

# 温度の逆ダイナミクスを Hammerstein モデルで近似した 鈎糸人工筋肉のフィードフォワード制御

○舛屋賢(九大) 小野秀(九大) 高木賢太郎(名大) 田原健二(九大)

## 1. はじめに

高出力・軽量・安価なアクチュエータとして, Haines ら [1] により発見された鈎糸人工筋肉 (Twisted and Coiled Polymer Actuator, TCPA) が近年注目を集めている. TCPA はナイロンなどの高分子繊維を振った後にコイル化したものであり, 作成方法にもよるが加熱により最大で 50[%] 近い収縮を示す.

TCPA の変位を電圧印加に伴うジュール熱で制御する方法として, これまでにモデルベースな制御器 [2, 3, 4, 5, 6] が提案されている. ひとつの方策として, 電圧を入力とするモデルに基づいて電圧値を設計する方法 [2, 3, 4] があるが, 実際の現象としてはジュール熱に相当する電力が入力となる. 実際の現象に即すように, 電力を入力としたモデルに基づいて, 電力値または電力に比例する電圧の二乗値を設計する制御器 [5, 6] もまた提案されている. 制御器の応答性を改善するために, Arakawa ら [6] は, 線形モデルに基づく 2 自由度制御器を設計した. しかし, 線形モデルに基づくフィードフォワード (FF) 制御器において, 目標変位に対する大きな終端誤差が存在した.

FF 制御器の性能改善のために, 著者ら [7] は線形変位モデルの代わりに非線形変位モデル [8] を用いた FF 制御器を開発し (図 1), 安定挙動下において目標温度差に到達すれば目標変位を実現できることを確認した. しかし, 目標温度差から線形温度モデルを用いて得られた電圧の二乗値を入力しても, 実際の温度差と目標値の間には誤差が生じていた. これは, 非線形温度モデル [8] の利用により改善できると考えられるが, 非線形性によりダイナミクス補償にそのまま用いることは難しい.

本研究では, 非線形温度モデルの逆ダイナミクスを Hammerstein モデルとみなして非線形変換と線形な伝達関数に分離することで, 非線形ダイナミクス補償を行う FF 制御器を提案する. 分離した非線形変換と線形な伝達関数は, それぞれ入力電圧の大きさを調整するゲイン, 位相進み補償に用いられる (図 2).

## 2. ジュール熱を入力とした TCPA の 巨視的動作モデル

### 2.1 変位モデル

TCPA の変位モデルとして, Yip と Niemeyer [5] は次の線形モデルを考えた.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k_s x = c\Delta T \quad (1)$$

$$\Delta T \equiv T - T_{\text{env}} \quad (2)$$

ただし,  $x$  は荷重をかけたときのつり合い位置からの TCPA 変位,  $m$  は TCPA とおもりの質量の和,  $b$  と  $k_s$

はそれぞれ TCPA の粘性係数と弾性係数,  $c$  は温度が変位に与える影響を表す温度係数,  $T_{\text{env}}$  は周辺温度である.  $T$  は TCPA の温度であり, 実用上は代表温度が用いられる. しかし, 実際の温度に対する変位の挙動は非線形性を示し, また対流熱伝達の違いにより挙動は変化することが確認されている.

著者ら [8] は, 熱伝達係数の温度・速度依存性を考慮することで, 対流熱伝達の違いを陽に考慮できる巨視的な非線形変位モデルを構築した.

$$m\ddot{x} + (b + \lambda_{xx}\Delta T)\dot{x} + k_s x = \lambda_x \Delta T + \lambda_{xT} \Delta T^2 \quad (3)$$

ただし,  $\lambda_* = \alpha_* S_c$  であり,  $S_c$  は対流に曝される TCPA の表面積である.  $\alpha_*$  は, 熱伝達係数  $\alpha$  が速度  $\dot{x}$  と温度  $T$  に依存するとして, 次のように  $\dot{x} = 0$ ,  $\Delta T = 0$  まわりでテイラー展開したときの係数である.

$$\alpha(\dot{x}, T) \simeq \alpha_0 + \alpha_x \dot{x} + \alpha_T \Delta T + \frac{1}{2} \alpha_{xx} \dot{x}^2 + \alpha_{xT} \dot{x} \Delta T + \frac{1}{2} \alpha_{TT} \Delta T^2 \quad (4)$$

以下では, 簡便のため, 次のモデルを考える.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k_s x = \lambda_x \Delta T + \lambda_{xT} \Delta T^2 \quad (5)$$

### 2.2 温度モデル

TCPA の温度モデルとして, 次式で表されるジュール熱を入力とした Newton の冷却法則に基づく温度モデル [5, 6] がよく用いられる.

$$C_v \dot{T} = \frac{V_{\text{in}}^2}{R} - \lambda \Delta T \quad (6)$$

ここで,  $C_v$  は熱容量,  $V_{\text{in}}$  は入力電圧,  $R$  はヒーターの抵抗値,  $\lambda = \alpha S_c$  である. 式 (6) を時間積分してエネルギー収支を考えると, ジュール熱による入力エネルギーが対流熱伝達と温度変化のみに消費されることになるが, 実際には機械的仕事にも消費される.

TCPA 全体のエネルギー収支に着目することで, 著者ら [8] は次の非線形温度モデルを構築した.

$$C_v \dot{T} = \frac{V_{\text{in}}^2}{R} - \lambda_0 \Delta T - \lambda_T \Delta T^2 - \lambda_{TT} \Delta T^3 + \frac{1}{2} (\lambda_{xx} \Delta T + b) \dot{x}^2 - S_{\text{emi}} \epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4) \quad (7)$$

ここで,  $S_{\text{emi}}$  は熱輻射を行う TCPA の表面積,  $\epsilon$  は放射率,  $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数である. 同定において, 輻射熱の項は  $\lambda_0 \Delta T$  の項に吸収されやすいことが実験的に確認されているため, 以下では次のモデル

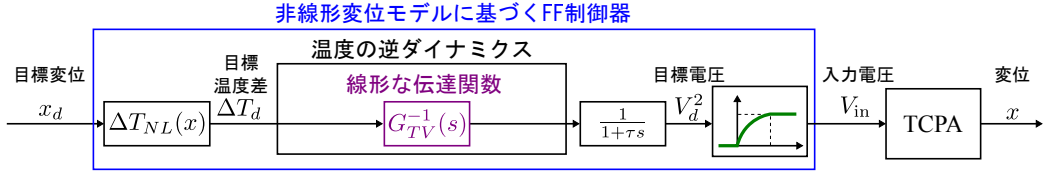


図1 非線形変位モデルを用いた FF 制御器 [7]

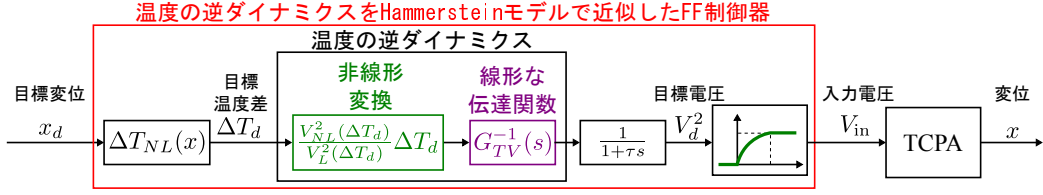


図2 温度モデルの逆ダイナミクスを Hammerstein モデルで近似した FF 制御器

を考える.

$$C_v \dot{T} = \frac{V_{in}^2}{R} - \lambda_0 \Delta T - \lambda_T \Delta T^2 - \lambda_{TT} \Delta T^3 + \frac{1}{2} \lambda_x \dot{x} \Delta T + \frac{1}{2} \lambda_{xT} \dot{x} \Delta T^2 - \frac{1}{2} k_s \dot{x} x \quad (8)$$

ただし, 式 (3) を代入し,  $|\dot{x}\ddot{x}| \ll 1$  とした.

### 3. 非線形変位モデルを用いた FF 制御 [7]

Arakawa ら [6] により, 線形変位モデル・線形温度モデルを用いた TCPA 変位の FF 制御について性能調査が行われたが, 大きな誤差が存在した. これに対して, 著者ら [7] は図 1 のような非線形変位モデル・線形温度モデルを用いた FF 制御器を開発した.

式 (6) の時定数が式 (5) のものよりも大きいとし, 温度ダイナミクスのみダイナミクス補償を行う. 式 (5) において,  $\dot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$  とすると, 目標変位  $x_d > 0$  に対する目標温度差  $\Delta T_d > 0$  は次のようになる.

$$\Delta T_d = \Delta T_{NL}(x_d) = \frac{1}{2\lambda_{xT}} \left( \sqrt{\lambda_x^2 + 4\lambda_{xT}k_s x_d} - \lambda_x \right) \quad (9)$$

$\Delta T_d$  に対して, 式 (6) より求まる電圧の二乗から温度差への伝達関数  $G_{TV}(s)$  を用いて, 次のように温度ダイナミクス補償を行い, 電圧の二乗の目標値  $V_d^2$  を得る.

$$V_d^2 = \frac{1}{1 + \tau s} \tilde{G}_{TV}^{-1}(s) \Delta T_d \quad (10)$$

$$G_{TV}(s) = \frac{(1/RC_v)}{s + (\lambda/C_v)} \quad (11)$$

ただし,  $\tau > 0$  は設計パラメータの時定数,  $\tilde{G}_{TV}(s)$  は実験より同定した  $G_{TV}(s)$  である. 最後の飽和要素は TCPA の溶融を防ぐために, 鈴木と釜道 [2] に倣って導入したものであり, 次式で表される.

$$V_{in} = \begin{cases} V_{\max} & (V_{\max} < V_d^2) \\ \|V_d\| & (0 < V_d^2 \leq V_{\max}^2) \\ 0 & (V_d^2 \leq 0) \end{cases} \quad (12)$$

ただし,  $V_{\max}$  は最大電圧である.

この FF 制御器において, 安定挙動下で式 (9) より得られた  $\Delta T_d$  に  $\Delta T$  が近くなれば,  $x$  もまた  $x_d$  に近くなることが確認されている. しかし, 式 (10) に示した線形温度モデルによる電圧の二乗値を印加しても,  $\Delta T$  と  $\Delta T_d$  の間には誤差が生じ, 結果的に変位誤差が生じた. これを改善するひとつの方法は, 式 (8) に示した非線形温度モデルの利用であるが, 非線形性ゆえにダイナミクス補償にそのまま使うことが難しい.

### 4. 温度の逆ダイナミクスを Hammerstein モデルで近似した FF 制御器

本研究では, FF 制御器における誤差低減を目的とし, 非線形温度モデルの逆ダイナミクスを非線形変換と線形な伝達関数に分離することで, 非線形ダイナミクス補償を行う FF 制御器を提案する. 提案する FF 制御器の全体像を図 2 に示す.

提案方法において, 線形な伝達関数は式 (10) のものをそのまま用いる. このとき, 式 (10) の結果として得られる定常状態における電圧二乗値  $V_L^2(\Delta T)$  は, 式 (6) の線形温度モデルより求まる次のものとなる.

$$V_L^2(\Delta T) = \tilde{R}_L \tilde{\lambda}_L \Delta T \quad (13)$$

ただし,  $\tilde{\lambda}_L$  は線形モデルとして同定したパラメータを示す. 一方で, 式 (8) の非線形温度モデルより求まる定常状態での電圧二乗値  $V_{NL}^2(\Delta T)$  は次のものとなる.

$$V_{NL}^2(\Delta T) = \tilde{R}_{NL} \left( \tilde{\lambda}_{0,NL} \Delta T + \tilde{\lambda}_{T,NL} \Delta T^2 + \tilde{\lambda}_{TT,NL} \Delta T^3 \right) \quad (14)$$

ただし,  $\tilde{\lambda}_{NL}$  は非線形モデルとして同定したものを示す. 本研究では, 非線形変換は  $V_L^2(\Delta T)$  と  $V_{NL}^2(\Delta T)$  の比を調整するものと考え, 次のものを用いた.

$$\Delta T_d' = \frac{V_{NL}^2(\Delta T_d)}{V_L^2(\Delta T_d)} \Delta T_d \quad (15)$$

## 5. 評価実験

### 5.1 TCPA の作成

TCPA の材料として, まつうら工業製ナイロン (テグス 30 号) を用いた. ジュール熱により加熱するため

表 1 変位モデルにおけるパラメータ同定結果

モデル	$\frac{b}{m}$ $\times 10^2$ [1/s]	$\frac{k_s}{m}$ $\times 10^2$ [1/s <sup>2</sup> ]	$\frac{\alpha_x S_c}{m}$ $\times 10^{-2}$ [m/(s <sup>2</sup> ·K)]	$\frac{\alpha_x T S_c}{m}$ $\times 10^{-4}$ [m/(s <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	適合率 [%]
線形	5.799	0.065	0.297		0.002	92.28	23.08
非線形	5.766	1.861	5.430	4.810	0.051	91.71	99.47

表 2 温度モデルにおけるパラメータ同定結果

モデル	$\frac{1}{RC_v}$ $\times 10^{-2}$ [K/(J·Ω)]	$\frac{\lambda_0}{C_v}$ $\times 10^{-2}$ [1/s]	$\frac{\lambda_T}{C_v}$ $\times 10^{-5}$ [1/(K·s)]	$\frac{\lambda_{TT}}{C_v}$ $\times 10^{-8}$ [1/(K <sup>2</sup> ·s)]	$\frac{\lambda_x}{C_v}$ $\times 10^{-4}$ [1/m]	$\frac{\lambda_{xT}}{C_v}$ $\times 10^{-6}$ [1/(K·m)]	$\frac{k_s}{C_v}$ $\times 10^{-6}$ [K/m <sup>2</sup> ]	$f$ [Hz]	適合率 [%]
線形	1.935	2.576						0.004	99.83
非線形	1.937	2.444	2.292	-1.550	1.313	-3.579	7.593	0.004	99.88

に振る前にニクロム線 (直径 0.2mm) を巻き付けた後、ナイロンの一端に約 590g のおもりを吊るし、別端に取り付けた DC モータを回転させてコイル化直前まで振った。その後、直径 1.6mm の芯棒へ巻き付けてコイル化し、アズワン製温乾燥器 OFW-300B を用いて 180°C で 1 時間加熱することで熱処理を行った。

## 5.2 セットアップ

実験環境を図 3 に示す。実験では、TCPA 下端に取り付けた板の変位を KEYENCE 製レーザ変位計 IL-300 で測定し、KEYENCE 製アンプ IL-1000 と CONTEC 製 AD ボード AD16-16U(PCI)EV を通してコンピュータへ取り込んだ。TCPA の温度は、Optris 製赤外線サーモグラフィカメラ OPTPI230O23T900 により計測した。ジュール熱のための電圧は Maxon motor 製サーボアンプ LSC 30/2 により印加し、その指令値は Interface 製 DA ボード PCI-3340 からのアナログ出力で与えた。実験では、サンプリング周波数を 100Hz とし、300g のおもりを吊るして初期条件および環境温度を可能な限り揃えた安定挙動下でデータ取得を行った。

評価実験では、次の 3 つの FF 制御器を比較した。

**線形 FF** : 線形変位モデルと線形温度モデルを用いた FF 制御 (式 (16), (10), (12))

**非線形 FF (従来方法)** : 非線形変位モデルと線形温度モデルを用いた FF 制御 [7] (式 (9), (10), (12))

**非線形 FF (提案方法)** : 非線形変位モデルと線形温度モデルを用いた FF 制御 (式 (9), (10), (15), (12))

ただし、式 (1) の線形変位モデルによる目標温度は次式で与えた。

$$\Delta T_d = \Delta T_L(x_d) = \frac{k_s x_d}{c} \quad (16)$$

## 5.3 パラメータ同定

評価実験の前に、パラメータ同定を行った。同定のために、次のステップ入力を加えた。

$$V_{in}(t) = \begin{cases} \sqrt{V_{ref}^2} & (10 \leq t < 150) \\ 0 & (0 \leq t < 10, 150 \leq t < 300) \end{cases}$$

ここで、参照電圧  $V_{ref}$  として  $V_{ref}^2 = 40, 80, 120[V^2]$  の 3 種類を与え、各電圧に対して 5 回計測を行った。パラメータ同定は非線形最小二乗法により行った。

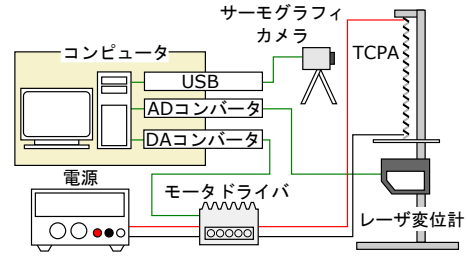


図 3 実験環境の全体像

同定して得られた変位モデルと温度モデルのパラメータをそれぞれ表 1 と表 2 に示す。表 2 の  $f$  は式 (6) の固有周波数、表 1 の  $f_1$  と  $f_2$  は式 (1), (5) の固有周波数である。表 2 より、温度モデルの適合率はわずかに非線形モデルのほうが高いが、線形モデルと非線形モデルの固有周波数はほぼ等しい。このため、温度ダイナミクスは線形モデルで近似できると考えられる。

## 5.4 実験結果

次の目標変位を与えたときの各制御器の性能について評価した。

$$x_d(t) = \begin{cases} x_{ref} & (10 \leq t < 150) \\ 0 & (0 \leq t < 10, 150 \leq t < 300) \end{cases}$$

ここで、 $x_{ref}$  は参照変位であり、実験では  $x_{ref} = 20, 40[mm]$  とした。また、設計パラメータ  $\tau$  は、 $x_{ref} = 20[mm]$  のとき  $\tau = 1/(0.03\pi)[s]$ 、 $x_{ref} = 40[mm]$  のとき  $\tau = 1/(0.016\pi)[s]$  とした。

$x_{ref} = 20[mm]$ 、 $x_{ref} = 40[mm]$  の結果の一例をそれぞれ図 4(a) と図 4(b) に示す。また、各制御器に対して 3 回実験を行ったときの変位と温度の二乗平均誤差を、図 5 と図 6 にそれぞれ示す。結果より、線形変位モデルを用いる線形 FF に比べて、非線形変位モデルを用いる非線形 FF は変位誤差を低減できている。非線形 FF 同士を比較すると、変位と温度の両方において提案方法では誤差低減が確認できる。このため、温度ダイナミクスの非線形変換は有用であると考えられる。図 5 の変位誤差と図 6 の温度誤差で変動の様子が異なるが、これは、環境から受ける外乱、および提案方法で無視した変位ダイナミクスによるものと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、TCPA 変位に対する FF 制御器の性能改善を目的とし、非線形温度モデルの逆ダイナミクス

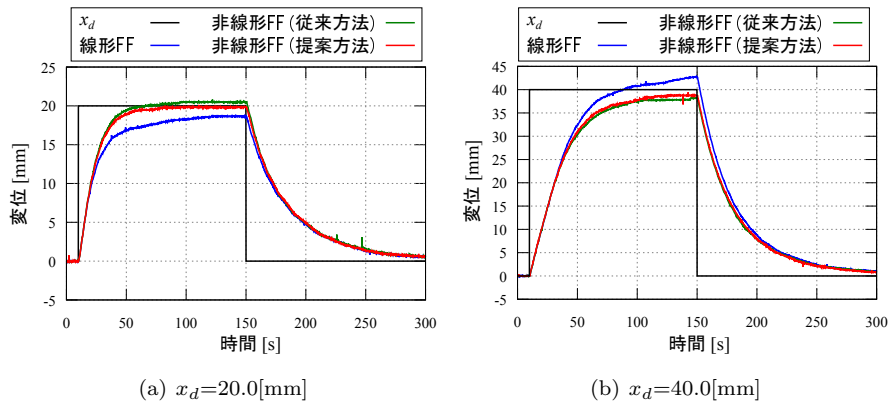


図4 実験結果の一例

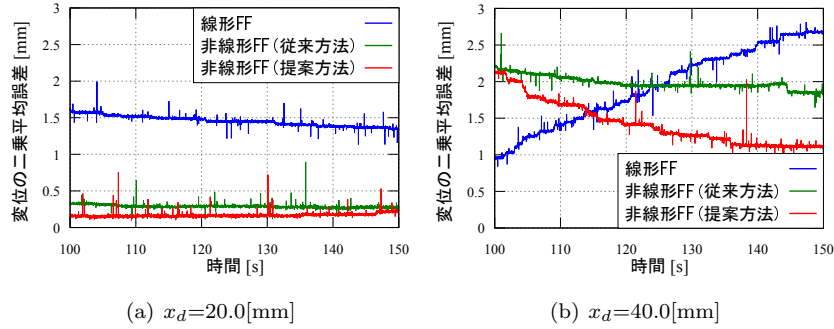


図5 目標変位  $x_d$  に対する二乗平均誤差

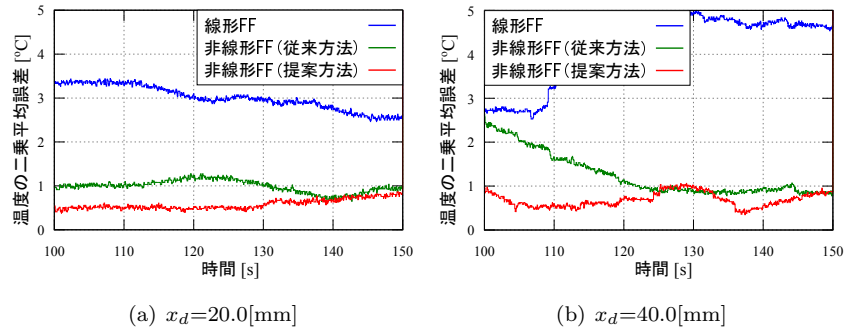


図6 非線形温度モデルより得られる目標温度  $\Delta T_d = \Delta T_{NL}(x_d)$  に対する二乗平均誤差

を Hammerstein モデルとみなして非線形ダイナミクス補償に用いる FF 制御器を提案した。線形な伝達関数は位相進み補償に、非線形変換は目標電圧の調整にそれぞれ用いた。ステップ状の目標変位に対する制御実験において、提案方法による変位誤差低減を確認した。

謝辞 本研究は、科研費基盤研究 (B) JP16H02882(研究代表者:田原健二) および科研費基盤研究 (B) JP17H03204(研究代表者:高木賢太郎) の支援を受けた。

#### 参考文献

[1] C. S. Haines et al. : “Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread,” Science, vol.343, no.6173, pp.868-872, 2014.  
 [2] 鈴木元哉, 釜道紀浩 : “拮抗型ナイロン繊維アクチュエータの変位制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 予稿集, 横浜, Jun. 2016, 2P2-14b7.  
 [3] 鈴木元哉, 釜道紀浩 : “ナイロン繊維アクチュエータのセンサレス変位制御”, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会予稿集, 札幌, Dec. 2016, pp.767-770.

[4] J. Zhang et al. : “Modeling and Inverse Compensation of Hysteresis in Supercoiled Polymer Artificial Muscles,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol.2, no.2, pp.773-780, 2017.  
 [5] M. C. Yip and G. Niemeyer : “High-Performance Robotic Muscles from Conductive Nylon Sewing Thread,” in Proc. of the 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Seattle, Washington, USA, May 2015, pp.2313-2318.  
 [6] T. Arakawa et al. : “Position control of fishing line artificial muscles (coiled polymer actuators) from Nylon thread,” in Proc. of SPIE, vol. 9798, Las Vegas, NV, USA, Mar. 2016, 97982W.  
 [7] 舩屋賢ら : “釣糸人工筋肉の束を利用したアクチュエータユニットの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 予稿集, 郡山, May 2017, 2A1-A02.  
 [8] K. Masuya et al. : “Nonlinear Dynamics of Twisted and Coiled Polymer Actuator made of Conductive Nylon based on the Energy Balance (accepted),” in Proc. of the 2017 IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Munich, Germany, Jul. 2017, WAT5.3.