

# Liquid Pouch Motors : 紙のインタフェースのための薄く軽く柔軟なアクチュエータ

鳴海 紘也<sup>\*†</sup> 中原 健一<sup>\*</sup> 佐藤 宏樹<sup>\*</sup> 新山 龍馬<sup>\*</sup> 川原 圭博<sup>\*</sup>

**概要.** 従来の空気圧を利用した平面アクチュエータは、重くかさばるチューブがついていることで、本来の薄さ・軽さ・柔軟さを損ねていた。本論文では、空気圧アクチュエータからチューブを廃することによって、紙のように薄く軽く柔軟で、34℃以上の熱を加えることにより自重の1000倍以上の負荷を約30%引張ることのできるアクチュエータ、Liquid Pouch Motorsを提案する。ファブリケーションは簡単であり、CNCで制御したはんだごてまたはヒートシーラがあれば、(手のひらサイズの場合)通常10分程度で簡単に作製できる。また、印刷できる回路に貼り付けることにより、従来提案されてきたタッチセンサなどと一体化させて使用することができる。更に、透明・大量生産が可能・無配線でも駆動できるなどといった利点を生かして、知的な壁材インタフェースとしての応用例も提案する。

## 1 はじめに

ノート・本・トイレットペーパー・壁材など、紙は日常生活に溢れている。また紙は平面的な形状であるため、切る・折る・巻き取る・表面に色を塗るなど、様々な方法で簡単に加工できる。Human Computer Interaction (HCI) の分野では、これらの点に着目する形で、紙を用いた電気回路インタフェースがさかんに研究されている。例えば、我々は過去に、銀ナノインクと市販のインクジェットプリンタを用いることで、センサやアンテナを早く正確に試作できることを示した [3]。また加藤らは、インクジェット印刷された回路を用いてタッチセンサを拡張できるシール [2] などを提案している。

紙または紙のような軽く薄く柔軟な物体をインタフェースとする上で、物体の自発的な動きやリアクションを実現するアクチュエータを実装しようとする研究は多数存在するが、それらは基本的に2つの方式で分類できる。

1つ目は、複合素材の熱膨張率の違いや熱可塑性樹脂の形状記憶効果など、素材自体の膨張や収縮を利用するタイプである。例えば、Printed Paper Actuator [8] では、3Dプリンタで使用されるポリ乳酸 (polylactic acid, PLA) などの熱可塑性樹脂を、比較的熱で膨張しづらい素材である紙に重ねてコンポジットとすることで、熱による形状記憶効果で変形させる。これらの方式の利点は実装のしやすさである。基本的に、熱膨張率の異なる薄い素材を張り合わせれば曲げが実現できる。また、電気(電熱)で駆動できることも利点と言える。一方欠点は、出せる力の小ささや、伸縮方向のアクチュエーション

が難しい点である。

紙をアクチュエータとする2つ目の方式は、空気圧アクチュエータであり、主に Pouch Motors または Peano Actuators と呼ばれるものが利用される。これは薄い2枚のシートを熱で溶着し、その中にチューブから空気を送り込んで膨らませるものである。空気圧アクチュエータとしては薄く柔軟な形状であることから、紙の表面などに貼り付ける活用方法が見出されている [7][6]。これらの空気圧アクチュエータの利点は、高速で強い力を出せるという点である。一方欠点は、常に重くてかさばるチューブにつながっているということである。これによって紙の薄さ・軽さ・柔軟さなどといった特徴は大きく損なわれる。

そこで本論文では、上記の2つの手法、すなわち、電気駆動できて薄型の熱膨張式アクチュエータと、強い力が出せる空気圧アクチュエータの「いいところ取り」を目指し、紙のように薄く軽く柔軟で、34℃以上の熱を加えることにより自重の1000倍以上の負荷を30%以上引張ることのできるアクチュエータ、Liquid Pouch Motorsを提案する。ファブリケーションは単純であり、CNCで制御したはんだごてまたはヒートシーラがあれば、(手のひらサイズの場合)通常10分程度で簡単に作製できる。また、印刷できる回路に貼り付けることにより、従来提案されてきたタッチセンサや電熱パターンなどと同時に使用することができる。更に、透明・大量生産が可能・無配線でも駆動できるなどといった利点を生かして、知的な壁材インタフェースとしての応用例も提案する。

なお、本提案と同様に、予め Peano Actuators に液体を封入しおき、パウチの両側から高電圧を印加してパウチを押しつぶし、内部の液体の場所を制御することで駆動する HASEL actuators [1][4] という

Copyright is held by the author(s).

\* 東京大学 大学院情報理工学系研究科

† 日本学術振興会特別研究員 (DC)

ものが存在する。しかし、これらのアクチュエータを実装すると、理論上パウチ内部の体積の50%を液体で満たさなければならない(後述するが、本提案の約78倍の体積の液体を封入する必要がある)ため、非常に厚く重く、紙のように扱うことは不可能である。また、これらのアクチュエータは1 kV以上の高電圧を用いる必要がありインタフェースとしては安全性に問題があること、駆動源が電気に限られることなどから、本提案とは目標が根本的に異なる。本研究の貢献は以下ようになる：

1. Liquid Pouch Motors の原理と作製方法を述べた
2. アクチュエータとしての機械的特性を調査した
3. 銀ナノインク回路に貼り付けることでタッチセンサや電熱線と一体化できることを示した
4. 環境中のエネルギーを利用した壁材インタフェースを提案した

以降の章では Liquid Pouch Motors の概要、ファブリケーションプロセス、基礎実験と評価、アプリケーションを説明し、最後に限界と今後の発展性について述べる。

## 2 Liquid Pouch Motors

Liquid Pouch Motors は、Pouch Motors の内部に低沸点の液体である 3M Novec 7000 を少量注入したものである。なお、Novec は電子部品の洗浄などに使用する液体であり、毒性や可燃性は無く安全である。図 1 に示す通り、低温の時、パウチ内部はほぼ液体で満たされている。しかし加熱して 34 °C を超えると、内部の液体が沸騰し体積が膨張することによって駆動する。液体を予め内部に閉じ込めておくことで、従来の Pouch Motors で必要だった空気チューブが不要になっている。次に、図 2 には、基本的な駆動方式を示す。図 2A は解析に必要なパラメータ、図 2B は曲げの駆動方式、図 2C は直線の

駆動方式をそれぞれ示している。駆動時、曲げの際にはトルク  $M$ 、直線の際には力  $F$  が取り出される。なお過去の文献 [6] から、パウチの体積  $V$  と  $M$ 、 $F$  はそれぞれ

$$V(\theta) = \frac{L_0^2 D}{2} \left( \frac{\theta - \cos \theta \sin \theta}{\theta^2} \right) \quad (1)$$

$$M(\theta) = L_0^2 DP \frac{\cos \theta (\sin \theta - \theta \cos \theta)}{2\theta^3} \quad (2)$$

$$F(\theta) = L_0 DP \frac{\cos \theta}{\theta} \quad (3)$$

と表されるので、これに加えて、内部の液体の状態方程式

$$PV = nRT \quad \therefore V = \frac{nRT}{P} \quad (4)$$

を代入すれば  $M$ 、 $F$  が求められる。ただし  $n$  [mol] はパウチ内部の物質質量、 $R$  は定数である。

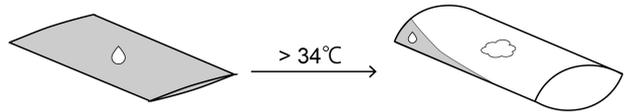


図 1. Liquid Pouch Motors の駆動原理。内部温度が液体の沸点以上になると気化しパウチが膨らむ。

## 3 ファブリケーション

### 3.1 概要

図 3 に示すとおり、Liquid Pouch Motors のファブリケーションには 2 つの方法がある。1 つ目(図 3A) は試作用途の方法である。CNC 制御されたアームにはんだごてを搭載し、熱で融着する 2 枚のフィルムをつなげる。その後、注射器で液体を注入し、その穴をヒートシーラで閉じる。この方式の場合、予め作成した Illustrator 等のデータで簡単に自由形状を実現できる。2 つ目(図 3B) は大量生産

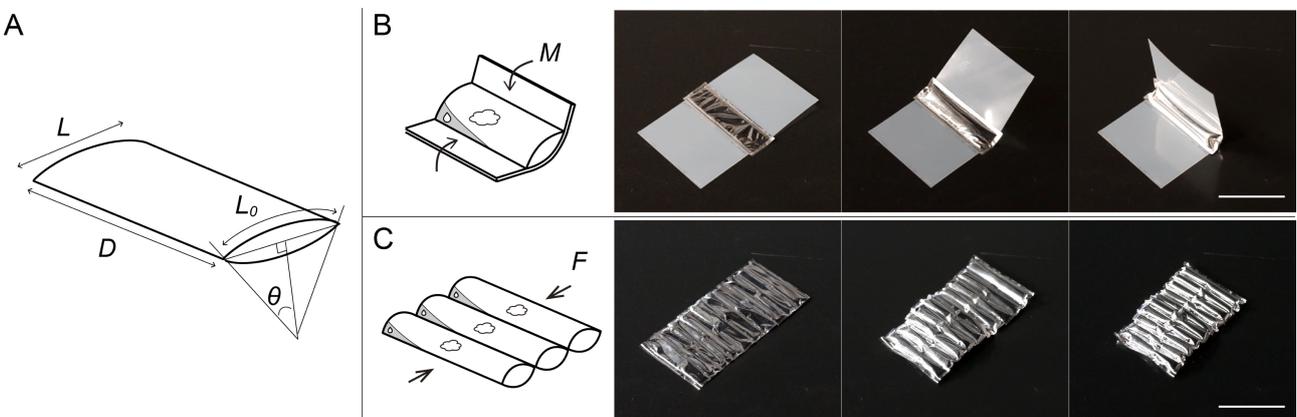


図 2. A: パウチのパラメータ, B,C: それぞれ曲げと直線の基本的な動作。スケールバーは 5 cm

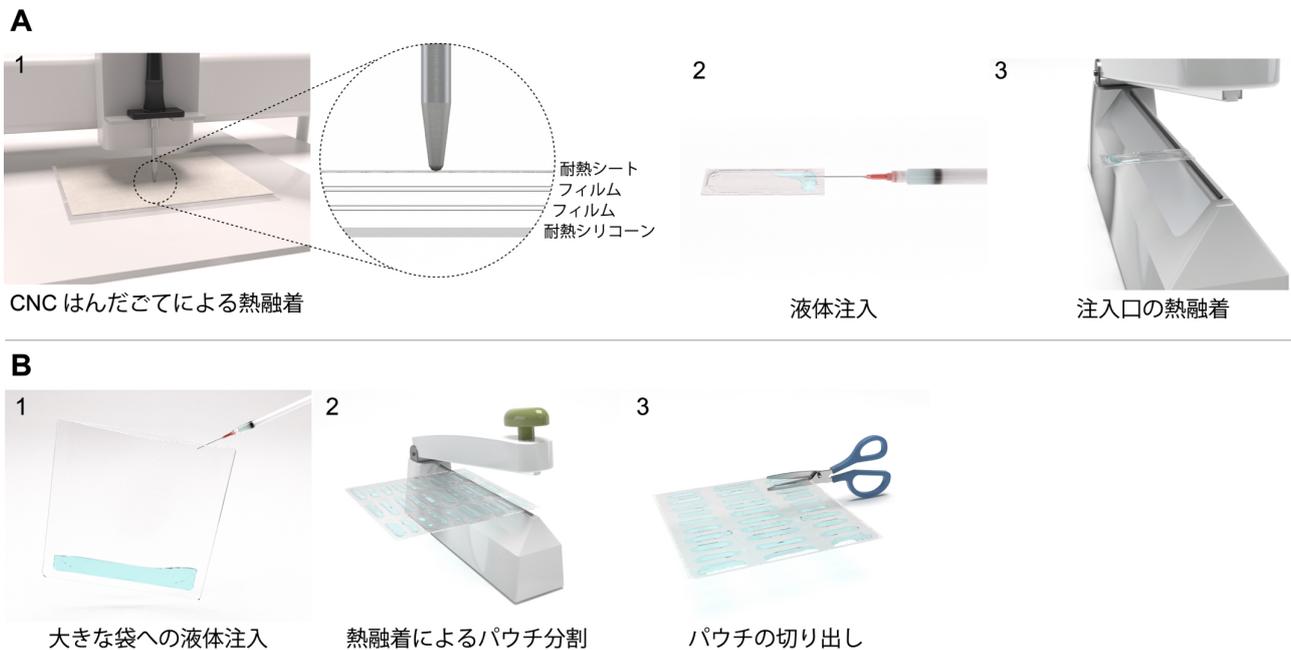


図 3. ファブリケーションプロセス. A: 試作用途. コンピュータ数値制御 (computerized numerical control, CNC) されたはんだごてで 2 枚のフィルムを融着する. B: 大量生産用途. 予め 3 辺を閉じた大きなパウチに液体を注ぎ、流れ作業で小さなパウチを作製する.

のための方式である. 予め大きな袋上の熱融着フィルムに液体を入れておき, それを流れ作業で融着していく. この方式では原理上長方形など単純な形状しか作製できないが, 必要な道具が安価で改造の必要もないというメリットも存在する.

### 3.2 フィルムの選定

使用するフィルムは, 図 4 に示すような 2 層か 3 層のフィルムを用いる. 熱融着層は熱によって 2 枚のフィルムを互いに繋げる役割をする. 耐熱層は熱融着の際に穴が空かないようにする. ガスバリア層はなくても機能するが, この層があると気体の出入りを防ぐため長期間の使用には必要である. 通常の空気圧アクチュエータとは違い, 本提案の手法では液体と気体が常にパウチの内部にとどまっている必要があるため, ガスバリア層は重要である.

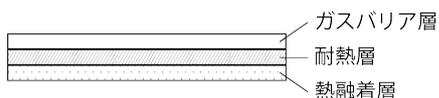


図 4. フィルムの 3 層構造

本論文では 2 種類のフィルムを用いた. 1 つ目は金属光沢を持つアルミニウム蒸着のフィルム (厚さ 28  $\mu\text{m}$ , 28 ミクロンアルミ蒸着フィルム, 夢ふうせん) で 2 つ目は透明な EVOH 蒸着のフィルムである (厚さ 50  $\mu\text{m}$ , ノンキャッチ, 共同印刷). 表 1 に

各層の組成を示す. 一般的な傾向として, 薄いフィルムの方が駆動に必要な仕事が小さい分強い力で早く動き出す. しかし厚みがある方が耐久性に優れるのでトレードオフの関係がある.

表 1. 2 種類のフィルムと各層の組成

	金属 (28 $\mu\text{m}$ 厚)	透明 (50 $\mu\text{m}$ 厚)
ガスバリア層	アルミニウム	EVOH
耐熱層	ナイロン	ナイロン
熱融着層	ポリエチレン	EVOH

### 3.3 液体の量

ここではパウチの内部に入れる液体の量を考える. もしも液体が十分に入っていないならば, 適度に温めてもパウチが限界まで膨らまない一方で, もしも液体を入れすぎると, 駆動に必要なエネルギーや全体の重量, コストが大きくなってしまふ. そこで, ここでは「パウチの体積が最大まで膨らむ最小の液量」を考察する.

仮にパウチの内部が気体で満たされて体積が最大値  $V_g$  [ $\text{m}^3$ ] になっているとすれば, 内部の気体の物質質量  $n_g$  [ $\text{mol}$ ] は式 (4) より

$$n_g = \frac{P}{RT} V_g$$

となる. そこで内部の物質の質量  $m$  [ $\text{kg}$ ] は

$$m = M n_g \times 10^{-3}$$

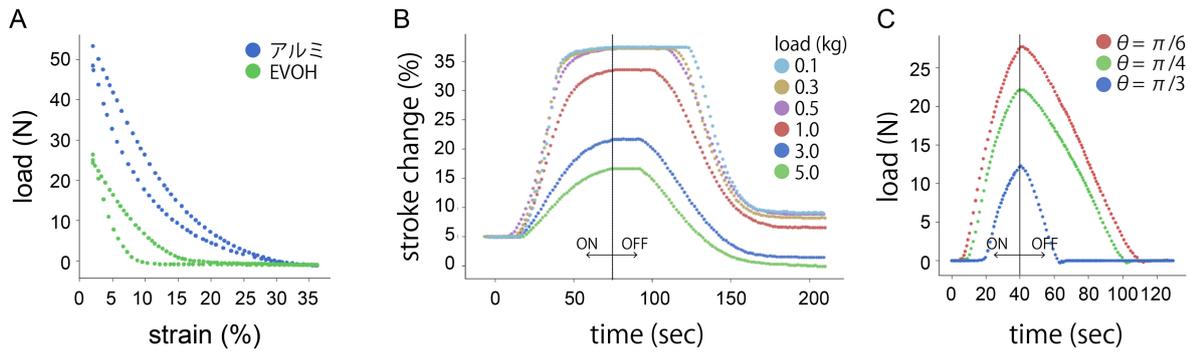


図 5. Liquid Pouch Motors の性能. B, C の ON・OFF は 5W の電熱を発生させて駆動させているかどうかを示す

表 2. 取り出したい気圧と、その際に必要な液体の体積比

	0 kPa	50 kPa	100 kPa
$V_i/V_g$	0.64%	0.95%	1.27%

と表される. ここで  $M$  [g/mol] は内部の物質のモル質量である. そのため, 使用する液体の密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] がわかっているならば, 内部に入れるべき液体の体積  $V_i$  は

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{m}{\rho} \\ &= \frac{M}{\rho} \frac{P}{RT} V_g \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (5)$$

となる. 特にパウチが長方形である場合, 式 (1) より, 式 (5) は以下のように表される.

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{M}{\rho} \frac{P}{RT} V \left( \frac{\pi}{2} \right) \times 10^{-3} \\ &= \frac{M}{\rho} \frac{P}{RT} \frac{L_0^2 D}{\pi} \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (6)$$

例えば, 常温常圧 ( $T = 273$  K,  $P = 1013 \times 10^2$  Pa,  $\frac{RT}{P} = 22.4 \times 10^{-3}$ ) を仮定した上で, 式 (6) に Novec 7000 の物性値である  $M = 200.0548$ ,  $\rho = 1400$  と, パウチのサイズ  $L_0 = 0.015$  m,  $D = 0.045$  m を代入した場合, パウチを最大まで膨張させるのに必要な最小の液量は約 21  $\mu$ L となる. なお, この仮定の下では, 最小の  $n$  で  $\theta$  を最大値 ( $= \frac{\pi}{2}$ ) にすることができるもの, 式 (2)(3) より,  $M(\theta)$  と  $F(\theta)$  の値も最小になってしまう. しかし実用上は, 負荷に対してある程度の力を発揮することが必要なので, 次に従来の空気圧アクチュエータと同等の力  $M(\theta)$  と  $F(\theta)$  を出すにはどの程度の液量が必要であるかを述べる. 例えば, 100 kPa の空気圧を加えられた従来の Pouch Motors と同じ力を出すことができる Liquid Pouch Motors を作製したい場合には, 式 5 に  $P = 1013 \times 10^2 + 100 \times 10^3$  を代入すればよい. この時, 必要な液量は 2 倍程度となり,

前述のサイズの場合には約 41  $\mu$ L となる. 表 2 に, 一般的な小型の空気ポンプで印加できる 0, 50, 100 kPa で駆動した空気圧アクチュエータと同等の力を発揮する液量の体積比を示す. ここから, 液体を入れるとは言っても, その量は非常に小さく, 液体がパウチの柔軟性や重量に及ぼす影響はほぼ無視できることがわかる.

### 3.4 駆動温度の調整

本稿では使用する液体として Novec 7000 (沸点 34 度) を利用したが, 実際のアプリケーションによっては異なる温度での駆動が必要な場面も存在する. より高い温度での駆動を実現するのは容易であり, Novec シリーズの Novec 7100 (沸点 61 度) や Novec 7200 (沸点 76 度) などを使用できる. Novec 7000 と同様に, 実用上の毒性や可燃性はない. また, これらの液体を混合することで沸点を擬似的に調整することも可能である. その他, 安全性は低下するが, 簡単な実験程度であればエタノール (沸点 78 度) などを利用してもよい. 一方, より低い温度での駆動に関しては, 安全かつ入手が用意で, 34 度よりも沸点の低い液体を発見できていないため, 現状では実現していない.

## 4 評価

この章では Liquid Pouch Motors の性能を評価する. 使用したフィルムはアルミニウムで, 形状は 25 mm  $\times$  100 mm, 質量は 0.93 g である. 液体の量は 50 kPa の空気圧アクチュエータと同等の 190  $\mu$ L とした. 図 5 に各機械特性を示す. 図 5A はパウチの縮みに対して取り出せる力  $F$  を表している. アルミニウムパウチと EVOH のフィルムを比較した場合, アルミニウムの方が薄い素材であるために強い力が引き出せ, 最大で約 50 N (約 5 kg 程度) の力を出せることが分かった. そのため, 以降の実験は全てアルミニウムのフィルムで行った. 次に, 図 5B は, 5W の電力を送った時, 時間経過に対してどの程度縮むかを示している. ここから, 駆動から 50

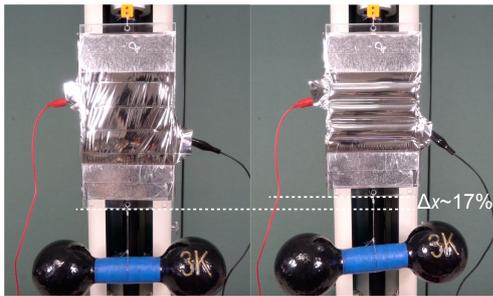


図 6. 2.79 g のパウチで 3kg の鉄アレイを上げる様子

秒程度で、重さ 5 kg の物体を自分の長さの約 17% 引っ張れることが分かる。最後に、図 5C は予めパウチをたるませた状態で駆動をオンにした場合、どの程度の力を出せるかを示している。ピンと貼っている方が力が出ることが分かり、この結果は図 5A や式 3 と傾向が一致している。以上から、かさばって重いチューブが無い 1 g 以下のパウチでも、自重の数千倍の力を発揮できることが示された。参考として図 6 には、実験に用いたパウチを 3 つ連ねた状態（パウチの質量 2.79 g）で、重さ 3 kg のダンベルを持ち上げる様子を示す。

## 5 アプリケーション

この章では、Liquid Pouch Motors の特性を利用したアプリケーションを紹介する。

### 5.1 銀ナノインク回路との組み合わせ

Liquid Pouch Motors は、従来の空気圧アクチュエータのようなチューブを必要とせず、フレキシブル回路上の電熱パターンによって発生する熱で駆動することが可能であるため、フレキシブル回路との親和性が高い。また、紙と同程度に薄く柔軟であるため、紙の動きを阻害しない。また、ほぼ体温と同程度の 34°C で駆動できるため、人間の肌がアクチュエータに接触するような場面で利用しても安全である。図 7 にはこれらの特性を用いたチョウ型ロボットを示す。チョウの背中には銀ナノインクで電熱パターンが印刷されており、その上に耐熱両面テープ (3M 444) を用いてパウチが貼り付けられている。図 3A で示した通り、回路だけでなくパウチ自体も CNC で作製できるため、全身を印刷で作製したロボットだと考えることもできる。

また、図 8 には、タッチセンサを一体化したハエトリソウ型インタフェースを示す。これは指を乗せると葉が閉じるように設計されている。従来のロボットの製造プロセスであれば、配線・電熱線・タッチセンサ・アクチュエータは別々のパーツを買ってきて組み立てる必要があるが、Liquid Pouch Motors と銀ナノインク回路の印刷を組み合わせることによって、多くのプロセスを自動化し、短時間で簡単に試



図 7. チョウ型ロボット。背中に電熱パターンが印刷されており、その上にパウチが貼り付けられている



図 8. ハエトリソウ型インタフェース。電熱パターン、配線、タッチセンサが一括印刷されたフィルムの上にアクチュエータが乗っており、指を乗せると葉が閉じる

作することができる。

### 5.2 周囲の環境熱による駆動

Liquid Pouch Motors は電熱以外の方法でも駆動できる。図 9A に、環境の光と熱に反応して約 1600 匹のチョウが羽を開け閉めする実験建築「Papilion」を示す。このチョウで構成されたファサードは気温が高くなったり直射日光を浴びたりした場合にはチョウが閉じることで開口部が増加し換気を行う。逆に気温が下がり熱が発生しなくなった場合には開口部を減らし保温を行う。図 9B には、スポットライトの熱により駆動するチョウを示している。このアプリケーションには 3 つの特徴がある。1 つ目は、この壁が無電源で動作するという点である。従来の熱膨張を利用したアプリケーションでは、駆動に必要な温度が人間環境よりも極端に高いため、配線無しに自然のエネルギーのみで動作させるのは難しい。2 つ目は、無配線で動作するという点である。従来の空気圧アクチュエータをこのアプリケーションに使用しようとした場合、チューブの配線がアクチュエータの数だけ必要になり、現実的ではない。3 つ目は、素材の外観をある程度選べるということである。素材の熱膨張率を利用するタイプのアクチュエータは物性の問題で不透明な素材を使用せざるを得ない場合があるが、Liquid Pouch Motors の場合、透明なパウチや金属光沢のあるパウチなどを比較的自由に選択できる。このアプリケーションでも周囲の光

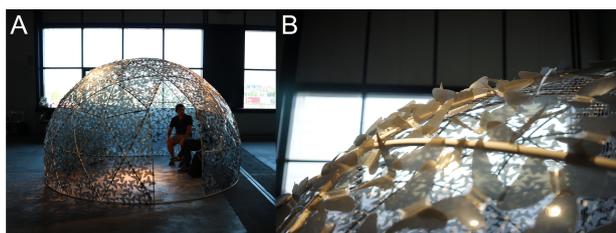


図 9. Papilion. 無電源・無配線のチョウが、周囲の温度と光に応じて羽を開く実験建築

をある程度取り入れるため、パウチも透明なものを使用している。

## 6 議論と結論

本論文では、空気圧アクチュエータのチューブを廃することに成功したが、一方で空気圧アクチュエータの利点であった速度は低下している。原理上、駆動速度はパウチのサイズを下げれば速くなるものの、例えば手に乗るスケールのパウチの場合、電熱線や熱放射、光などの駆動源では高々数秒オーダーでしか動かない。そのため1秒以内の駆動が必要なアプリケーションでは駆動源を変える必要がある。例えばパウチをお湯につけると、予備実験レベルでは1秒以内に完全駆動することを確認している。

アプリケーションに関しては、関連研究で述べた、熱膨張を利用するタイプのアクチュエータに比べてかなり大きな力が出せることから、大きな力が必要となるアプリケーションを考えることには価値があると思われる。紙の上に乗せるアクチュエータとして考える場合、基材となる紙自体の耐久性が低くては意味がないので、折り紙により立体的構造を実現し、強い力を発揮しても基材が壊れないようにするなどの工夫が必要かもしれない。

その他、気圧の低い場所では常圧よりも低い沸点で駆動するため、高所で使用する際や貨物として空輸する際にはパウチが破損する可能性がある。

本論文では、紙のように薄く軽く柔軟で、34°C以上の熱を加えることにより自重の1000倍以上の負荷を30%以上持ち上げることのできるアクチュエータ、Liquid Pouch Motorsを提案した。最大の特徴は、空気圧アクチュエータに必要なチューブが無くても、それと同等の力を引き出せる点である。ファブリケーションプロセスは簡単であり、試作と大量生産に対応できる。また、印刷できる回路に貼り付けることにより、従来提案されてきたタッチセンサなどと同時に使用することができることを示した。更に、無電源・無配線透明で動かす事例として、知的な壁材インタフェースとしての利用法を紹介した。本論文が今後の紙のインタフェース研究にとって役立つことを願う。

## 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (JP17J09630) および JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。また、本論文の一部は *Ars Electronica* で発表されたものである。本論文の銀ナノインク回路に関する部分などはこちらも参考にしてほしい [5]。

## 参考文献

- [1] E. Acome, S. Mitchell, T. Morrissey, M. Emmett, C. Benjamin, M. King, M. Radakovitz, and C. Keplinger. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*, 359(6371):61–65, 2018.
- [2] K. Kato and H. Miyashita. Extension sticker: a method for transferring external touch input using a striped pattern sticker. In *Proceedings of the adjunct publication of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 59–60. ACM, 2014.
- [3] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd. Instant inkjet circuits: lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of UbiComp devices. In *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing*, pp. 363–372. ACM, 2013.
- [4] N. Kellaris, V. G. Venkata, G. M. Smith, S. K. Mitchell, and C. Keplinger. Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation. *Science Robotics*, 3(14):eaar3276, 2018.
- [5] K. Nakahara, K. Narumi, R. Niiyama, and Y. Kawahara. Electric phase-change actuator with inkjet printed flexible circuit for printable and integrated robot prototyping. In *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on*, pp. 1856–1863. IEEE, 2017.
- [6] R. Niiyama, X. Sun, C. Sung, B. An, D. Rus, and S. Kim. Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design. *Soft Robotics*, 2(2):59–70, 2015.
- [7] R. Niiyama, X. Sun, L. Yao, H. Ishii, D. Rus, and S. Kim. Sticky actuator: Free-form planar actuators for animated objects. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 77–84. ACM, 2015.
- [8] G. Wang, T. Cheng, Y. Do, H. Yang, Y. Tao, J. Gu, B. An, and L. Yao. Printed Paper Actuator: A Low-cost Reversible Actuation and Sensing Method for Shape Changing Interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 569. ACM, 2018.