

# 対流熱伝達の温度・速度依存性に基づく釣糸人工筋肉の変位モデリング

## Macroscopic Displacement Model of Twisted and Coiled Polymer Actuator based on the Temperature and Velocity Dependence of Convective Heat Transfer

○ 舩屋 賢 (九大)                      小野 秀 (九大)  
正 高木賢太郎 (名大)                  正 田原健二 (九大)

Ken MASUYA, Kyushu University, masuya@mech.kyushu-u.ac.jp  
Shu ONO, Kyushu University  
Kentaro TAKAGI, Nagoya University  
Kenji TAHARA, Kyushu University

A novel displacement model of the twisted and coiled polymer actuator (TCPA) is proposed. In order to explicitly deal with the effect of the convective heat transfer on the displacement behavior, we focus on the temperature and velocity dependence of the convective heat transfer and regard the convective heat transfer as one of the dissipation function. Through some experiments for three TCPAs, it is verified that the proposed model is more plausible than the conventional linear model.

**Key Words:** Twisted and coiled polymer actuator, Nonlinear modeling, Soft actuator

### 1 はじめに

人が行う作業を補助するためのパワーアシストが期待されており、そのためのアクチュエータには柔らかさと高出力が求められる。そのようなアクチュエータのひとつとして、釣糸人工筋肉 (Twisted and Coiled Polymer Actuator, TCPA) が挙げられる。TCPA は、振ることでコイル化した高分子繊維を加熱すると発生する収縮現象 [1] に基づくものであり、コイル化の方法にもよるが最大で 50% 近い収縮が可能である。

TCPA の加熱方法として、熱流体を用いる方法 [1, 2] と電圧印加時のジュール熱を用いる方法 [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8] が提案されている。前者は比較的高速に熱交換を行えるが、ポンプや流体の加熱器などの外部機器が必要である。一方で、後者は電圧を制御することで比較的容易に加熱制御が行えるため、これを用いた制御方法が多く提案されている [3, 4, 5, 6]。そこで、本研究もまた後者の方法を採用する。

TCPA のジュール熱による制御を行うために、これまでに TCPA への入力電力 (電圧) から温度、温度から変位までの動作モデリングが行われてきた。その多く [3, 4, 5, 6] は線形な伝達関数としてモデル化を行ったが、実際の TCPA においてそのふるまいは非線形なものであることが示されている [1, 8]。著者ら [8] は、エネルギーの観点から TCPA への入力電力と温度の関係を非線形モデルとして導出したが、温度から変位までのモデル化は行っていなかった。非線形な変位モデルとして、Cho ら [9] は実験データよりカーブフィッティングによるものを求めたが、これは理論的な裏付けがなく、一般的な適用は難しい。また、実際の TCPA において、図 1 に示すような対流熱伝達の違いが温度と変位の関係を変化させることが確認されたが、これを陽に扱った TCPA のモデルは著者らの知る限りない。

そこで、本研究では、対流熱伝達の違いを陽に考慮できる TCPA の非線形変位モデルを提案する。熱伝達係数が温度・速度に依存することに着目し、対流熱伝達によるエネルギー消散を散逸関数に導入することで、ラグランジュの運動方程式より提案モデルを導出する。

### 2 TCPA の変位モデリング

TCPA の変位モデルとして、Yip と Niemeyer [3] は二次遅れ系として表される次の線形モデルを提案した。

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

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

ここで、 $x$  は荷重を吊り下げたときのつり合い位置からの TCPA の変位である。 $m$ ,  $b$ ,  $k_s$ ,  $T$  はそれぞれ TCPA の質量、粘性係

数、弾性係数、温度であり、 $T_{\text{env}}$  は周囲環境の温度である。 $c$  は温度が変位へ与える影響を考慮するための温度係数である。実用上、 $T$  として、熱電対 [3] や放射温度計 [6]、サーモグラフィカメラ [8]、サーミスタ [9] で計測された代表温度が用いられる。また、式 (1) に代わり、一次遅れ系による同定 [6] も行われている。しかし、実際の関係には図 1 のような非線形性が存在する。

非線形なモデルとして、Cho ら [9] は実験データに対するカーブフィッティングによりモデルを求めた。しかし、このモデルは理論的な裏付けがなく、他の TCPA に用いることは難しい。また、図 1 に示すような、対流熱伝達の変化に伴うふるまいの変化を、これらのモデルは理論的に説明できない。

### 3 温度・速度に依存する熱伝達係数に基づく変位モデル

#### 3.1 TCPA のエネルギー

本研究では、対流熱伝達の影響を陽に表した TCPA の非線形変位モデルを提案する。提案モデルを導出するために、はじめに巨視的な観点からそのエネルギーについて整理し、ラグランジュの運動方程式を構築する。

運動エネルギー  $E_K$ 、ポテンシャルエネルギー  $E_P$ 、粘性により散逸するエネルギー  $E_b$  は次式で表される。

$$E_K = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 \quad (3)$$

$$E_P = \frac{1}{2} k_s x^2 \quad (4)$$

$$E_b = \int \frac{1}{2} b \dot{x}^2 dt \quad (5)$$

また、TCPA は熱で駆動されるものであるため、温度に関するエネルギーも考える必要がある。本稿では TCPA は電圧印加に伴うジュール熱により駆動されるとし、著者らの研究 [8] に基づいて次の 4 つのエネルギーを考える。

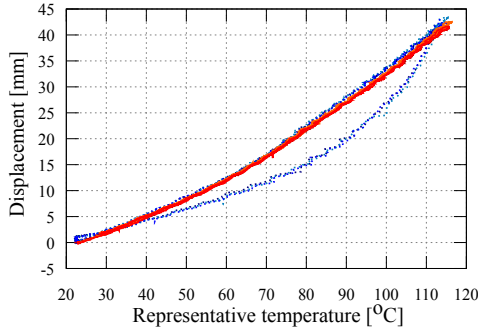
$$E_T = \int C_p \dot{T} dt \quad (6)$$

$$E_{\text{in}} = \int \frac{V_{\text{in}}^2}{R} dt \quad (7)$$

$$E_{\text{conv}} = \int \alpha S_c \Delta T dt \quad (8)$$

$$E_{\text{emi}} = \int S_{\text{emi}} \epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4) dt \quad (9)$$

ただし、 $E_T$  は温度変化により蓄えられる内部エネルギー、 $E_{\text{in}}$



**Fig.1** Real relationship between the representative temperature ( the maximum temperature ) and the displacement of a TCPA ( Matsuura ) in three trials which the step voltage is input. The solid and dot line are the case without and with the fan when cooling, respectively.

はジュール熱による入力エネルギー,  $E_{conv}$  は対流熱伝達により散逸するエネルギー,  $E_{emi}$  は放射熱伝達により散逸するエネルギーである. また,  $C_v$  は TCPA の熱容量,  $V_{in}$  は入力電圧,  $R$  はヒーターの抵抗値,  $\alpha$  は熱伝達係数,  $S_c$  は TCPA の対流に曝される表面積,  $S_{emi}$  は外部へ熱輻射する部分の表面積,  $\epsilon$  は TCPA の放射率,  $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数である.

一般化座標を  $x$  とすると, 式 (3) および式 (4) よりラグランジアン  $L$  は次のように表される.

$$L \equiv E_K - E_P. \quad (10)$$

残りのエネルギーはすべて外部へ散逸するエネルギーとみなすと, ラグランジュの運動方程式は次式で表される.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x} - \frac{\partial \dot{E}_D}{\partial \dot{x}} \quad (11)$$

$$E_D = E_T + E_b + E_{conv} + E_{emi} - E_{in} \quad (12)$$

ここで, 入力エネルギーを負の散逸とみなした.

### 3.2 熱伝達係数の温度・速度依存性

TCPA の変位モデルにおいて対流熱伝達の影響が存在することから,  $\alpha$  は  $\dot{x}$  の関数になると考えられる. そこで, この依存性が存在することを伝熱工学の観点より示す.

伝熱工学において,  $\alpha$  はヌセルト数  $Nu$  を用いて表される [10].

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} Nu \quad (13)$$

ただし,  $\lambda$  は流体の熱伝導率,  $l$  は代表長さである. TCPA の駆動により強制対流が発生すると仮定すると, ヌセルト数はレイノルズ数  $Re$ , プラントル数  $Pr$  を用いて表すことができる.

$$Nu = Nu(Re, Pr) \quad (14)$$

$$Re = \frac{v\bar{l}}{\nu} \quad Pr = \frac{\nu}{\gamma}$$

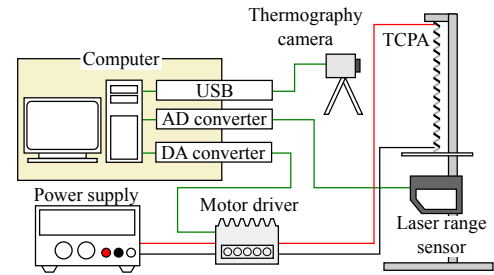
ただし,  $\nu$  は流体の動粘度,  $\gamma$  は流体の温度拡散率,  $v$  は TCPA と流体間の相対速度である. 一般的に  $\nu$  は温度に依存するため [10],  $Re$  と  $Pr$  はともに TCPA 温度  $T$  の関数として表すことができる. また, 明らかに,  $Re$  は TCPA の収縮速度  $\dot{x}$  の関数となる. よって,  $Nu$  は温度・速度依存性を持つため. 式 (13) より熱伝達係数  $\alpha$  もまた温度・速度依存性を持つと考えられる.

### 3.3 提案する変位モデル

SMA のモデリングにおいて,  $\alpha$  は二次関数 [11] や多項式 [12] により近似される. 本研究では,  $\alpha$  は非線形性をもつとし,  $\dot{x} = 0$ ,



**Fig.2** Fabrication machine of TCPA.



**Fig.3** Overview of the experimental environment.

$\Delta T = 0$  まわりのテイラー展開で二次近似したものを考える.

$$\alpha(\dot{x}, T) \simeq \alpha_0 + \alpha_x \dot{x} + \alpha_T \Delta T + \frac{1}{2} \alpha_{xx} \dot{x}^2 + \alpha_{xT} \dot{x} \Delta T + \frac{1}{2} \alpha_{TT} \Delta T^2 \quad (15)$$

よって, 式 (11) より, 次の運動方程式が得られる.

$$m\ddot{x} + (b + \alpha_{xx} S_c \Delta T) \dot{x} + k_s x = \alpha_x S_c \Delta T + \alpha_{xT} S_c \Delta T^2 \quad (16)$$

ここで, 提案モデル (式 (16)) は線形モデル (式 (1)) を含むモデルとなっていることに注意されたい.

## 4 パラメータ同定実験

### 4.1 TCPA の作成

モデルの妥当性を 3 種類の TCPA を用いて評価した. 一つめの TCPA は, ミツフジ製の銀メッキナイロン AGposs 100/34 2ply を, Cho ら [7] の作成方法に倣って 3 本同時に撚ることで作成した. 二つめは, Shieldex 製の銀メッキナイロン PN#260151023534(235/34 4ply)1 本を撚ることで作成した. 最後に, 三つめは, 0.2mm 径のニクロム線を巻き付けたナイロン (まつうら工業, テグス 30 号) をコイル化直前まで撚った後, 1.6mm の芯棒へ巻き付けてコイル化した. 本研究では, 各 TCPA をそれぞれ Mitsufuji, Shieldex, Matsuura と呼ぶこととする. ナイロンのねじりは, 図 2 に示す装置を用いて行った. その際, DC モータ側にナイロンの一端を, 張力のためのおもり側に別端を取り付けている. おもりは, Mitsufuji と Shieldex では約 91g, Matsuura では約 590g のものをそれぞれ用いた. コイル化後, アズワン製の定温乾燥器 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.

### 4.2 実験環境

実験環境を図 3 に示す. 実験では, 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. その測定値は, 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

**Table 1** Parameters of the step input

TCPA	$V_{\text{ref}}^2$ [V <sup>2</sup> ]			$t_{\text{step}}$ [s]	$t_f$ [s]
	1	2	3		
Mitsufuji	20	40	60	70	150
Shieldex	40	80	120	70	150
Matsuura	40	80	120	130	250

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。Interface製DAボードPCI-3340からのアナログ出力で指令値をMaxon motor製サーボアンプLSC 30/2へ入力し、その電圧出力によりTCPAを駆動させた。実験では、サンプリング周波数を100Hzとした。

### 4.3 同定実験

同定のために、次のステップ入力を加えた。

$$V_{\text{in}}(t) = \begin{cases} \sqrt{V_{\text{ref}}^2} & (10 \leq t < t_{\text{step}}) \\ 0 & (0 \leq t < 10, t_{\text{step}} \leq t < t_f) \end{cases}, \quad (17)$$

ここで、 $t_{\text{step}}$ はステップ入力を終える時間、 $t_f$ は計測終了時間、 $V_{\text{ref}}$ は参照電圧である。実験では3種類の $V_{\text{ref}}$ を与え、各参照電圧に対して5回計測を行った。各TCPAで用いた $V_{\text{ref}}$ 、 $t_{\text{step}}$ 、 $t_f$ を表1に示す。実験時に各TCPAに吊り下げられるおもりは、Mitsufuji, Shieldex, Matsuuraのそれぞれで55g, 101g, 274gとした。実験では、以下の4つのモデルについて、Levenburg-Marquardt法を用いた収束計算によりパラメータ同定を行った。

**Yip&Niemeyer** 式(1)の線形モデル [3]

**TDD** 式(1)に温度依存の粘性項 $\alpha_{xx}S_c\Delta T\dot{x}$ を加えたモデル

**QT** 式(1)に温度の二乗項 $\alpha_{xT}S_c\Delta T^2$ を加えたモデル

**Proposed** 式(16)の提案モデル

同定して得られたパラメータを表2に示す。表中の $f_1$ 、 $f_2$ は $\frac{b}{m}$ と $\frac{k_s}{m}$ により計算される $\Delta T = 0$ での固有周波数である。また、表中の適合率は次式で計算した。

$$\text{Fitness} = \left( 1 - \frac{\sum_i^N (\hat{x}_i - \tilde{x}_i)^2}{\sum_i^N (\tilde{x}_i - \bar{x})^2} \right) \times 100 \quad (18)$$

ここで、 $\tilde{x}_i$ 、 $\hat{x}_i$ はそれぞれ変位 $x$ の $i$ 番目の計測値と推定値であり、 $\bar{x}$ は計測値の平均である。

表より $f_2$ の値がサンプリング周波数に近いことがわかる。これは、Arakawaら[6]がブラックボックスモデリングの結果として指摘したように、変位モデルの主要なモードが1次のモードのみであるためと考えられる。適合率に着目すると、温度依存の粘性項および温度の二乗項があるモデルでは、従来の線形モデル(Yip&Niemeyer)に比べ適合率が増加していることがわかる。特に、MatsuuraにおいてYip&Niemeyerの適合率が8.34%と低い、 $V_{\text{ref}}^2 = 40$  [V<sup>2</sup>]のみで同定したときは99.66%となった。このため、TCPAにおける非線形性の影響により適合率が低くなったと考えられる。また、その影響の結果として、Yip&Niemeyerの $f_1$ が他のものよりも小さくなったと考えられる。

## 5 評価実験

### 5.1 ステップ入力に対する結果

同定実験と同じ実験環境のもと評価実験を行った。

はじめに、同定時と同じ条件の入力を与えた場合について評価を行った。ここで、評価指標として、最大変位 $x_{\text{max}}$ で正規化した二乗平均誤差RMSE(x)を用いた。

$$\text{RMSE}(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{x} - \tilde{x})^2}{x_{\text{max}}^2}} \times 100, \quad (19)$$

評価において、再計測した5つのデータを用い、Yip&NiemeyerとProposedのみの比較を行った。

推定誤差を図4に、推定結果の一例を図5にそれぞれ示す。図5より、提案モデルは従来の線形モデル(Yip&Niemeyer)に

比べて、遅れが少ないことがわかる。これは、表2に示した $f_1$ がYip&Niemeyerよりも大きいためである。この遅れの改善により、図4において、提案モデルによる50%以上の誤差低減が確認できる。

### 5.2 正弦波状入力に対する結果

次に、電圧の二乗が正弦波状となるような次の入力を与えた場合について評価を行った。

$$V_{\text{in}}(t) = \sqrt{\frac{V_{\text{ref,max}}^2}{2} (1 - \cos(2\pi f_{\text{ref}} t))}. \quad (20)$$

ここで、 $V_{\text{ref,max}}^2$ は表1に示した各TCPAにおける $V_{\text{ref}}^2$ の最大値である。また、入力周波数 $f_{\text{ref}}$ は、MitsufujiとShieldexでは0.02Hz、Matsuuraでは0.004Hzとした。

推定誤差を図4(d)に、推定結果の一例を図6にそれぞれ示す。結果より、ステップ入力の場合と同じく、提案モデルは線形モデルに比べて遅れを改善し、誤差を低減していることが確認できる。

## 6 おわりに

本研究では、対流熱伝達の影響を考慮したTCPAの変位モデルを提案した。伝熱工学の観点から熱伝達係数の温度・速度依存性を考え、対流熱伝達を粘性と同じ散逸関数のひとつとして扱うことで、変位モデルにおいて対流熱伝達の影響を陽に表せることを示した。実験により、従来用いられてきた線形モデルに比べて、提案モデルはより妥当であることを示した。

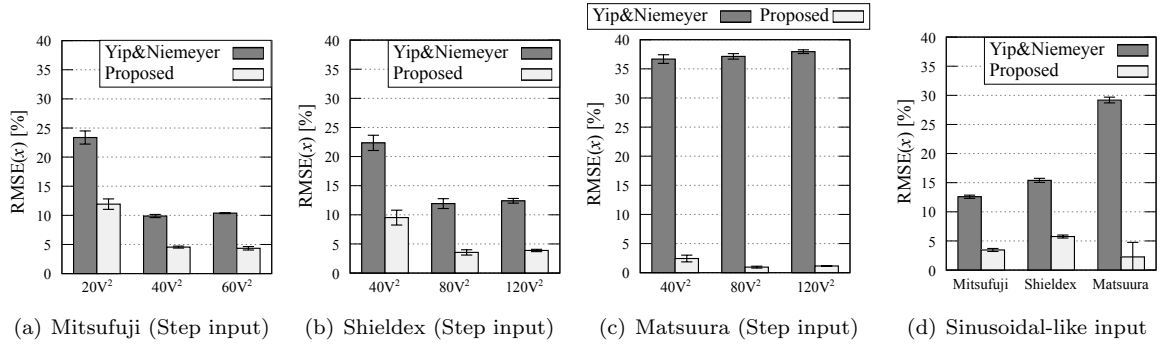
謝辞 本研究は、NEDO次世代ロボット中核技術開発 革新的ロボット要素技術分野「高分子人工筋肉アクチュエータによる柔らかな運動装具の研究開発」(課題番号15657408)の支援で行われた。

## 参考文献

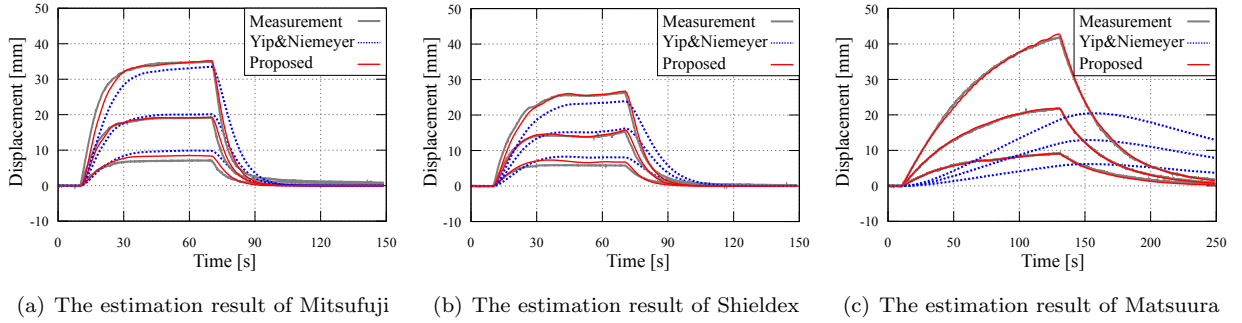
- [1] C. S. Haines et al., "Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread," *Science*, vol. 343, no. 6173, pp. 868–872, Feb. 2014.
- [2] L. Wu et al., "Nylon-Muscle-Actuated Robotic Finger," in *Proc. of SPIE 9431*, San Diego, CA, USA, Mar. 2015, 94310I.
- [3] M. C. Yip and G. Niemeyer, "High-Performance Robotic Muscles from Conductive Nylon Sewing Thread," in *Proc. of the 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, May 2015, pp. 2313–2318.
- [4] 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, 2P2-14b7, 2016.
- [5] L. Sutton et al., "Design of an Assistive Wrist Orthosis Using Conductive Nylon Actuators", in *Proc. of the 6th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, UTown, Singapore, Jun. 2016, pp.1074–1079.
- [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] K. H. Cho et al., "A robotic finger driven by twisted and coiled polymer actuator," in *Proc. of SPIE 9798*, Las Vegas, NV, USA, Mar. 2016, 97981J.
- [8] 舩屋賢, 小野秀, 高木賢太郎, 田原健二, "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", 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B3-02, 2016.
- [9] K. H. Cho et al., "Fabrication and Modeling of Temperature-controllable Artificial Muscle Actuator," in *Proc. of the 6th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, UTown, Singapore, Jun. 2016, pp.94–98.
- [10] J. H. Lienhard, *A heat transfer textbook*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981.
- [11] J. Jayender et al., "Modeling and Control of Shape Memory Alloy Actuators," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 279–287, Mar. 2008.
- [12] H. Meier and L. Oelschlaeger, "Numerical thermomechanical modelling of shape memory alloy wires," *Materials Science and Engineering A*, vol. 378, no. 1-2, pp. 484–489, Jul. 2004.

**Table 2** Identified parameters of the displacement model (w. : with, wo. : without)

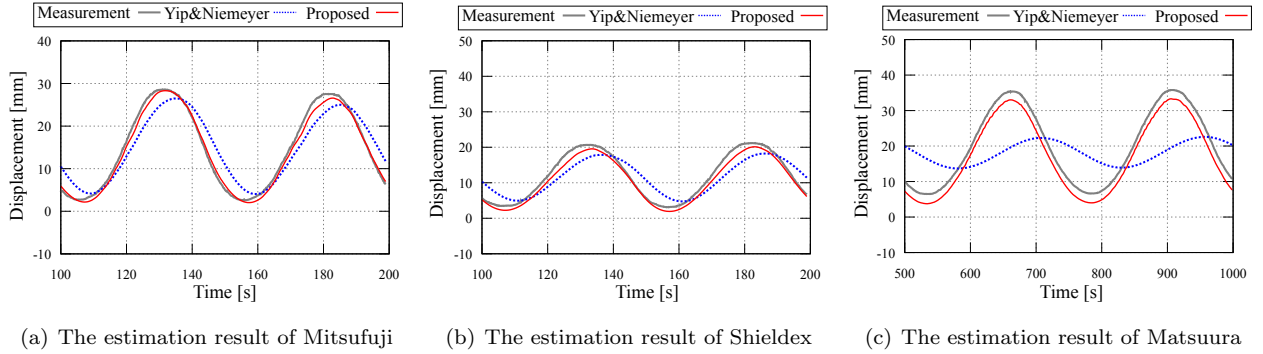
TCPA	Model	Temperature dependent damper	Quadratic Term of Temperature	$\frac{b}{m}$	$\frac{k_s}{m}$	$\frac{\alpha_x S_c}{m}$	$\frac{\alpha_x T S_c}{m}$	$\frac{\alpha_{xx} S_c}{m}$	$f_1$	$f_2$	Fitness
				$\times 10^2$ [1/s]	$\times 10^2$ [1/s <sup>2</sup> ]	$\times 10^{-1}$ [m/(s <sup>2</sup> ·K)]	$\times 10^{-4}$ [m/(s <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )]	$\times 10^{-2}$ [1/(K·s)]			
Mitsufuji	Yip&Niemeier	wo.	wo.	5.067	1.028	0.376			0.032	80.62	94.46
	TDD	w.	wo.	5.194	3.249	0.986		-0.750	0.104	88.65	98.86
	QT	wo.	w.	5.577	3.645	1.081	3.452		0.100	82.56	99.02
	Proposed	w.	w.	5.287	2.015	0.534	8.014	1.411	0.060	84.08	98.82
Shieldex	Yip&Niemeier	wo.	wo.	5.433	0.752	0.192			0.022	86.45	91.51
	TDD	w.	wo.	6.162	5.157	0.965		-1.828	0.100	98.15	99.39
	QT	wo.	w.	6.173	3.891	0.685	4.182		0.133	97.94	99.38
	Proposed	w.	w.	5.634	3.242	0.640	-2.248	-1.845	0.092	89.58	99.05
Matsuura	Yip&Niemeier	wo.	wo.	5.696	0.050	0.019			0.001	90.65	8.34
	TDD	w.	wo.	5.649	4.742	1.350		-1.964	0.134	89.78	99.84
	QT	wo.	w.	5.643	2.965	0.772	6.161		0.084	89.73	99.78
	Proposed	w.	w.	5.853	8.788	2.466	2.876	-3.075	0.240	92.91	99.92



**Fig.4** Estimation errors. (Error bar means the standard deviation.)



**Fig.5** The estimation results in the case of the step input.



**Fig.6** The estimation results in the case of the sinusoidal-like input.