

電圧駆動型 Twisted and Coiled Polymer Actuator における 温度応答の非線形モデリング

○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

人が行う搬送作業や高齢者の運動を補助するためのパワーアシストに期待が寄せられており、その駆動のための柔らかく高出力なアクチュエータが求められている。そのようなアクチュエータのひとつとして、Hainesら[1]により発見された「振ることでコイル化したナイロン繊維を加熱すると発生する収縮現象」を利用した、Twisted and Coiled Polymer Actuator (TCPA) が考えられる。TCPA はアクチュエータ質量に比べて大きな出力が可能であるとともに、最大で 25% の大収縮が可能であるという特徴をもつ。

この TCPA を制御するために、金属へ電圧を印加した際のジュール熱による駆動方法 [1, 2, 3, 4, 5] がこれまでに提案されており、その制御のためのモデリングが行われてきた [2, 3, 5]。これらのモデリングは、電力(電圧の二乗)と温度の関係を線形な伝達関数で表現している。しかし、図 1 のように、実際の温度と電力の関係は、線形な伝達関数としてフィッティングしたものが折れたような形状となっており、非線形性をもつ。この非線形性は、鈴木ら [5] が行ったように制御器の有効性をシミュレーションにより検証する際に、影響すると考えられる。

そこで、本研究では、電圧駆動される TCPA シミュレーションのための非線形要素を含む温度モデルを構築する。非線形性の原因として、エネルギー収支の観点から、1) TCPA 表面からの熱輻射、2) TCPA に蓄えられるポテンシャルエネルギーを考える。さらに、材料の温度変化の観点から、3) 抵抗の温度変化による入力電力の変化を考え、それらの影響について検証する。

2. 電圧駆動型 TCPA の温度における 線形モデル

電圧を印加したときのジュール熱により、TCPA を加熱することを考える。Yip ら [2] はニュートンの冷却法則に基づいて、TCPA の温度モデルとして次の 1 次モデルを構築した。

$$C_v \frac{dT}{dt} = P_{in} - \alpha S_{conv}(T - T_{env}) \quad (1)$$

ただし、 T は TCPA の温度、 T_{env} は環境の温度、 α は熱伝達率、 S_{conv} は TCPA の対流に曝される表面積である。 P_{in} は入力電圧 V_{in} による入力電力であり、次式で与えられる。

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{R} \quad (2)$$

ただし、 R は抵抗である。

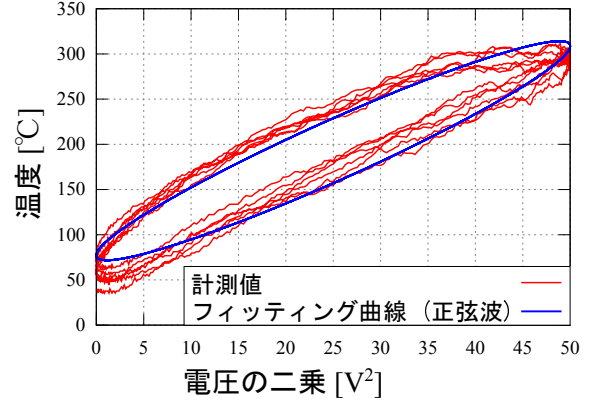


図 1 Shieldex 製ナイロンから作成した TCPA における 0.01 [Hz] の正弦波で与えた電力 (電圧の二乗) と温度の関係

式 (1) を時間積分することで、次のエネルギー収支に関する式が得られる。

$$E_T = E_{in} - E_{conv} \quad (3)$$

ただし、

$$E_T = \int C_v \frac{dT}{dt} dt \quad (4)$$

$$E_{in} = \int P_{in} dt \quad (5)$$

$$E_{conv} = \int \alpha S_{conv}(T - T_{env}) dt \quad (6)$$

であり、それぞれ熱として蓄えられる内部エネルギー、熱伝達により外部へ散逸するエネルギー、外部から入力されるエネルギーを表す。

式 (3) において、外部へ散逸するエネルギーとして熱伝達項のみを考えているが、外部への散逸として熱輻射も存在する。また、式 (3) は、入力されるエネルギーがすべて温度変化に用いられることを意味するが、実際には TCPA の収縮にもエネルギーは用いられる。さらに、Yip ら [2] は式 (2) 中の抵抗値を一定としているが、材料の温度変化に伴い、抵抗値の変化が生じると予想される。

3. エネルギー収支と抵抗の温度変化に 基づく温度ダイナミクス

本研究では、前述した、1) 熱輻射、2) TCPA 収縮のためのエネルギー、3) 抵抗の温度変化を考慮した TCPA 温度の時間変化モデルを構築する。

熱輻射による外部へのエネルギー E_{rad} は、熱輻射による伝熱量を時間積分したものに等しく、次式で表される。

$$E_{\text{rad}} = \int S_{\text{rad}} \epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4) dt \quad (7)$$

ただし、 S_{rad} は外部へ熱輻射する部分の表面積、 ϵ は TCPA の放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数である。次に、TCPA 収縮のためのエネルギーは、コイルがばねとして収縮することによる弾性エネルギーとおもりを上昇させる位置エネルギーの和になると考えられるため、次式で表される。

$$E_P = \frac{1}{2} k_s (l - l_g)^2 + mg(l - l_g) \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} k_s (l^2 - l_g^2) \quad (9)$$

ただし、 l は TCPA の長さ、 g は重力加速度、 k_s はばね定数である。 l_g はおもりを下げたときの TCPA の長さであり、 $k_s l_g = mg$ を満たすとする。抵抗の温度変化は、次式で表される。

$$R = R(T) = \rho_0 (1 + \beta(T - T_0)) \frac{L}{A} \quad (10)$$

ただし、 β は抵抗の温度係数、 T_0 は基準温度、 ρ_0 は $T = T_0$ における抵抗率であり、これらは抵抗の材料に基づく。 L は抵抗の長さ、 A は抵抗の断面積である。式 (10) を用いて式 (2) を補正すると、次式が得られる。

$$P_{\text{in}} = \frac{A}{\rho_0 L} \frac{V_{\text{in}}^2}{1 + \beta(T - T_0)} \quad (11)$$

式 (7), (9), (11) より、エネルギー収支は次式のように書き直される。

$$E_P + E_T = E_{\text{in}} - E_{\text{conv}} - E_{\text{rad}} \quad (12)$$

これを時間で微分して整理すると、TCPA 温度の非線形ダイナミクスとして次式が得られる。

$$C_v \frac{dT}{dt} = \frac{A}{\rho_0 L} \frac{V_{\text{in}}^2}{1 + \beta(T - T_0)} - \alpha S_{\text{conv}} (T - T_{\text{env}}) - S_{\text{rad}} \epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4) - k_s \dot{l} \quad (13)$$

4. 評価試験

4.1 TCPA の作成

本試験では、非線形モデルを評価するために、TCPA の材料としてミツフジ製の銀メッキナイロン AG-poss 100/34 2ply と Shieldex 製の銀メッキナイロン PN#260151023534(235/34 4ply) の 2 種類を用いる。ナイロンのコイル化は、図 2 に示す装置の DC モータ側にナイロンの一端を、おもり側にその別端を取り付けて行った。ただし、作成時におけるおもりの質量を約 55g にするために、ミツフジ製ナイロンは 3 本を、Shieldex 製ナイロンは 1 本を同時にコイル化した。最後に、アズワン製の強制対流方式定温乾燥器 OFW-300B を用いて、ミツフジ製ナイロンは 210°C まで、Shieldex 製ナイロンは 200°C まで加熱することで TCPA の熱処理を行った。

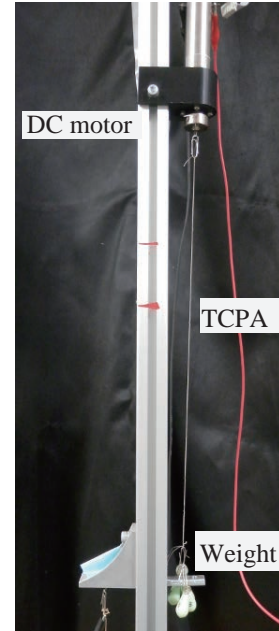


図 2 TCPA 作成装置

4.2 非線形モデルの離散化

ARX モデルに基づいて同定を行うために、差分近似により式 (13) を次のように離散化する。

$$T_k = \frac{A \Delta t}{C_v \rho_0 L} \frac{V_{\text{in},k}^2}{1 + \beta(T_{k-1} - T_0)} + \left(1 - \alpha S_{\text{conv}} \frac{\Delta t}{C_v}\right) T_{k-1} + \alpha S_{\text{conv}} \frac{\Delta t}{C_v} T_{\text{env}} - S_{\text{rad}} \frac{\Delta t}{C_v} \epsilon \sigma (T_{k-1}^4 - T_{\text{env}}^4) - \frac{k_s}{C_v} l_g \Delta l_{k-1} + \frac{k_s}{C_v} l_g \Delta l_{k-2} - \frac{k_s}{C_v} \Delta l_{k-1}^2 + \frac{k_s}{C_v} \Delta l_{k-1} \Delta l_{k-2} \quad (14)$$

ただし、添字 k は時刻のインデックス、 Δt はサンプリング間隔であり、 $\Delta l_k = l_k - l_g$ である。これを変形して、同定のためのモデルを得る。

$$T_k = \theta_1 \frac{V_{\text{in},k}^2}{1 + \beta(T_{k-1} - T_0)} + \theta_2 T_{k-1} + \theta_3 \epsilon \sigma (T_{k-1}^4 - T_{\text{env}}^4) + \theta_4 \Delta l_{k-1} + \theta_5 \Delta l_{k-2} + \theta_6 \Delta l_{k-1}^2 + \theta_7 \Delta l_{k-1} \Delta l_{k-2} + \theta_8 \quad (15)$$

ただし、 θ_i ($i = 1, \dots, 8$) は同定対象であるパラメータである。右辺第 3 項は値のオーダーを近くするため、および環境の温度変化に対応するために、 $\epsilon \sigma (T_{k-1}^4 - T_{\text{env}}^4)$ の形で同定に用いた。また、銀メッキナイロンを用いていることから、 $\beta = 4.15 \times 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]$ 、 $T_0 = 0.0 [^\circ\text{C}]$ 、 $\epsilon = 0.03$ とした [6, 7]。

4.3 実験セットアップ

1) 熱輻射、2) TCPA 収縮のためのエネルギー、3) 抵抗の温度変化の影響について検証するために、表 1 に示す 8 つの組み合わせについて同定および評価を行った。

表1 検証した8つのモデル

モデル	熱輻射 E_{rad}	収縮用 エネルギー E_P	抵抗の 温度変化 $R(T)$
線形モデル	×	×	×
E_{rad}	○	×	×
E_P	×	○	×
$R(T)$	×	×	○
$E_{rad} + E_P$	○	○	×
$E_{rad} + R(T)$	○	×	○
$E_P + R(T)$	×	○	○
$E_{rad} + E_P + R(T)$	○	○	○

実験環境を図3に示す。実験では、作成した TCPA の下端におもりとレーザ変位計のための板を取り付け、KEYENCE 製レーザ変位計 IL-300 により変位計から TCPA 下端までの距離を測定した。レーザ変位計の測定値は、KEYENCE 製アンプ IL-1000 および 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。一方で、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。TCPA を電圧で駆動するために、Maxon motor 製サーボアンプ LSC 30/2 を用いた。サーボアンプへの指令値の入力として、Interface 製 DA ボード PCI-3340 からのアナログ出力を用いた。

実験では、約 44g の荷重のもとで、次のステップ状の入力電圧 V_{in} を加えた。

$$V_{in}(t) = \begin{cases} V_{ref} & (\text{if } 10 \leq t < 70) \\ 0.0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (16)$$

ただし、 V_{ref} は参照電圧であり、TCPA の到達温度からミツフジ製ナイロンでは 5, 7, 9V, Shieldex 製ナイロンでは 4, 5, 7V とした。実験は各電圧について 10 回ずつ行い、各試行ではサンプリング間隔 $\Delta t = 10[\text{ms}]$ として、150 秒までのデータ (15000 個) を取得した。

同定では、各電圧における最初の 5 回までの試行をまとめた計 15 回のデータを用い、式 (15) における θ_i , ($i = 1, \dots, 8$) を最小二乗法により同定した。ただし、同定には、各試行における 15000 個のデータから最初 100 個、最後 100 個を取り除いたものを用いた。

評価では、各電圧における 6 回目から 10 回目のデータを用い、評価指標として次式で表される推定誤差の二乗平均を用いた。

$$e_i = \sqrt{\frac{1}{14800} \sum_{k=101}^{14900} (\tilde{T}_k - \hat{T}_k)^2}, \quad (i = 6, \dots, 10)$$

\tilde{T}_k は時刻 k における温度計測値、 \hat{T}_k は同定した平均モデルを用いて得られた時刻 k における温度である。また、モデルに含まれる変位 Δl_k は同定・評価ともに計測値を用いた。

4.4 ステップ応答に対する推定結果

ミツフジ製ナイロンの推定結果を図4に、Shieldex 製ナイロンの推定結果を図5にそれぞれ示す。ここで、エラーバーは e_i の標準偏差を表す。

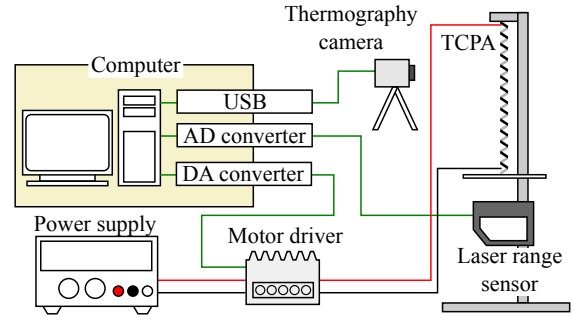


図3 実験環境

まず図4の結果より、ひとつの非線形要素を入れた3つのモデル (E_{rad} , E_P , $R(T)$) では、線形モデルと推定誤差が同程度または増加している。一方で、非線形要素を2つ以上含むモデルは、全電圧で平均誤差が低減している。特に、ポテンシャルエネルギー項と抵抗の温度変化を含むモデル ($E_P + R(T)$) は、全電圧で最も低い平均誤差を示している。さらに、標準偏差を含めて考えても、線形モデルと明確に差があることが確認できる。これに対して、3つの非線形要素を含むモデル ($E_{rad} + E_P + R(T)$) は、 $E_P + R(T)$ に比べて誤差が少し増加している。これは、熱輻射項が温度の4乗に比例することから、温度の計測誤差が他の項に比べてより影響しやすいためだと考えられる。

次に図5の結果に着目すると、ミツフジ製ナイロンと異なり、熱輻射のみのモデル E_{rad} と抵抗の温度変化のみのモデル $R(T)$ においても、平均誤差の低減が確認できる。この2つの要素をもつ $E_{rad} + R(T)$ もまた誤差が小さいことがわかる。一方で、単独では7Vのときに推定誤差が増加している要素 E_P も、他のものと組み合わせることで誤差の低減ができています。特に、ミツフジ製ナイロンと同様に、Shieldex 製ナイロンにおいても $E_P + R(T)$ は線形モデルに比べて推定誤差が低減できています。

以上より、非線形要素を組み合わせたモデルは推定誤差が線形モデルより小さくなっていることから、モデルとしてより実際のものに近いものと考えられる。また、材料によらず、 $E_P + R(T)$ は明確な差を見せていることから、モデルとして $E_P + R(T)$ が最もよいと考えられる。

4.5 正弦波に対する推定結果

最後に、図1のデータに対して、前節の同定により得られた Shieldex のモデルを用いて推定を行った。電圧入力は、その二乗が正弦波状になるように次式で与えた。

$$V_{in}(t) = \sqrt{25 - 25 \cos(0.02\pi t)} \quad (17)$$

ここでは、線形モデル、 $E_P + R(T)$ について評価した。結果を図6に示す。図6より高温では追従性がよいとはいえないが、 $E_P + R(T)$ は線形モデルよりも計測値に近い結果を得られることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、TCPA の数値シミュレーションのための温度に関する非線形モデルを構築した。1) 熱輻射、

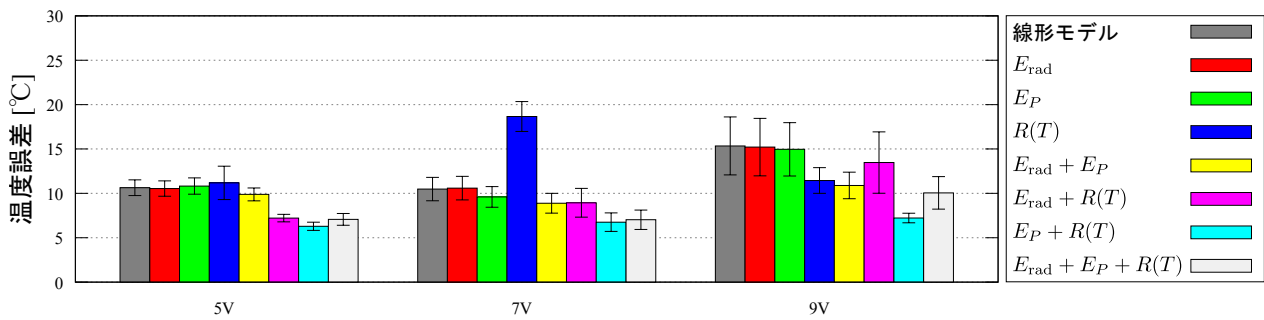


図4 Mitsuboshiの同定誤差 (エラーバーは標準偏差)

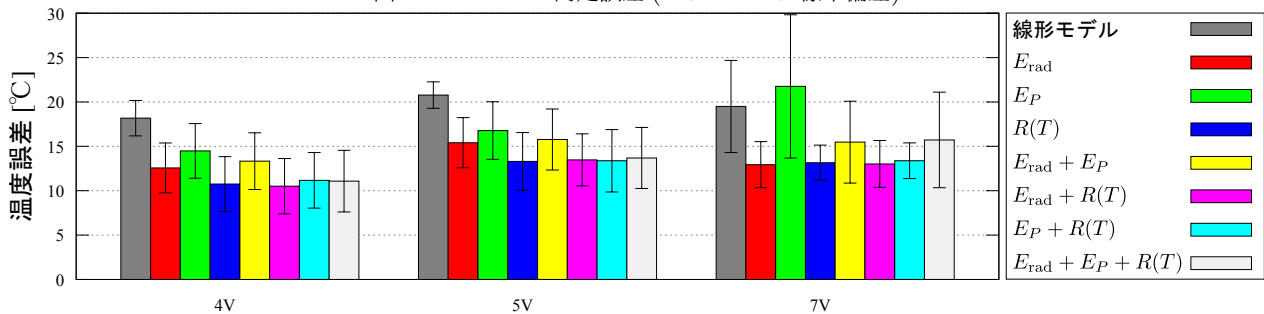


図5 Shieldexの同定誤差 (エラーバーは標準偏差)

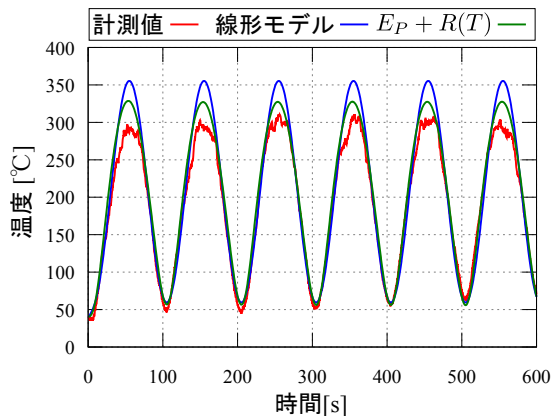


図6 正弦波に対する推定結果

2)TCPA 収縮のためのエネルギー、および3) 抵抗の温度変化を非線形性の原因と考えてモデル化し、ステップ応答から各パラメータを同定した。実験により、従来の線形モデルに比べ、非線形性を考慮したモデルでは温度の推定誤差が低減されることを示した。特に、2)と3)の2つの要素を考慮したモデルにおいて、標準偏差を含めても明確な差が出ることを確認した。

今後の課題は、変位に関するモデルを求め、温度モデルと変位モデルを合わせたシミュレータを構築することである。

謝辞 本研究は、NEDO 次世代ロボット中核技術開発革新的ロボット要素技術分野「高分子人工筋肉アクチュエータによる柔らかな運動装具の研究開発」(課題番号15657408)の支援で行われた。

参考文献

[1] Carter S. Haines et al. : “Artificial Muscles from

Fishing Line and Sewing Thread,” Science, vol.343, no.6173, pp.868-872, 2014.
 [2] Michael C. Yip and Günter Niemeyer: “High-Performance Robotic Muscles from Conductive Nylon Sewing Thread,” Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, Washington, USA, May 2015, pp.2313-2318.
 [3] 荒川武士, 高木賢太郎: “ナイロン糸を用いた釣り糸人工筋肉 (Coiled Polymer Actuator) の位置制御”, 第16回システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.585-589, 名古屋, Dec. 2015.
 [4] Kyeong Ho Cho et al.: “A robotic finger driven by twisted and coiled polymer actuator,” Proceedings of SPIE 9798, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2016, Las Vegas, Nevada, USA, Mar. 2016, 97981J.
 [5] 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.
 [6] 電気学会編: “電気データブック”, p.12, 朝倉書店, 2011.
 [7] 日本機械学会編: “機械工学便覧 基礎編 α5 熱工学”, p.156, 日本機械学会, 2006.