力部と出力部の振り子はそれぞれ 20cm 間隔で並べた.

入力部の振り子を振ってから、平均して 60 秒後に出力部の振り子が大きく揺れることが分かり、1 対 1, 多対多の入出力が対応することを確認した. また、ユーザーが意図した出力先を揺らすことができ、モアレアニメーションが起こせた (図 10). しかし、入力していない振り子も小さく揺れてしまった. この揺れは意図して揺らそうとした時よりも小さかった. これは振り子の長さの違いが 15cm または 20cm と短く、共振周波数が近くなることや、そもそも振り子の長さが十分長くなく不安定であるという可能性がある.



図 9 モアレ回転機構(上)とシステム全体像(下)



図 10 モアレ縞が変化している様子

6. おわりに

本研究では動的な出力を無電力で行え、システムを空間に展開することで入力部から離れた地点でユーザーが自由に一定時間反復的に動作する出力先を配置できるシステム、Pendulum Resonator を提案し、ユーザーの周りの空間を演出する応用例を紹介した。提案したシステムでは振り子の長さの細かい調整が必要であり、調整時間を長くとる必要があることや、意図していない出力の振り子も揺れてしまうなどの改善点がある。これらを改善し、より安定した Pendulum Resonator を使い様々な応用をしていくことを目指す。また、細かい調整を必要とせずにユーザーが簡単に様々な入出力を試すことが出来るモジュールの作成をすることで、拡張性を増し、様々な場面で誰もが簡単に使えるシステムにしていきたい。

参考文献

- [1] “目標 7 のターゲット”。
<https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/7-energy/>, (参照 2022-12-07).
- [2] Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, and Hiroshi Ishii. bioLogic: Natto Cells as Nanoactuators for Shape Changing Interfaces. CHI'15. 2015, Vol. 33, pp. 1-10.
- [3] Hila Mor, Tianyu Yu, Ken Nakagaki, Benjamin Harvey Miller, Yichen Jia, and Hiroshi Ishii. Venous Materials: Towards Interactive Fluidic Mechanisms. CHI'20. 2020, Vol.2020, pp.1-14.
- [4] Kentaro Yasu, MagneShape: A Non-electrical Pin-Based Shape-Changing Display, UIST'22, 2022, Vol. 71, pp. 1-12.
- [5] Peter Bennett, Stuart Nolan, Ved Uttamchandani, Michael Pages, Kirsten Cater, and Mike Fraser. Resonant Bits: Harmonic Interaction with Virtual Pendulums. TEI'15. 2015, Vol.9, pp.49-52.
- [6] “syncrowd シンクラウド”。<https://nor.tokyo/syncrowd>, (参照 2022-12-07).
- [7] “PENDULUM”。<https://lucyguerininc.com/works/pendulum>, (参照 2022-12-07).
- [8] “SONIC PENDULUM with Yuri Suzuki 環境音から AI が音楽を生成するサウンド・インスタレーション”。<https://qosmo.jp/projects/sonic-pendulum/>, (参照 2022-12-07).
- [9] “Position -手紙からの採集”。<http://kataoka-iwatake.tank.jp/kinetic.html>, (参照 2022-12-07).