

柔軟空気圧アクチュエータを用いた柔軟舌機構 ZETS の開発

○片岡大哉 (阪大) 吉田卓嗣 (阪大) 小島友裕 (阪大) 遠藤信綱 (東京電機大)
浅田稔 (阪大)

Development of a Flexible Tongue Mechanism ZETS by using Flexible pneumatic actuators.

○Masaya KATAOKA(OsakaUniversity), Takuji YOSHIDA(OsakaUniversity), Tomohiro KOJIMA(OsakaUniversity), Nobutsuna ENDO(TokyoDenkiUniversity), Minoru ASADA(OsakaUniversity)

Abstract : Human tongue deforms exibly when we speak. However, tongue-like conventional systems cannot deform exibly. In this paper, we made dynamic model of Fiber-reinforced actuators and developed a exible tongue-like mechanism named ZETS (Zunge: EmergenT Sprache) that consist of Fiber-reinforced actuators in order to mimics articulation shapes of human tongue.

1. 緒言

ヒトの舌は発話時に声道の断面積を変化させ、三次元的で複雑な調音形状を実現する役割を果たしている。また、ヒトの舌は内部に骨格を持たず複数の筋肉を組み合わせ、各筋肉が収縮することによって舌全体として大きな変形を実現している。こうした特徴を持つ発話のための舌機構の開発を本研究の目標とした。

発話のための舌機構として Anton[1], BERO[2], WT-7RII[3] が存在する。Anton は母音、子音の再現が不十分であり制御もできていないとは言えない。また、BERO は矢状面の舌形状のみを再現し、舌の持つ三次元的な調音形状を再現できていない。WT-7RII は舌機構の制御および母音、子音の発話にも成功しているが、剛体リンクによって舌を構成しているため巻き舌の形状模擬が実現できていない。

そこで、柔軟な空気圧アクチュエータの組み合わせにより舌機構全体を変形させることで、ヒトの舌の持つ大きな変形を実現する柔軟舌機構 ZETS (Zunge: EmergenT Sprache) を開発した。

2. ZETS の構造と動作原理

2.1 柔軟舌機構の要求仕様

日本語の母音 1 音と子音 2 音を普通程度の速度で発話するのに必要な時間は平均 700[ms] 程度であり、その際前舌部の最高速度 v [mm/s] と移動距離 x [mm] の間には $1.50x + 0.11 \geq v \geq 1.33x + 0.7$ の関係が存在するといわれている [4]。よって、本研究においては単一アクチュエータの制御における静定時間、最高速度の目標値をそれぞれ 200 [ms], 83.6 [mm/s] と設定した。また、日本語発話時の MRI 画像 [5] より舌表面の Z 軸方向最高点を求め、

ZETS の可動域として X 軸方向に 16~48 [mm], Z 軸方向に 54.1~89.1[mm] の範囲で Z 軸方向最高点が移動できる

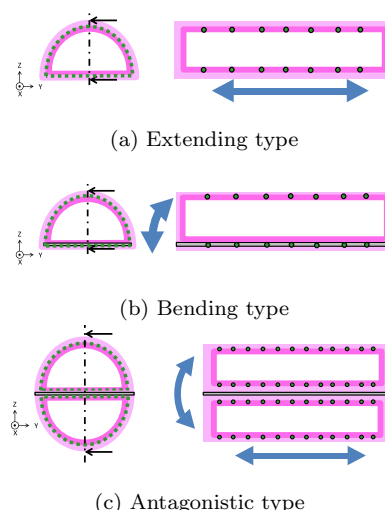


Fig. 1: Structure of fiber-reinforced actuators structural drawing

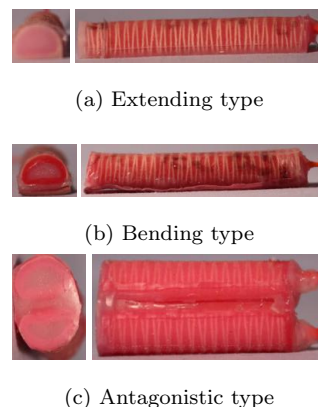


Fig. 2: Picture of fiber-reinforced actuators

こととし、単一アクチュエータの目標ストロークをアクチュエータ変形部分の長さの約30%程度とした。そしてヒトの舌の持つ大きな曲率を再現する目標として巻き舌の形状を模擬できることを目標とした。

2.2 柔軟空気圧アクチュエータ

ヒト舌は内部に骨を有さず、筋のみで構成されている構造であり、筋同士が相互作用することによって非常に大きな変形を実現している。この筋とよく似た特質を持つアクチュエータとして Galloway らによる繊維強化柔軟空気圧アクチュエータ [6,7] を ZETS を駆動するアクチュエータに採用した。このアクチュエータは中空の円筒状もしくは半円筒状の柔軟材料で成形され、径方向の膨張を抑制するよう、周壁内に繊維が巻かれている。なお、Fig. 1の薄いピンク色の部分を外部層、濃いピンク色の部分を内部層と呼称する。また、繊維は緑色の部分で表されている。このアクチュエータの内部に空気圧を負荷した際に構造全体が軸方向に伸展する。これを伸展型と称する (Fig. 1(a), Fig. 2(a))。また、伸展型アクチュエータの底面に繊維膜 (Fig. 1) を配し、下部の伸展を抑制することで、アクチュエータ全体が湾曲して変形するものを湾曲型と称する (Fig. 1(b), Fig. 2(b))。ヒト舌の先端から中舌にかけての部位は、部位全体を湾曲させる動作や、前方に舌先を突き出す動作を行うので、湾曲と伸展の両方の動作を単一のアクチュエータで実現できるアクチュエータが必要である。そこで我々は伸展型を底面部分で対向に配置し、その間に拘束層を挟み込んだ拮抗配置型アクチュエータを開発した (Fig. 1(c), Fig. 2)。

2.3 柔軟舌機構 ZETS

柔軟舌機構 ZETS の概観および内部構造を Fig. 3 に示す。A1, A2, C1, C2 は伸展型アクチュエータであり、B1~B4 はこれら2つの拮抗配置型アクチュエータを直列につないで構成されている。ZETS 全体は8アクチュエータ7自由度で設計されており、そのアクチュエータ配置は里田ら [8] によるヒトの内舌筋の構造を機能ごとにまとめそれをもとに決定している。

3. 柔軟空気圧アクチュエータの力学モデルと制御

3.1 繊維強化柔軟空気圧アクチュエータ力学モデル

ZETS を構成する繊維強化柔軟空気圧アクチュエータのうち、伸展型に対して力学モデルを立てた。このモデルは Polygerinos らによる湾曲型繊維強化柔軟空気圧アクチュエータのモデル [9] を参考に立式した。材料モデルには Neo-Hookean material モデル [10] を採用した。この材料モデルは応力とひずみの関係が非線形で大きなひずみを持つゴムなどの物質に適用される材料モデルの一種である。

応力でひずみを積分した値であるひずみエネルギー密度関数を定義し、ひずみエネルギー密度関数をひずみで偏微分することで応力を計算する。ここで、伸展型アクチュエータのひずみエネルギー密度関数 W は

$$W = \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1)$$

と定義した。ここで、Fig.4 に示すように λ_1 は軸方向、 λ_2 は径方向、 λ_3 は周方向のひずみである。アクチュエータの均質性および非圧縮性を仮定し、

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

s_1 は軸方向、 s_2 は径方向、 s_3 は周方向への応力として、

$$s_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - \frac{p}{\lambda_i} \quad (3)$$

なお、 p はラグランジュ乗数である。 $s_3 = 0$ であるから式 (2), (3) より

$$s_3 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} - \frac{p}{\lambda_3} = 0 \quad (4)$$

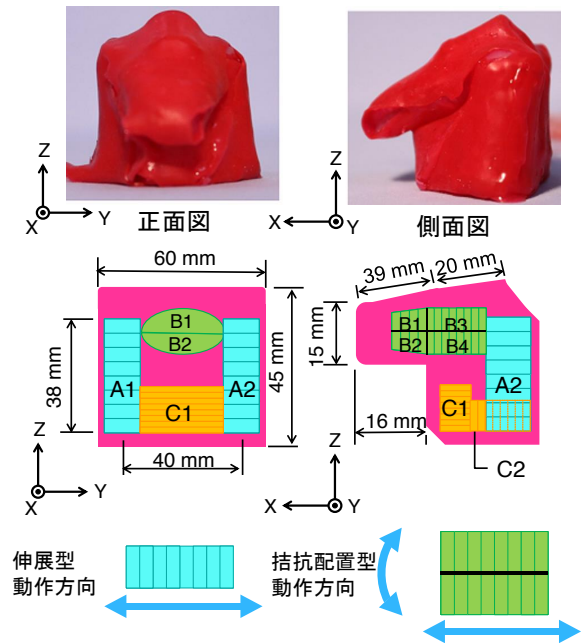


Fig. 3: Structure of ZETS

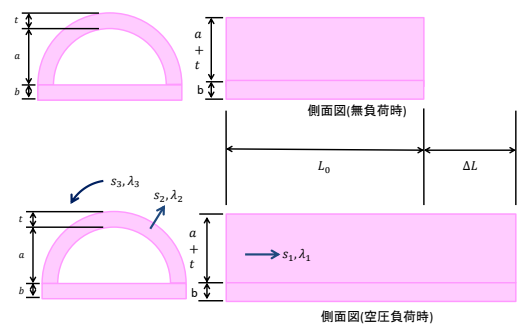


Fig. 4: Model of extending type

式(4)より,

$$p = \mu \lambda_3^2 = \frac{\mu^2}{\lambda} \quad (5)$$

残りの2方向(軸方向, 径方向)に関しても式(2), (3)より

$$s_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \frac{p}{\lambda_1} = \mu \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^3} \right) \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} - \frac{p}{\lambda_2} = \mu \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (7)$$

ここで, Fig. 4 に示すように伸展型アクチュエータのある点のひずみ, 軸方向への応力をそれぞれ λ , s_1 , アクチュエータの初期長さを L_0 , アクチュエータの変位を ΔL と置くと,

$$\lambda = \frac{\Delta L + L_0}{L_0} \quad (8)$$

$$s_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \frac{p}{\lambda_1} = \mu \left(\lambda - \left(\frac{1}{\lambda} \right)^3 \right) \quad (9)$$

の式が得られる. 入力気圧 P_{in} と内部応力 s の釣り合いの式を立式して

$$P_{in} a^2 \pi = \frac{1}{2} (L + \Delta L) (2s(a' + t') + s(2a' + t')t' \pi) \quad (10)$$

$$P_{in} = \mu ((2(a' + t')b' + (2a' + t')t' \pi)) (L_0 + \Delta L) (\lambda - \lambda^{-3}) \quad (11)$$

ただし, a' , b' , t' はアクチュエータ変形後のアクチュエータの各パラメータであり, それぞれの初期値を a_0 , b_0 , t_0 として

$$a' = \frac{L_0}{L_0 + \Delta L} a_0 \quad (12)$$

$$b' = \frac{L_0}{L_0 + \Delta L} b_0 \quad (13)$$

$$t' = \frac{L_0}{L_0 + \Delta L} t_0 \quad (14)$$

式(11)に式(12), (13), (14)を代入して以下の式を得る

$$P_{in} = \mu \left(\frac{2(a' + t')b' + (2a' + t')t' \pi}{a'^2 \pi} \right) \left(\lambda - \left(\frac{1}{\lambda} \right)^3 \right) \quad (15)$$

伸展型アクチュエータに電空レギュレータを用いて気圧を負荷し, 式(15)とその結果を比較した(Fig. 5). ヒステリシスの影響を考慮し, 負荷する気圧を 0.00 [MPa] から 0.025 [MPa] 付近まで上昇させた場合と 0.025 [MPa] 付近から 0.00 [MPa] へ下降させた場合とに分けて実験を行い, Fig.5 の近似線の定数 μ は最小二乗法により決定した. この力学モデルはある程度アクチュエータの変形を表現できているものの, 変形が大きい領域において 2 [mm] 程度の誤差が生じていることがわかる. この力学モデルに基づき計算された気圧を負荷した際のステップ応答を Fig.7 の力学モデルによるステップ入力のグラフ(橙色)に示す.

3.2 2自由度制御システム

単一の伸展型繊維強化柔軟空気圧アクチュエータに対し Fig. 6 に示す制御器を設計し, 制御実験を行った. 設計した制御器はアクチュエータ力学モデルより計算された気圧をアクチュエータに入力し, その際生じる偏差を PID 制御器によって 0 に収束させる 2 自由度 PID 制御系である. 実験に使用したアクチュエータの無負荷時における空圧負荷部分の長さ 17.1[mm] の約 30%である 5.5[mm] を実験の目標変位と設定した. 実験の際の各制御器のゲインは $K_p = 0 \sim 0.2$, $K_i = 0.0 \sim 0.35$, $K_d = 0 \sim 0.02$ の範囲において各制御器で最も静定時間が短かったゲインを採用した. Fig.7 より, 力学モデルに基づくステップ入力では力学モデルの誤差によって正確に目標変位に収束させることができず, 2 自由度 PID 制御器による制御であれば

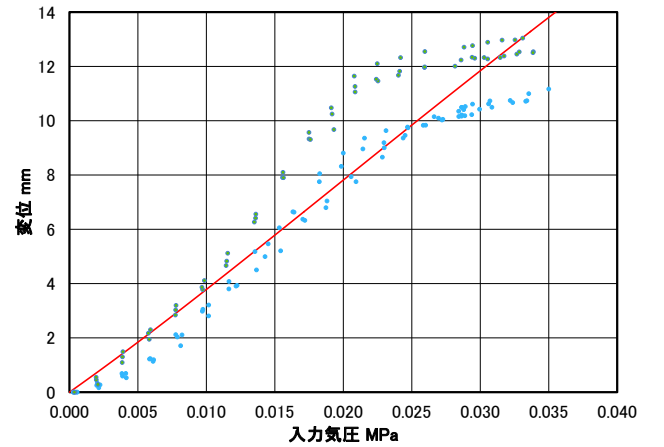


Fig. 5: Characteristics between air pressure and displacement

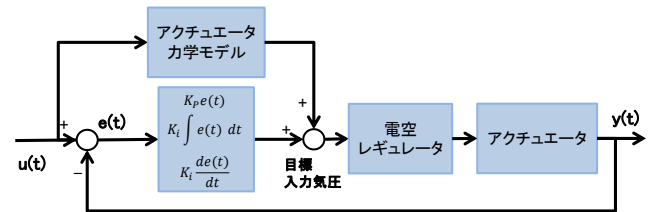


Fig. 6: 2 Degrees of freedom PID controller

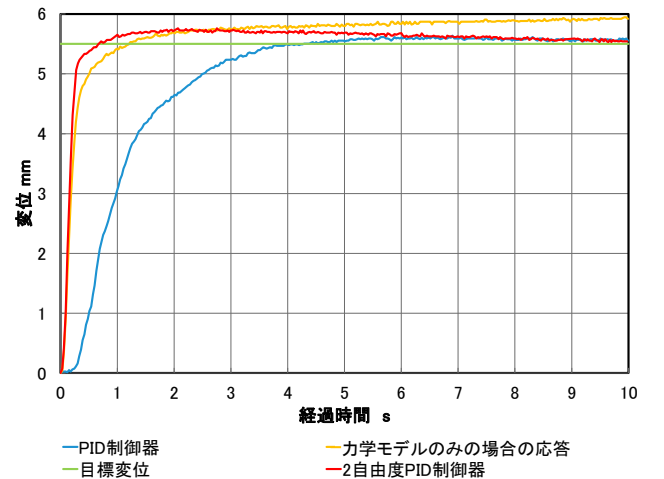


Fig. 7: Actuator response

単なる PID 制御器よりも高速で目標値に収束させることができた。2 自由度 PID 制御器の静定時間は 337 [ms] で、その際のアクチュエータの最大速度は 27.7 [mm/s] であった。アクチュエータの最大速度 83.6 [mm/s], 静定時間それぞれの目標値 200 [ms] には届かないため、更なる制御器の改良が必要である。また、ZETS 全体の力学モデルおよび制御器の開発も今後の課題である。

4. ZETS による舌形状の模擬

ZETS に空気圧を負荷し、発話時の舌形状を模擬した。このとき、負荷圧力は手動で入力し、目標形状との誤差が小さくなるように目視で確認しながら入力量を調節した。Fig. 8, 9 に示された白線は上顎および下顎の形状を示す線であり、青線は日本語発話時の MRI 画像 [5] より求めた舌表面の目標形状である。日本語母音 /a/, /i/, /u/, /e/, /o/, 日本語子音 /ro/, /ta/, /ke/, /wo'/' の発話時の舌形状を模擬した。なお、/wo'/' は /wo/ 発話直後の舌形状を示す。Fig. 8, 9 に示すように、様々なヒトの母音、子音発話時の舌形状の再現は確認したが、上顎および下顎干渉による ZETS の変形は考慮していない。顎を舌が貫通する形状は物理的に不可能であるから、下顎の模型の内部で ZETS を動作させることで他の部位との干渉を利用した舌形状の模は今後の課題である。

5. 結言

繊維強化柔軟空気圧アクチュエータを組み合わせ、発話時のヒトの舌形状を模擬する柔軟舌機構 ZETS を開発した。ZETS を構成するアクチュエータのうち伸展型に対して力学モデルを立式し、2 自由度 PID 制御器を実装し、337 [ms] の静定時間、最大変形速度 27.7 [mm/s] を実現した。また、ZETS によって様々な種類の母音、子音の発話時の舌形状を模擬した。下顎模型を作成し、その内部において ZETS を動作させることで下顎による干渉の影響を考慮すること、ZETS 全体の力学モデルおよび運動学、ZETS 全体の制御が今後の課題である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金「特別推進研究」(24000012) の助成を受けた。

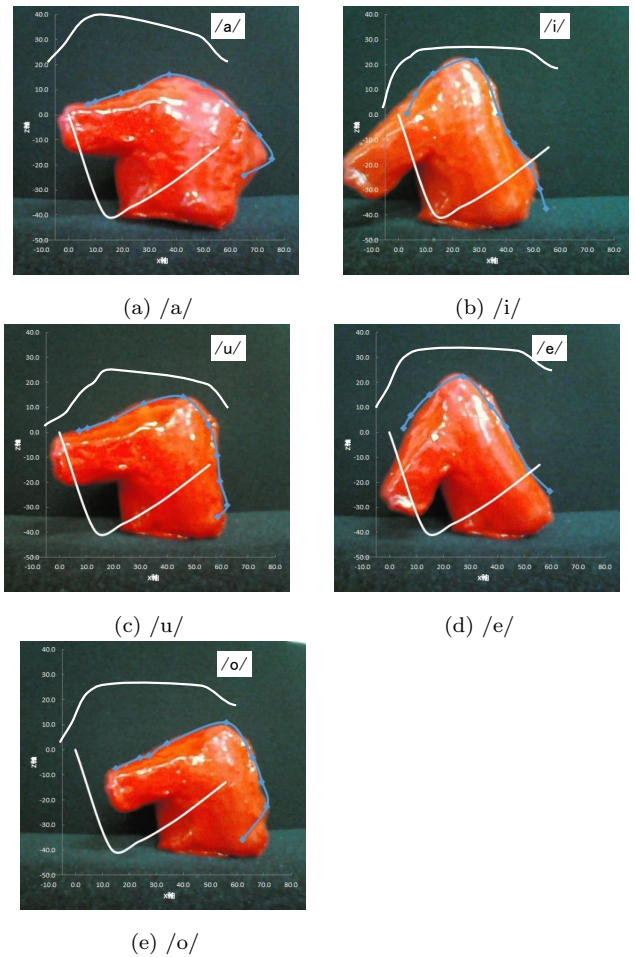


Fig. 8: Mimicking shape of vowel utterance

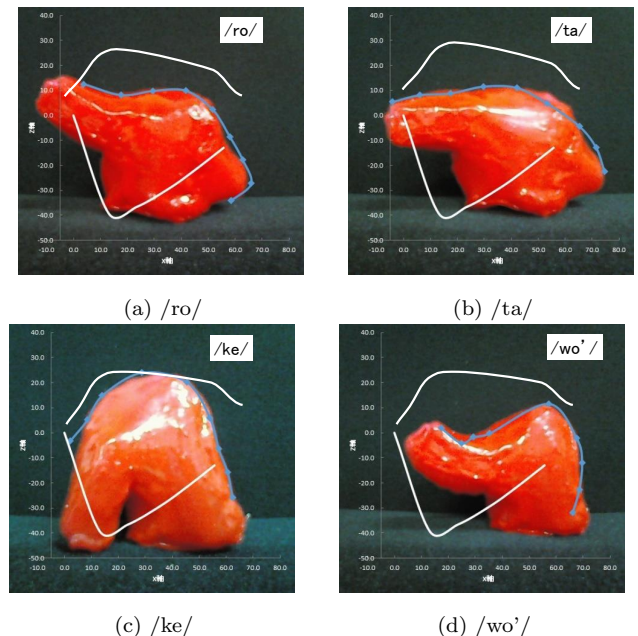


Fig. 9: Mimicking shape of consonant utterance

参考文献

- [1] Hofe, et al, “Anton: an animatronic model of a human tongue and vocal tract”, Connection Science, vol.20, no.4, pp.319-336, 2008.
- [2] 澤田謙次, 大須賀公一, 小野敏郎, “機械式音声合成装置の実現に向けて- 第2報:構音のための舌のモデルの一提案-”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.7, pp.1001-1008, 1999.
- [3] 福井孝太郎ら, “人間形発話ロボットの3次元舌機構の構築”, 日本咀嚼学会雑誌, vol.18, no.2, pp.165-166, 2008.
- [4] 園田頼信, “日本語音の発話時における舌および下顎の運動特性”, 電子情報通信学会論文誌 A, vol.62, no.9, pp.555-562, 1979.
- [5] 国立語研究所, “日本語の母音, 子節 -調音運動の実験声学的研究”, 1990.
- [6] “SoftRoboticsToolkit”,
<http://softroboticstoolkit.com/>
- [7] Galloway, et al, “Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators.”, 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR2013), pp.1-6, 2013.
- [8] 里田隆博, 戸原玄, “摂食・嚥下のメカニズム”, 医歯薬出版株式会社, 2013.
- [9] Polygerinos, et al, “Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators.”, IEEE Transactions on Robotics, vol.31, no.3, pp.778-789, 2015.
- [10] Ogden, “Non-Linear Elastic Deformations, Mineola”, Courier Dover Publications, 1997.