

Animated paper 2: 二次元通信を用いたテーブル上を動く紙

坂本菜月^{†1} 安謙太郎^{†2} 牧野泰才^{†1} 稲見昌彦^{†1}

本稿では、ペンやはさみを使い造作した紙を、その創作環境において動かす機構を提案する。創作環境としてのテーブルに二次元通信動作シートを備え、紙の動作に必要なエネルギーを供給する。供給されたエネルギーは紙に貼付された薄膜アンテナを通して無線供給され、アンテナに接続された形状記憶合金が収縮することでこのような動きを与える。このとき、紙に貼られた傾斜パイル地のシートが移動方向を決定し、前進することができる。これにより紙の薄く、軽いという特性を阻害することなく動く紙を実現した。

Animated Paper 2: Paper Crawling on the Table Using 2D Communication System

NATSUKI SAKAMOTO^{†1} KENTAROU YASU^{†2}
YASUTOSHI MAKINO^{†1} MASAHIKO INAMI^{†1}

We propose a system that makes a sheet of thin and flat paper crawl on the table using two-dimensional communication system. A thin aluminum antenna attached on the movable paper absorb the energy from two-dimensional communication sheet. When the energy goes through to a SMA(Shape Memory Alloy) connecting to the antenna, the SMA shrink produces paper movement. Furthermore, the direction of movement can be also controlled by the inclined pile material attached on the underside of the paper. In this paper, we outline its composition and a simple test.

1. はじめに

本稿では、紙工作感覚で創作でき、そのままテーブル上で動作させることができる機構 Animated Paper 2 の構成手法について述べる (図 1)。ユーザはペンや鉛筆で図柄を書き込み、はさみを使って造作した動作体を、それまで作業していたテーブル上で触れながら動作させることができる。

知識や経験がなくともテーブル上などで簡単に動作するものを創造するための提案はこれまでも数多くされている。例えば、初心者でも扱えるようハードウェアとソフトウェアをプラットフォーム化したマイコンボード arduino[1]や、また回路の知識を持たないエンドユーザでも扱えるよう電子部品をモジュール化した装置 littleBits[2]などがあり、これらは創造性教育ワークショップやプロトタイプ作成に利用されている。

一方で専用のブロックやモジュールから離れ、生活に身近な素材を構造体として動きを構成する提案もされている。例として布にディスプレイとしての役割を与える Sprout I/O [3]やぬいぐるみに動きを与えるデバイスが挙げられる [4]。その中でも特に注目されている素材が紙である。紙は、柔軟で扱いやすく、しかし折りによっては剛性も得られ、また安価で汎用性も高い素材である。その性質により、家庭や小学校、幼稚園などでの創作にも汎く利用されている。その加工の容易さや、小さい出力のアクチュエータを用いても動作が可能なることから、紙を構造体とした動きのディスプレイとしての提案や、創造を支援するツールキットとしての提案がされている [5][6][7]。

しかし、Animated Paper[5]にて提案された手法では、動作に必要なエネルギーを高出力レーザーの照射によって環境側から供給するため、動作環境は人間から隔離され、動作中、創作した動作体にユーザが触れることはできなかった。

そこで、本稿で提案する Animated Paper 2 では、手で触れながら創作でき、その場で動かすことのできる紙の構成手法について述べる。本機構では創作環境と動作環境を分けることなく、複数人に対して開けた作業の場でありエネルギー供給の場としての機能も持たせるべく、そのエネルギー供給手法として二次元通信シート「株式会社セルクロス」[8]を用いた。これにより個別で創造できる動きのデザインだけでなく、複数の人間による創造によるアイデアやイメージの共有を実現しコミュニケーションを行うためのメディアとなることを目指す。動作体側には薄膜アンテナおよび回路が貼付されており、作動に必要なエネルギーはユーザに影響を与えることなく供給される。このシステムを用い、紙の自立的な動作、およびユーザによる動作体へのリアルタイムな介入を可能にした。



図 1 Animated Paper 2

Figure 1 Animated Paper 2.

^{†1} 慶応義塾大学
Keio University

^{†2} National University of Singapore

2. 関連研究

2.1 モジュール化された装置による動作体の構成

工学的知識や経験がなくとも動作する機構を簡単に創造できるシステムは多岐にわたって提案されている。なかでも、電子部品や部品をモジュール化し、組立を容易にする手法がある。モジュールの両端に取り付けられた磁石によって正しい回路が完成する little Bits[2]や、プログラムを組み込めるブロックとパーツを組み合わせ、動作体が設計できる LEGO MINDSTORMS[9]が挙げられる。なかでもブロックの組み立てのみで動作する Topobo[10]はモデルを直接動かすことにより動作を記憶、再生を可能としているため、構成のみならず、動作のプログラミングの簡易化にも成功している。

これに対し、ブロックやデバイスによって構成される動作体から動作を生成する仕組みのみを抽出し、構造体としては身の回りに存在するものを利用する手法がある。例えば既存のぬいぐるみを傷つけずに駆動させる PINOKY[4]はぬいぐるみの手足にリング型のアクチュエータを取り付けることで任意の部位を駆動させることができ、Move-it[11]では、小型のアクチュエータを備えたクリップを付箋紙に取り付けることで、デジタルペンによって記入した日時に付箋紙を動かすことができる。

2.2 紙を構造体とする動作体の構成

前項で紹介した Move-it のように、紙に小型で軽量のアクチュエータを取り付けることで動作を生み出す提案は多くある。柔軟な紙は、小さい出力の作動素子によっても大きく作動させることができるためである。ユーザがペーパーロボットやライトをデザインできるサービス Interactive paper devices[12]や、スイッチやセンサーを組み込んだインタラクティブな飛び出す絵本 Electronic popables[13]などが例として挙げられるが、これらは電力供給に導線、もしくはバッテリーに接続することでエネルギーを得ている。安定した電力供給に配線や、バッテリー搭載は適しているが、有線でのエネルギー供給は紙工作の作動範囲を限定し、またバッテリーの搭載は稼働時間を制限する。特に、紙という構造的に弱い素材を用いた場合、大きな荷重には構造体が耐えられなくなるため、容量の大きなバッテリーを搭載しようとするれば紙の柔軟な表現を妨げることが考えられる。

2.3 無線エネルギー伝送手法

これに対し、遠隔からエネルギーを得る手法はいくつかある。VITA[14]は、ビーム状に放出された音波から電力を取得して LED を発光させることができ、それによる音の可視化を行った。また、紙飛行機に取り付けた金属ヘレーザ光を照射することで、金属アブレーションを発生させ推進力とする手法もある[15]。

これらの遠隔エネルギー伝送技術を用いることで、紙を構造体とする動作体自体にバッテリーや配線を設ける必要がなくなり、紙の柔軟性や軽量さを生かした多様な動作が可能になる。Animated paper[5]ではレーザ光の照射による加熱で、平面型ロボットに設置された形状記憶合金の加熱制御を行い、バッテリーを持たず、非常に簡易な構成の動く紙工作を実現した。また、電子レンジを利用し、照射されるマイクロ波によって作動に必要なエネルギーを得、自動的に折れ上がるポストカード POPAPY[6]がある。

これらは作動に必要なエネルギーを外部から供給されるため、非常に柔軟、軽量で構成も簡易である。しかしその作動に必要なエネルギーは空間を介して高出力で供給する必要があり、人体を損傷する恐れもあるため作動環境は人間の生活空間から隔離される。作動している間、ユーザは対象に触れることができない。

これに対して、AutoGami[7]がある。AutoGami は電磁界共鳴で遠隔電力伝送を行うことで、人間から隔離されていない環境での紙工作の作動を実現した。これにより、ユーザは自らが設計した紙工作を手で触れられる状態で作動させることが可能となった。しかし、その作動範囲は電力伝送を行うコイルの上部のみに限られており、移動動作を行う紙工作の提案は行われていない。

そこで本稿では二次元通技術を用いることで、紙工作に対して広くエネルギーを供給する場を設け、その上で移動動作を行う機構を提案する。これにより人間が触れられる環境において這うように進む紙を構成することができ、また広くエネルギー供給を行う面を設けることで複数人を対象としアイデアの共有や共創を行う場としての展開も可能になると考える。

3. システム構成

Animated paper 2 の構成は、大きく分けてエネルギー供給機構と動作体のふたつに分かれる。エネルギー供給機構は高周波発振器、ファンクションジェネレータ、二次元通信シートの3つからなる。これに対し、動作体は、ユポ紙、傾斜パイル地、形状記憶合金[16]、アルミシート、ブリッジ整流回路の5つで構成されている。

3.1 エネルギー供給機構

二次元通信シートは導電体、誘電体、メッシュ導電層の三層構造のマイクロ波伝送媒体である。発信機から同軸ケーブルを介してマイクロ波を入力すると、シート内に二次元的に波動が伝搬する。このとき、メッシュ構造を持つシート表面側にはエバネッセント場という、指数関数的に減衰する電場が生じる。この場に対して適切な近接カプラを利用することで、シート内のマイクロ波を吸収し電力として利用することが可能となる。

本稿では、310mm×600mm のシートに対し 2.4GHz 帯、最

大 11W 出力の発振器から、一点接続しエネルギー伝送を行った。発信器は外部信号により振幅変調が可能なものであり、ファンクションジェネレータによりパルス変調をかけた。近接カプラは電界結合するための金属パッチであり、導電性を持つ任意の素材を利用できる。本稿では紙にアルミシートを貼付したものをを用いて動作体の構成を行った。なお、アンテナがシートから 1cm 以上離れると、エバネッセント波の強度が低くなり給電ができなくなるため、移動方法はイモムシのように這って進む機構が適している。



図 2 システム構成

Figure 2 System composition.

3.2 動作体の動作原理

Animated Paper2 における動作体では、二次元通信シートより供給された電力で形状記憶合金を収縮させ、それにより紙を曲げることで、イモムシのような動作を実現し移動する。実際に試作した動作体を図 3 に示す。動作体はユポ紙できており、その上に電力取得用カプラのためのアルミ箔、実際に収縮する形状記憶合金、動作時の摩擦を制御する傾斜パイル地が搭載されている。前進動作を行う際、傾斜パイル地が接地面との摩擦を引き起こし、その場で滑ることなく前進することができる。

今回、試作した動作体は 2 つあり、それぞれ設置した形状記憶合金の長さを変え、異なる抵抗値を持つ。シートを中心点で、供給電力の測定を行ったところ、BMF75,50Ωでは 0.095W, BMF75,35Ωは 0.108W の電力を供給できた。これにより、紙に印刷した回路に LED を接続するとシート上どこでも点灯させることができた。

3.3 動作制御

本システムでは、2.4GHz を入力する発振器に対し、ファンクションジェネレータからパルス幅変調することで、シート上に置かれた紙に貼付した薄いアルミのアンテナを通して、回路に供給され、接続した形状記憶合金が動作に必要な伸縮運動を行う。入力された振動数で 1 回の伸縮速度が決定する。

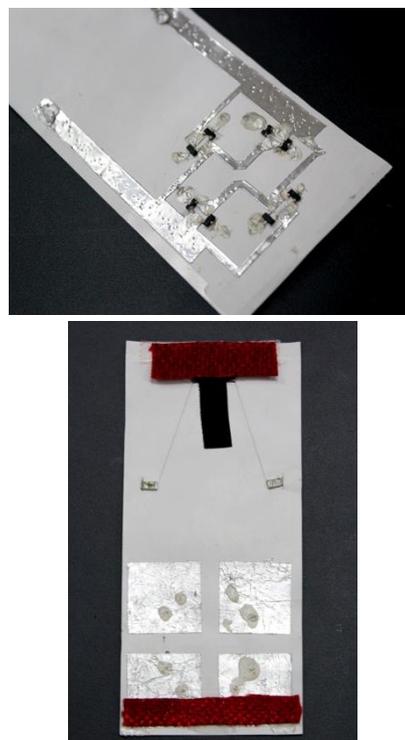


図 3 動作体 上：ブリッジ回路

下：アンテナ, 形状記憶合金, 傾斜パイル地

Figure 3 closeup of the paper

up: bridge circuit

down: antenna, SMA, inclined pile material.



図 4 前進動作

Figure 4 crawling forward motion

3.4 動作テスト

2.4GHz を二次元通信シートに入力した時にシート内に発生する定在波は 4 箇所あり、定在波の中心から離れるほど紙の動作は鈍くなる傾向がある。今回は、その中で入力地点から最も離れている (図 6) の位置で前進速度、移動に適した数値のテストを行った。

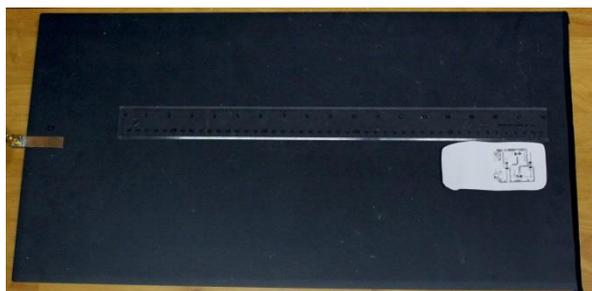


図 5 移動テスト位置
Figure 5 Tested location.

テストに使用した形状記憶合金は 10cm の BMF 75 であり、抵抗値は 50Ω である。定在波のあるホットスポットにて、約 0.17 秒の通電で最大収縮し、元の形状に戻るまで 0.4 秒を要した。これに対し、パルス幅変調周波数 1.6Hz(0.62s), 1.7Hz(0.58s), 1.8Hz(0.55s) の 3 条件において、デューティ比は 0.18 秒になるよう設定し、10 秒間の移動速度のテストを行った。本動作テストでは、通電時間を 0.18 秒と一定にし、オフの時間を変化させることでパルス幅変調の周波数を変化させた。1.6Hz(0.62s), 1.7Hz(0.58s), 1.8Hz(0.55s) の 3 条件で実験を行った。すなわち、デューティ比はそれぞれ 29%, 32%, 33% である。この条件で、10 秒間信号を与えた場合のテストを行った。



図 7 移動距離の計測
Figure 7 Measurement of moving distance.

3.5 テスト結果

10 秒間のテストで、1.8Hz が 20mm と最も長い距離を移動した。1.7Hz は僅差であったものの 10 秒間で 18mm 前進した。対して、1.6Hz は 16mm と、変調をかけた全体の時間に比例した結果が出た。定在波の真上に動作体が来たときのみ 1.6Hz が大きく前進した。

3.6 考察

定在波において、1.6Hz が大きく前進したが、他の 2 条件が、形状記憶合金の熱が完全にさめきらないまま伸縮を繰り返したためにオフ状態のときに前進に必要な摩擦を十分に得ることができなかったからである。対して、1.6Hz は、伸縮に必要な時間だけでなく、形状記憶合金の冷却時間が適度にあいたため、他と比べて大きく前進することができた。また、どの条件でもホットスポットから離れると動作が鈍くなり、その場で身を持ち上げるような上下運動を繰り返した。これは長距離の移動には、動作体に貼付したアンテナの数を増やし、それに伴う動作体の拡大も検討

される。もしくは、発振器の発する周波数をコントロールし、定在波の位置を自由に移動させる必要があることを示唆している。

4. 課題と今後の展望

本手法により、テーブルの上で紙工作感覚で創作でき、そのままテーブル上で作動、這うように移動することができる紙を構築した。しかし、現在の構成では動きのコントロールがオンオフのみに制限され、自在に動きを操るまでには至らなかった。また、移動速度に関して、形状記憶合金の収縮率と耐荷重量に大きく左右されるため、力の小さな BMF ではなく BMX での動作も検討している。

今回の構成では形状記憶合金を動作させるにあたり、整流回路を用い直流電流によって動作させたが、形状記憶合金は、交流電流での動作も可能であることから、アンテナおよび回路の簡略化も期待できる。また、二次元通信シートは、電力伝送のみならず情報送信できることから、アンテナ別に動作のコントロールが可能であることも期待される。今後、ユーザに紙工作感覚で、動きを創作してもらうために、動作を拡張するモジュールの提案が必須である。また、工作だけでなく動作体を通した複数の人間同士に対し、自然とコミュニケーションが生まれる仕組みの提案も行う必要がある。

5. 結論

本研究では、紙の薄く柔軟な特性を阻害することなく、紙工作感覚で創作でき、テーブルに設置した二次元通信シート上を、這うように移動させることができる紙を実装した。また、這うように移動する手法に最適な実測値のテストを行った。紙のアンテナによって LED の点灯はシート全体でできたが、移動に関しては定在波の近辺にとどまった。

謝辞

本研究は総務省、SCOPE の支援により行われた。

参考文献

- 1) Arduino. <http://www.arduino.cc>.
- 2) Bdeir, Ayah. "Electronics as material: littleBits." Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction. ACM, 2009.
- 3) Coelho, Marcelo, and Pattie Maes. "Sprout I/O: a texturally rich interface." Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction. ACM, 2008.
- 4) Yuta, Sugiura, et al. "PINOKY: a ring that animates your plush toys." Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2012.
- 5) Naoya, Koizumi, et al. "Animated paper: A toolkit for building moving toys." Computers in Entertainment (CIE) 8.2 (2010): 7.
- 6) Kentaro, Yasu, and Masahiko Inami. "POPAPY: instant paper craft made up in a microwave oven." Advances in Computer Entertainment.

Springer Berlin Heidelberg, 2012. 406-420.

7) Zhu, Kening, and Shengdong Zhao. "AutoGami: a low-cost rapid prototyping toolkit for automated movable paper craft." Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013.

8) セルクロス株式会社 <http://www.cellcross.co.jp/>

9) LEGO MINDSTORMS. <http://education.lego.com/>

10) Raffle, Hayes Solos, Amanda J. Parkes, and Hiroshi Ishii. "Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory." Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. ACM, 2004.

11) Probst, Kathrin, et al. "Move-it: interactive sticky notes actuated by shape memory alloys." CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2011.

12) Saul, Greg, Cheng Xu, and Mark D. Gross. "Interactive paper devices: end-user design & fabrication." Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction. ACM, 2010.

13) Qi, Jie, and Leah Buechley. "Electronic popables: exploring paper-based computing through an interactive pop-up book." Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction. ACM, 2010.

14) Kentaro, Kimura, et al. "VITA: Visualization system for Interaction with Transmitted Audio signals." ACM SIGGRAPH 2011 Posters. ACM, 2011.

15) 武田和也, 河島信樹, and 矢部恭一. "レーザーエネルギー伝送の小型無人飛翔体への応用." 宇宙技術 7.0 (2008): 27-32.

16) 形状記憶合金 トキ・コーポレーション <http://www.toki.co.jp/>