



# Hairlytop Interface の動作シミュレータの開発

(梅津 周平, 大久保 賢, 野嶋 琢也)

1) 電気通信大学 大学院 情報システム学研究所

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {s.umezu, marchalloakbow}@vogue.is.uec.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

**概要:** Hairlytop Interface は細線上のアクチュエータで構成される, 形状制御機能を備えた拡張性の高いデバイスである. 高い拡張性を生かしたアプリケーション開発が進められているが, カバー等を装着した際の制御性能評価が試行錯誤的に行われているという問題がある. そのため, 本研究では動作のモデル化とシミュレータの開発を行い, その結果を基に実機を作成し, 作成したシミュレータの有効性について検証を行う.

**キーワード:** Shape Memory Alloy, Hairlytop Interface, モデル化

## 1. はじめに

Hairlytop Interface とは, 図 1 で示す毛をイメージした細く柔らかなアクチュエータ Smart Hair の集合体である. Smart Hair は形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, SMA) ワイヤ, バネとなる超弾性金属 (Super Elastic Alloy, SEA) ワイヤ, そしてこの 2 つを包み込むシリコンチューブで構成される, 形状制御機能を備えるデバイスである. Smart Hair は SMA に通電することで発熱させ, 収縮をひきおこし, 最終的に収縮運動を屈曲運動へと転化することで動作する(図 2). この屈曲量は Smart Hair に流す電流値によって制御することができるため, 形状制御が可能である. このようなシンプルな構造と動作方法を採用しているため拡張性が高く, 現在まで様々なアプリケーション開発がなされてきた[1].



図 1 Smart Hair

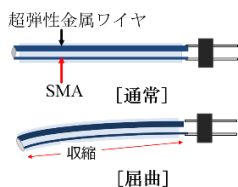


図 2 SMA の収縮による屈曲

今まで Smart Hair を使用して作成されたアプリケーションの多くは, 図 3 のようなカバー等の装飾による見た目の変更が主として行われてきた[2]. 装飾物は Smart Hair の動作上の負荷であり, 運動性能の低下, あるいはそもそも動

作しないといった問題を引き起こす可能性がある. しかしながら Smart hair の基本性能が明確になっていなかったため, 事前予測が難しく, 試行錯誤的に装飾を行わねばならないという問題があった.

そこで本研究ではこの問題解決手法として, Smart Hair の動作のモデル化に取り組む. これによってアクチュエータの動作を数値化し, 実機製作前に動作を検証可能な環境を構築する. また, このモデルを基に設計補助を行う機能を作成する. アプリケーション作成に必要な要素(トルク, 屈曲量, 動作速度等)から, アプリケーション作成に適した Smart Hair の設計を提示することで, アプリケーション開発をよりスムーズとすることを目標としている.

本発表では, SMA と SEA の関係性に着目した, シンプルな Smart Hair の動作モデルを作成したので, それについて報告する. さらに, このモデルを基にした設計補助機能を実装し, その値を基に実際に Smart Hair を作成することで, 開発したシミュレータの有効性について検証した.

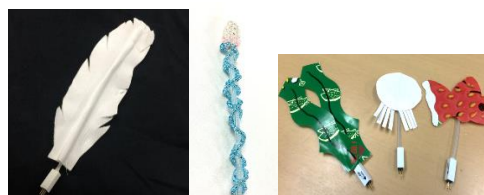


図 3 Smart Hair へのカバー装着例

## 2. 関連研究

Gouping らは Hairlytop Interface と類似したアクチュエータのモデル化を行っている[3]. この研究によると、これらのアクチュエータの屈曲量は、SMA のひずみから求めることができる. Jeniffer らの作成した SMA アクチュエータにおいてもこれは同様で、こちらは実際にアクチュエータが節で分割され節ごとに制御可能な構造をしている[4]. これらの研究では有限要素法を用いて解析を行うことで、材料の特性に応じた動作のモデル化を実現している.

しかし、先行研究のモデルはどちらも Smart Hair の構造とは異なっており、そのまま適用することはできない. また、これらの手法は基本的に、既に作成したアクチュエータの解析や制御について論じられており、アプリケーション作成などの必要に応じたアクチュエータの設計には触れられていない. そこで本研究では、有限要素法を用いて Smart Hair 独自のモデルを構築するだけでなく、Smart Hair の拡張性の高さを生かしたアプリケーション開発を想定し、設計補助を行う機能を追加することで、アプリケーション開発の促進を目指す.

## 3. 動作のモデル化

### 3.1 Smart Hair の動作原理

Hairlytop Interface の動作原理を図 5 に示す. 図 5 は通常状態と動作状態の Smart Hair を微小な長さ  $dl$  で分割した場合の模式図である. SMA が収縮すると、図 5(a) から (b) のように断面の傾きが変化する. この微小部分を断面で接続していくと図 6 のように Smart Hair の屈曲した状態を再現することが可能である. SMA の収縮を表す運動ひずみ  $\epsilon$  から傾きを計算することで、全体の位置推定を行うことが可能である. このときの収縮した長さを  $\Delta dl$  とすると式 (1) で表せる.

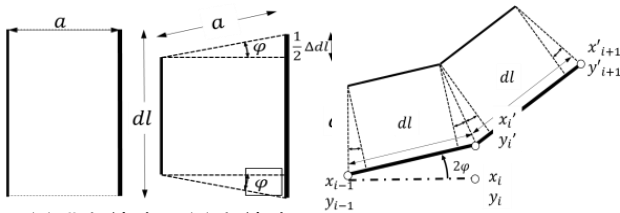


図 5 ひずみによる動作

図 6 屈曲のモデル

$$\epsilon = \frac{\Delta dl}{dl} \quad \text{式 1}$$

### 3.2 ひずみを考慮した屈曲位置の推定

SMA の収縮によって発生する微小部分の傾きを求める式は以下の通りである. この式は余弦定理とニュートン法による近似から求めることができる. また SMA と SEA ワイヤの距離はチューブ内の穴を通して固定されているため、変化しないと仮定している. Smart Hair を長さ  $dl$  で分割した際の分割数を  $n$  (Smart Hair の根本を 0, 頂点を  $n$  とする.) とすると、この傾きから、 $i$  番目の微小部分の頂点位置  $[X_i \ Y_i] = [0, idl]$  の移動先の座標  $[X'_i \ Y'_i]$  は式(4)となる. これにより Smart Hair の任意の微小部分の頂点の座標を推定することができる.

$$\phi = \frac{2\alpha^3 - 6\alpha}{3\alpha^3 - 6} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\Delta dl}{2a} = \frac{\epsilon dl}{2\left(\sqrt{e^2 + \left(\frac{1}{2}\epsilon dl\right)^2}\right)} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{bmatrix} = \sum_{m=0}^i \left\{ \begin{bmatrix} dl \sin 2m\phi \\ dl \cos 2m\phi \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

### 3.3 SMA と SEA の力のつりあいの考慮

HI には自立と屈曲からの復帰を行うために、バネとなる超弾性金属ワイヤ (Super Elastic Alloy, SEA) を使用している. そのため SMA のひずみによる位置推定だけでは、SEA の弾性力による屈曲の制限を考慮できない. そのため、SMA の収縮で発生する力と SEA の弾性力の関係を明らかにする必要がある.

### 3.4 SMA の実行力と SEA の弾性からの位置推定

力のつりあいを考慮した場合の SMA と SEA の関係を以下の図 7 に示す. SMA は SEA から偏心した位置にあり、収縮により力  $F$  を発揮する. このような場合、SEA 全体にかかるのは図 8 のような均一な回転モーメントである[5].

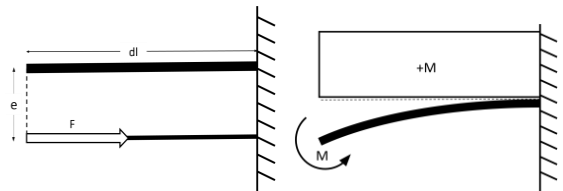


図 7 偏心した力の発生

図 8 SEA の回転モーメント

そのため各微小部分にかかる回転モーメント  $M$  は位置にかかわらず一定と考えることができ、以下の式(5)で表すことができる. 回転モーメントによる、微小部分の屈曲角度

は式(6)で表すことができるため、全体の角度変化はその和で求めることができる。また SEA の断面は円形であるため曲げにくさを表す断面 2 次モーメント  $I$  は半径  $R$  とすると以下の式(7)であらわすことができる。

$$M = F e \quad (5)$$

$$\theta = \frac{Ml}{EI} \quad (6)$$

$$I = \frac{\pi R^4}{4} \quad (7)$$

### 3.5 屈曲量の決定

3.2 項で求めた  $\varphi$  と  $\theta$  の大きさを比較し、実際の屈曲量を求める。  $[\varphi > \theta]$  の場合には、角度  $\theta$  で SMA の実行力が限界となるため、それが屈曲の限界である。  $[\varphi < \theta]$  の場合には SMA の実行力の方が SEA の弾性力よりも大きいため、SMA は限界まで収縮することができ、ひずみによる角度  $\varphi$  を出力することで屈曲位置を推定することができる。

## 4. 必要となる実行力の計算機能

### 4.1 設計補助機能の必要性

従来の Smart Hair 開発では特定の重量下で本体を自立させるために内部の SEA を変更し、チューブの種類は変更していなかった。そこで今回は設計補助の試作として、アプリケーションに必要な HI の全長、SEA の太さ、動作角度から、その要求を満たすことが可能な SMA の実行力の計算機能と、それを基に SMA の使用本数を提示する機能を実装した。

### 4.2 必要とする条件からの設計推定

チューブを変更しない場合、SMA と SEA の間隔  $e$  を変更することができないため、屈曲量には限界がある。Smart Hair に使用する SMA は種類に関わらず収縮限界が 4% であり [6]、SMA と SEA の距離が変更できない場合には、微小長さあたりの屈曲量の限界を変えることができない。そのため、今回の微小長さの屈曲限界  $\theta_{Max}$  は式(2)の  $\varphi$  から  $0.75[\text{deg}/\text{mm}]$  である。屈曲量の限界が定まるため、SEA の弾性力と屈曲量の関係を基に式(5)(6)を変形した以下の式(9)から、屈曲に必要な力  $F$  を求めることができる。SMA が発揮可能な力の限界値である実行力を  $F_e$  とすると、 $F_e > F$  のときにはこの屈曲を再現することができる。

$$M_{Max} = \frac{EI\theta_{Max}}{l} \quad (8)$$

$$F = \frac{M}{e} \quad (9)$$

## 5. 実験

理論式を基に、VisualStudio2012 C++を使用してシミュレータを構築した。

### 5.1 屈曲位置推定精度評価

今回は位置推定の確認のために、(株)シンフォディア・フィルにおいて作成された製品版の Smart Hair を使用して実験を実施した。所定の電圧を印可し、その際の屈曲状況を固定したカメラで撮影し、先端の XY 各軸の変位量を測定した(図 9)。

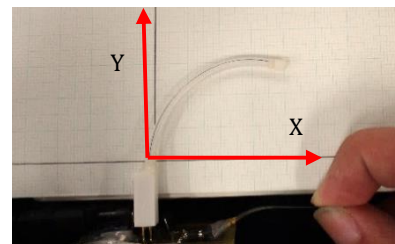


図 9 屈曲の様子

無作為に選択した 10 本の Smart Hair の屈曲を測定し、シミュレータから出力された数値と比較した結果を図 10 に掲載する。

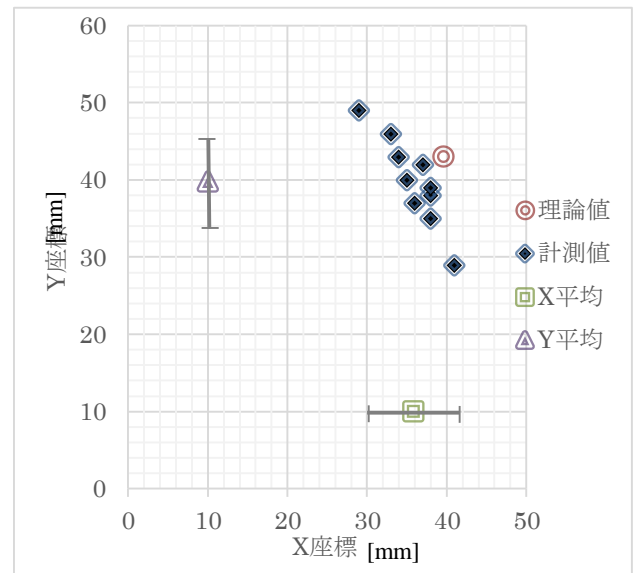


図 10 測定結果と理論値の比較

図 10 中に記載されている実測値の平均・標準偏差と、シミュレータによる理論値を比較すると、各軸とも理論値が標準偏差の幅の中に収まっていることが確認された。実際の Smart Hair の値のばらつきが大きいため、精度の観点ではまだ課題はありつつも、当該シミュレータの値には一定の信頼性があると考えられる。

## 5.2 モデルを使用した設計補助機能の検証

式(8)と式(9)を基に設計補助機能を実装し、その提示データを基に Smart Hair を作成し、その動作を検証した。今回使用した各パラメータは以下の通りである。

- ・アクチュエータ部分の全長  $l = 59.1[\text{mm}]$
- ・動作角度限界  $\theta_{Max} = 1.5[\text{deg/mm}]$
- ・SEA の半径  $0.2[\text{mm}]$

この  $l$  と  $\theta_{Max}$  は、完全に屈曲した状態で 5.1 項の実験で使用した Smart Hair と同じ屈曲位置となる値になっており、5.1 の結果と比較することで、検証を行うことができる。このパラメータから必要な SMA の実行力を提示したところ、式(10)に示す値が必要であることがわかった。

$$F > 175.5 [\text{gf}] \quad (10)$$

この値を満たす SMA としてトキ・コーポレーションの BMF75( $F_{Max} = 35[\text{gf}]$ ) を 1 本と、BMF150( $F_{Max} = 150[\text{gf}]$ ) を 1 本、計 2 本を使用した。そして実際に Smart Hair を作成し屈曲位置の測定を行った結果、屈曲位置については表 2 の結果が得られた。

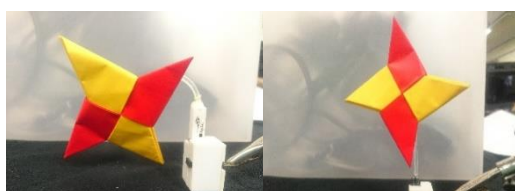
表 2 作成した Smart Hair の動作結果

使用 SMA	X 座標[mm]	Y 座標[mm]
BMF75,150	39	36

5.1 項の実験と同様に理論地に近い値が得られており、図 10 の偏差の幅にも収まっていることから、Smart Hair 単体の動作としては想定通りの結果が得られている。

図 11 は SEA の太さに応じた Smart Hair の保持力の比較である。表 2 の実験で使用した Smart Hair は従来のものと比べて保持力が上がっている。図 11 は 4[g] の折り紙を頂点に載せた際の様子である。(a) が従来のもの、(b) が表 2 の結果を示したものである。(a) は動作すらできなかったが、(b) は表 2 と同じ動作を行いながら、元の直立状態へ復帰可能であった。

このように SEA を変更した場合でも、必要とする条件を満たす Smart Hair を制作することができた。試作したシミュレータを利用し、仕様に応じた Smart Hair の開発を行うにあたり指標となる条件を導くことが可能となった。



SEA  $\varnothing 0.2[\text{mm}]$       SEA  $\varnothing 0.4[\text{mm}]$   
図 11 SEA の太さによる保持力の違い

## 6. おわりに

本研究では Hairlytop Interface のアクチュエータ位置と力のモデルからその挙動を推定するシミュレータと、使用する SEA の太さ、長さおよび動作角度から SMA の実行力を求めるシミュレータの開発を行った。シミュレーション結果を実際のアクチュエータ動作と比較し、今回作成したモデルやシミュレータの有効性を示すことができた。

実際に設計補助シミュレータとしての使用を考慮すると、動作速度や復帰速度といったダイナミクス、出力可能トルクの提示など、より細かな情報提示が必要となる。今後はこれらの機能を追加し改良を続け、アプリケーションの開発を引き続き行っていく。

### 参考文献

- [1] Shuhei Umezu, Masaru Ohkubo, Yoshihiro Ooide, Takuya Nojima : Hairlytop Interface: A Basic Tool for Active Interfacing, Procs of UIST, pp. 95-96, 2014.
- [2] 平居 あづさ, 梅津 周平, 大久保 賢, 野嶋 琢也 : 女子児童を対象とした初期技術教育のための基本ツール開発, 日本感性工学 かわいい人工物研究会 5 周年記念シンポジウム, p29-32, 2015/6/6.
- [3] Guoping Wang, Mohsen Shahinpoor : Design, prototyping and computer simulations of a novel large bending actuator made with a shape memory alloy contractile wire, Journal of Smart Materials and Structures vol.6, p214-221, 1997/4.
- [4] Jennifer C Hannen, John H. Crews, and Gregory D. Buckner. "Indirect intelligent sliding mode control of a shape memory alloy actuated flexible beam using hysteretic recurrent neural networks." *Smart Materials and Structures* 21.8 (2012): 085015.
- [5] 大塚 尚武, Windows PC による材料力学, 晃洋書房, pp.144-145, 2008/2/9,
- [6] トキ・コーポレーション, バイオメタル・ファイバー, <http://www.toki.co.jp/biometal/products/bmf/bmf.php>, [visited 2015/7/7].