

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14202

研究課題名(和文)ペーパーメカトロニクス基礎研究

研究課題名(英文)Basic research of paper mechatronics

研究代表者

橋本 周司 (Shuji, Hashimoto)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60063806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、紙に印刷するだけで、立体構造、回路、アクチュエータ、電源のすべてを製作する『ペーパーメカトロニクス』という新技術確立のための基礎研究である。我々は、これまでに、紙に高揮発性インクと有機アクチュエータを印刷して、自律的に立体構造を形成することに成功している。本研究ではさらに駆動部分の印刷による製作に挑戦した。機械系の連続的な駆動には繰り返し伸縮など周期的な運動の生成が不可欠である。

そこで、電鈴に着想を得た電気機械式の自励振動機構、および、電気流体現象による非線形自励振動による周期的な運動の生成を試み、紙に印刷するだけで運動するメカニズムの作製が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)： This research is a fundamental research to establish a new technology called "paper mechatronics" that creates three-dimensional structures, electrical circuits, actuators, and power sources by only printing on paper with specified inks. We have already succeeded in autonomous forming of a 3D structure by printing a volatile ink on paper. In this research we challenged to create an actuation mechanism by printing. Periodic motion such as repeated expansion and contraction is required for the continuous driving of mechanical system. Therefore, we tried two methods to generate periodic movements. One is an electromechanical self-excited vibration mechanism which was inspired by electric bell. Another is a nonlinear self-excited vibration due to electro-fluid phenomenon. Both method were examined in the experiments and proved to be possible to implement motion mechanism by just printing on paper.

研究分野：計測・情報工学

キーワード：印刷デバイス 電気流体現象 自励振動子 リミットサイクル ペーパーメカトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

3D プリンタの低価格化などによりロボットを構成する部品を簡単に製造できる環境が整備されている。しかしながら、製作された部品の組立てには人の手や組立ロボットが必要となる。これに対して、自動的に部品が組み上がる印刷法による自動組立型ロボットの提案がされている[1]。しかしながら、高価で大規模な装置あるいは特殊な装置を必要とし、また、駆動するための機構の組み込みは従来と同様であるなど、駆動部も含めて部品製作から組立てまでを印刷のみによって実現するものではない。本研究では、制御に不可欠なマイクロコントローラなどの電子部品は使用せずに動作するインテリジェントメカニズムを印刷のみで製作する手法を検討した。

### 2. 研究の目的

機械系の連続的な駆動には繰り返し伸縮など周期的な運動の生成が不可欠である。また、メカトロニクスではマイクロコントローラによる制御が通常であるが、現状の印刷技術では集積回路を作製することは難しい。そこで我々はシステムの自励振動による駆動制御を試みた。具体的には以下2つの自励振動現象に着目した。

(1) 電鈴に着想を得た自励振動機構

(2) 電気流体現象による非線形自励振動子  
どちらも電気系と機械系が結合することによって自励振動が創出されるものである。

### 3. 研究の方法

メカニズムの物理的な構造形成には、紙の自律的な折れ曲がり現象を利用する[2]。適切なインクを用いて、紙にインクジェットプリンタで印刷する。印刷した線に沿って紙が自律的に折れ曲がり、立体構造を形成できる。また、インクジェットプリンタとカッティングプロッタを用いることによって、複雑な立体構造を形成する技術も既に開発した[3]。プリンタとプロッタはどちらも低価格かつ無版であるという利点を有することから、3Dプリンタより簡便に立体構造の形成が可能である。

形成された立体構造に基づいて自励振動を生成するために2通りの手法を検討した。第1は電鈴に着想を得た自励振動機構である。図1のようにヒンジとコイルと磁石が基本要素である。電流によってコイルに発生した電磁力が、対向する面の磁石に力を及ぼして導電性部分を引き付ける(図1上)。結果として回路が開き電流が流れなくなる(図1下)、そうするとヒンジ部の復元力によって元の状態に戻り、再び電流が流れだす。これを繰り返すことによって直流電源から自励振動を誘起できる。このメカニズムの課題は、強い吸引力を発生するために大きな電流と強い磁石を要する点であり、紙素材の曲げからの復元力との関係も考慮する必要がある。

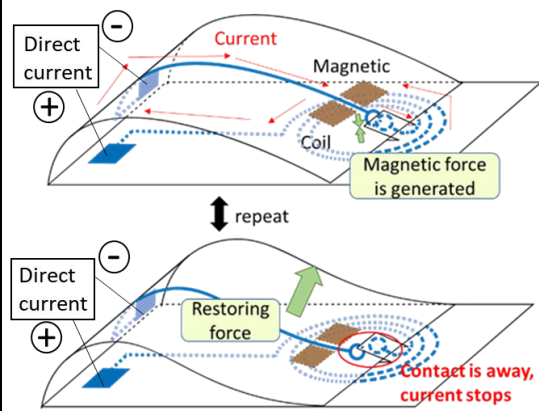


図1. 電鈴に着想を得た自励振動機構

第2は電気流体現象による非線形自励振動である。紙上に印刷した配線を絶縁性流体に浸し、高電圧を印可することによって液体が流動する。この流動現象を電気流体現象と呼ばれている。我々はこの流動が発生する時の反力を利用して、揺動アクチュエータを構成することを考えた。従来の印刷アクチュエータは熱あるいは静電力を利用するものが多く、高出力と高応答性を両立させることは難しかった。本研究では、液体の体積力を発生させる電気流体現象を用いることで、上記特徴を合わせ持つアクチュエータの開発に成功した(図2)。さらに、ある一定の条件下で、直流電圧を印可中にアクチュエータが自励振動する現象が確認された。この現象についての詳細な原理は解明できていないが、入力電圧を変化させることで周波数を制御できることが確認できており、印刷アクチュエータの新しい手法と考えている。このメカニズムの特徴は、高電圧かつ液中駆動ということである。

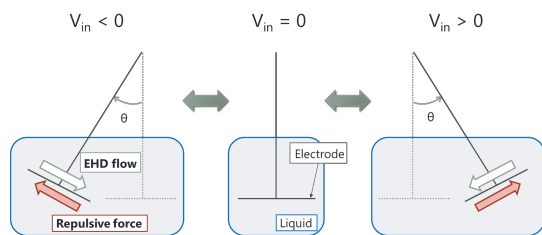


図2. 揺動アクチュエータのメカニズム

### 4. 研究成果

(1) 電鈴に着想を得た自励振動機構

電鈴機構には、電流によって磁場を発生するコイルと磁石が必要になる。コイルは写真沢紙上に円形の配線を印刷することで作製する。円形の配線に電流を流すことで中心部に磁場が発生して、コイルとして機能する。印刷コイルの磁場と相互作用を起こす磁石にはネオジウム磁石を用いた。図3に導通時に定電流 0.5A を流して自励振動させた結果を示す。紙の持つ可撓性の影響で不安定なシステムとなり、振動する周波数が一定となって

いないが、最大で 23 分間連続で自励振動を取り出すことができた。ヒンジ部に剛性の高い材料を用いるなどすることで安定化が可能と考えている。また、電流量を変化させることで磁場を大きくし、振動の周波数を調整することも可能である。

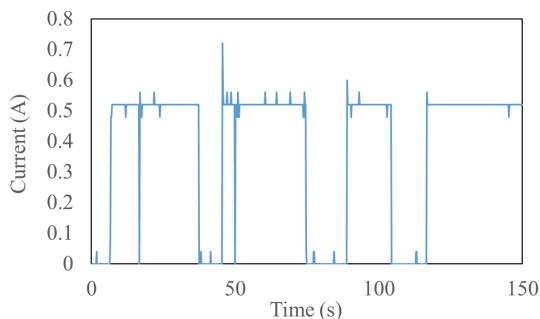


図 3. 電鈴機構によって自励振動する電流値

(2) 電気流体现象による非線形自励振動子  
配線を印刷した紙を誘電性液体に浸し電気流体现象を発生させることによってアクチュエータの揺動を引き起こす。図 4 に実験に使用したデバイスとシステムの図を示す。図 4(a)は紙面上に銀ナノ粒子を印刷したデバイスで、櫛型の配線がデザインされている。電圧を印可することによって正電極から負電極に液体が流動する電気流体现象が見られる。

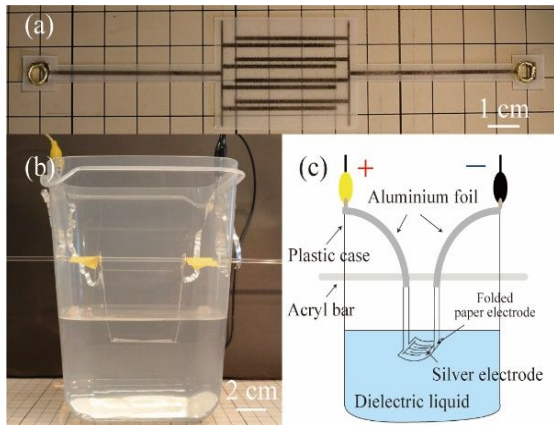


図 4. (a) 紙面上に印刷された平面ポンプ  
(b) 実験環境写真 (c) 実験環境概念図

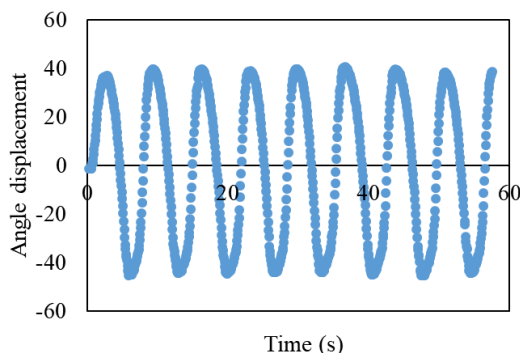


図 5. 電気流体现象による自励振動

このとき、電極を櫛型にすることによって 4 対の正負電極を構成したため、結果的に 4 対分の流れが加算された流動を取り出すことができた。このように直流電圧を加えることによって流動が生じることから印刷平面ポンプと呼ぶことができる。図 4(b)と(c)は実験系の写真と概念図である。プラスチック容器の中に印刷平面ポンプが吊るされ、絶縁性流体の中に浸されている。

図 4 にある実験系では、印刷平面ポンプのデバイスが吊られており可動なため、直流電圧を印可すると、自励振動することが確認された。図 5 に自励振動の角変位の様子を示す。印可電圧は DC8.0kV である。この振動は、振幅 84°、周期 6.9s のリミットサイクルであることが確認できた。外乱に強い頑健なシステムとなっており、外力を与えて振動を妨げても、外力を取り除くと再び元の自励振動に戻る。この振動の詳しい原理については、電磁気と流体の結合した系として理論的な解析を進めているところである。

以上のように、印刷デバイスを用いて直流信号から自励振動を発生させるインテリジェントメカニズムを開発する、という当初の研究目標は達成された。今後は原理を解明することで、振幅や周期を自在に制御できるようにしたいと考えている。また一方で、この振動現象を印刷ロボットの駆動源とすることで、外乱に強い移動ロボットの印刷のみによる自動製作を検討中である。

#### [参考文献]

- [1] Samuel M. Felton et. al, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 277-282 (2013).
- [2] H. Shigemune, S. Maeda, S. Hashimoto et. al, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no.6, pp.2746-2754 (2016).
- [3] H. Shigemune, S. Maeda, S. Hashimoto et. al, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1091-1096 (2015).

#### 5. 主な発表論文等

研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{ 雑誌論文 } (計 0 件)

{ 学会発表 } (計 3 件)

1. H. Shigemune, Y. Kuwajima, Y. Matsushita, S. Maeda, V. Cacucciolo, M. Cianchetti, C. Laschi, H. Sawada, S. Hashimoto and S. Sugano, "Swinging Paper Actuator Driven by Conduction Electrohydrodynamics," 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and

Biomimetics (ROBIO), Macao, DOI:  
10.1109/ROBIO.2017.8324447, 2017.

2. H. Shigemune, S. Maeda, Shuji Hashimoto and Shigeki Sugano, "Simultaneous printing of multiple origami structures," 2017 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), DOI: 10.1109/MHS.2017.8305175, 2017.

3. 橋本 周司, "ヒューマノイドからガンダムまで," エレクトロニクス実装学会 ミッションフェローセッション「AI は敵か味方か?」, 2017年(招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

橋本 周司 (HASHIMOTO, Shuji)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号： 60063806

### (2)研究分担者

前田 真吾 (MAEDA, Shingo)  
芝浦工業大学・工学部・准教授  
研究者番号： 40424808

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )