Contractile Force and Stitch Modeling of Shape Memory Alloy Knitted Fabric Actuators

NAKASHIMA Akichika^{a,*}, HIGUCHI Yusuke^b, SATO Yohei^b, WAKAKO Lina^b, KINARI Toshiyasu^b

^a Industrial Research Institute of Ishikawa, 2-1 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa 920-8203, Japan

^b Kanazawa University, Kakumamachi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

Received 1 July 2020; accepted for publication 12 January 2021

Abstract

To improve the calculation accuracy of the contractile force in a shape memory alloy (SMA) knitted fabric actuator, which was developed in a previous study, we measured the Young's modulus, E , and wire diameter, d , of a SMA yarn in unheated (20 °C) and heated (100 °C) environments. Subsequently, the contractile force in the heated environment was calculated in terms of bending rigidity (EI) using the measured values of E and d . The accuracy of the theoretical contractile force, considering contraction and increment in EI , was improved when compared with that in the former one, which only considered contraction of the SMA yarn. Furthermore, to enhance calculation accuracy, we proposed a 2 dimensional stitch model for SMA plain knitted fabric. This model consisted of clothoid curves through four contact points, where each yarn crosses the other stitches and act forces. Further, this model could show the change in the curvature via the contraction of the yarn as well as the increase in its potential energy. Therefore, it was confirmed that this model is useful for calculating the contractile force of the SMA knitted fabric.

Key Words : Smart textile, Knit, Soft actuator, Shape memory alloy (SMA), Modeling

形状記憶合金平編地アクチュエータの収縮力と編目モデリング

中島明哉^{a,*}, 樋口雄亮^b, 佐藤洋平^b, 若子倫菜^b, 喜成年泰^b

^a 石川県工業試験場, ^b 金沢大学

1. 緒言

近年、疾病予防や健康増進など健康寿命を延伸するツールの一つとして、衣類に用いられるテキスタイル技術と電子デバイスを融合するスマートテキスタイルと呼ばれる分野が注目を集めている。この分野では、これまでにセンサ機能を持つスマートテキスタイルとして、圧力検知が可能なテキスタイルセンサ [1-5] や人体動作の計測のためのウェアラブルセンサが開発 [6,7] され、疾病予防のための体調管理を目的とした機能素材や衣服の研究開発 [8-14] が進められてきた。これらテキスタイルセンサによるバイタルデータ収集は経時的变化を把握することができる点で特に有効である。そのう

えで、この収集したデータをもとにテキスタイルから人体へ何らかのアクションが可能となれば、更なる健康寿命の延伸が期待できる。しかしながら、そのようなアクションを生み出すスマートテキスタイルについての実用的な研究報告は多くなく、アクチュエータ機能については出力が小さいことや低い応答性など、解決しなければならない点が多い [15-23]。そこで、我々は衣類など既存の繊維製品に組み込むことを目的としたテキスタイルアクチュエータとして、温度変化により長さ方向に伸縮変形する特徴を持つ形状記憶合金ワイヤー（以下、SMA 糸とする。）からなる、形状記憶処理の必要がない編地アクチュエータを開発 [24] した。

この編地アクチュエータの構成要素である形状記憶合金平

* 連絡先：石川県工業試験場 920-8203 金沢市鞍月 2-1
E-mail : nakasima@iriii.jp, Tel : +81-76-267-8083, Fax : +81-76-267-8090

編地（以下、SMA 平編地とする。）について、ウェール方向の定速引張荷重試験にて定量的に評価し、清水ら [25] が提案しているウェール方向引っ張り特性の理論結果と比較することで、この理論式が適用可能なことを示した [26]。そのうえで、SMA 編地の収縮力発生機構を解明することを目的に、純曲げ試験機を用いて SMA 糸の曲げ剛性を測定した。その結果、恒温恒湿室内（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ， $65 \pm 4\%\text{R.H.}$ ）では $2.7 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ であった曲げ剛性が、 100°C に通電加熱すると $5.7 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ に増加していることを確認し、収縮力の発生には SMA 糸の収縮だけでなく曲げ剛性の増大が影響していることを報告した [26]。しかしながら、この純曲げ試験機による剛性の測定では、加熱時に剛性が高くなることによる影響が大きく、正確な曲げ剛性値を算出できなかった。そこで本報では、SMA 平編地の収縮力算出精度の向上を図ることを目的に、SMA 糸の曲げ剛性値を正確に求める方法として、加熱によるヤング率の変化量と SMA 糸の直径変化量を測定し、理論収縮力をより正確に計算することに取り組んだのでここに報告する。さらに、収縮力算出精度の向上を目指し、ロボットの軌道生成 [27-29] 等に使用されてきたクロソイド曲線を新たに編目のモデリングの補間曲線として用いることを提案する。

2. SMA 平編地の収縮力について

前報 [26] において、清水ら [25] が Fig. 1 のモデルから導出したウェール方向引っ張り特性の理論と SMA 平編地のウェール方向の引っ張り特性について、SMA 平編地の引張試験にて定量的に評価した。その結果、Fig. 2 に示すとおり糸は伸びない（ $P/k_u=0$ ）と仮定して計算した理論値と実験値がほぼ一致することを確認し、以下の式 (1)，(2) が SMA 平編地にも適用可能なことを示した。

Fig. 1 Models relative to apices of stitch [25].
(a) Initial shape (b) Stretched shape

Fig. 2 Calculated and measured tension of SMA plain knitted fabric at 20°C .

$$P = \frac{2EIF_0(\theta)}{h_0^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{10.472 \{ng(\theta) - n + 1\}}{h_0^2} - 1 \quad (2)$$

ただし、 n はループの個数、 P は荷重、 ε は伸び、

$$F_0(\theta) = \frac{2 \times 3.732^2}{10.472^2} \left[f(\theta) - f(\theta=60^\circ) - \frac{P}{k_u} g(\theta) \right]^2$$

$$g(\theta) = \frac{2 + 2 \sin \theta - \cos \theta}{\sin \theta}$$

$$f(\theta) = 2\pi + 4\theta + \frac{2 \cos \theta - 1}{\sin \theta}$$

であり、 EI はループを構成する糸の曲げ剛性、 h_0 はループの初期高さ、 k_u は糸のばね定数を単位長さ引っ張ったときの値に換算したものである。

2.1 SMA 糸のヤング率

SMA 糸の加熱による曲げ剛性の増加に影響を与えるパラメータとして、ヤング率の変化が考えられる。SMA 糸は熱により相変位が起きているため、ヤング率が変化している可能性が高い。そこで恒温槽付き万能試験機（AG-100kNplus、島津製作所株式会社製）を用いて、恒温槽内で SMA 糸一本の引張試験を行なった。引張速度は 1 mm/min 、恒温槽内の温度は非加熱時 20°C 、加熱時 100°C とした。各条件における測定結果は Fig. 3 のようになり、2つの応力-ひずみ特性曲線は明らかに異なっていることから、SMA 糸の応力-ひずみ特性は加熱により変化していることが分かった。この結果から、SMA 糸の動作が保証されている許容引張限界値 83 MPa 以下の範囲でヤング率を算出した結果、ヤング率は 20°C で 9.71 GPa 、 100°C で 21.0 GPa であり、加熱により約 116% 増加していることを確認した。なお、ここで示したヤング率の値は、10本の平均値である。

Fig. 3 Stress-Strain curve of the SMA yarn.

Fig. 4 Calculated and measured tension of the contracted SMA plain knitted fabric at 100°C.

2.2 SMA 糸の糸径

加熱による曲げ剛性の増加に影響を与えるもう一つのパラメータとして、糸径の変化が考えられる。SMA 糸は加熱により長さ方向に収縮するため、加熱時は非加熱時に比べ線径が大きくなっている可能性もある。そこで、デジタルマイクロスコプ (VHX-6000, 株式会社キーエンス製) を使用して、透過照明による影を撮影し、その画像から糸径を計測した。測定に使用した画像取得時のレンズ倍率 (光学式倍率) は 1500 倍であり、室温 20 °C の環境下において 10 回の計測を行なった。その後、加熱状態として SMA 糸が 100 °C になるように通電加熱した状態で、同様の測定を行なった。その結果、糸径の平均値は非通電時 (20 °C 状態) で 0.151 mm、通電時 (100 °C 状態) で 0.156 mm であった。この結果から、使用している SMA 糸は加熱により直径が 3.3 % 増加していることを確認した。

2.3 SMA 平編地の収縮力の算出

前報 [26] において純曲げ試験機で測定した曲げ剛性値は非加熱時 $2.7 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ 、加熱時 $5.7 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ であったが、加熱時の M - K 曲線に歪がみられるなど信頼性に欠けていた。今回、Table 1 に示すように各温度状態において具体的に糸のヤング率と直径の測定を行ない曲げ剛性を算出した結果、非加熱時は $2.5 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ と約 7 % 小さい値、加熱時は $6.1 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2$ と約 7 % 大きい値となった。この結果、加熱時の曲げ剛性の増加率は 144 % と純曲げ試験機で測定した 111 % に比べ 33 % 大きい結果となった。そこで、糸の収縮とヤング率と糸径の変化による曲げ剛性の増加の影響を含めた SMA 平編地の理論収縮力を算出した。その結果、Fig. 4 に示すとおり、4 % の収縮のみで曲げ剛性は変わらないとして式 (1), (2) で

Table 1 Data used to calculate bending rigidity.

	E [GPa]	d [mm]	I [mm ⁴]
20°C	9.71	0.151	2.55×10^{-5}
100°C	21.0	0.156	2.91×10^{-5}

$P/k_u = -0.04$ として扱い、曲げ剛性は非加熱時の値を用いて計算した理論値では SMA 平編地の加熱による収縮力実測値との乖離が大きかったのに対し、糸の曲げ剛性の増加も反映させた計算値では 5 % 毎に 30 % まで伸長させた際の張力の実測値との差が小さくなり、収縮力の計算精度が向上する妥当な一致をみた。

3. 編目のモデリングについて

曲げ剛性の変化量を反映させることで SMA 編地の収縮力をより良い精度で算出することができた。しかし、これ以上の精度向上には一般的な編地のための式の流用ではなく、SMA 編地に適した式の創出が必要である。そこで、本報では最も基本となる編目のモデリングについて検討することとした。

3.1 糸のモデリング

糸のモデリングについては、若松ら [30] が Fig. 5 のように提案している。糸の長さを L として左端に空間座標系を固定し、糸長 s の点 $P(s)$ において糸の中心軸方向に ξ 軸を一致させるように物体座標系 $P(s) - \xi\eta\zeta$ を設定することで、変形後の物体座標系の向きはオイラー角 $\varphi(s)$, $\theta(s)$, $\psi(s)$ で表わされる。そのポテンシャルエネルギー U は、 η 軸方向の曲げ変形の曲率 $\omega_\xi(s)$, ξ 軸方向の曲げ変形の曲率 $\omega_\eta(s)$, 曲げ剛性 R_f , 中心軸回りのねじれ率 $\omega_\zeta(s)$, ねじり剛性 R_t を用いて式 (3) のように表わすことができる。

$$U = \frac{R_f}{2} \int_0^L (\omega_\xi^2 + \omega_\eta^2) ds + \frac{R_t}{2} \int_0^L \omega_\zeta^2 ds \quad (3)$$

ここで、モデルを簡略化するために Fig. 6 のようにループを二次元平面内でのみの変形とし、変形後の物体座標系の向きを $\theta(s)$ と表わすと、ループのポテンシャルエネルギー U は式 (4) のように糸の曲げ変形の曲率 $\kappa(s) = d\theta/ds$ のみで表される。

Fig. 5 3D Modeling of yarn[30].
(a)Initial shape (b)Deformed shape

Fig. 6 2D Modeling of yarn.

$$U = \frac{R_f}{2} \int_0^L \kappa^2(s) ds \quad (4)$$

このポテンシャルエネルギー U が最小になる状態が糸の安定状態であり、曲率 $\kappa(s)$ が求まることで糸の状態を定義できる。そして編地が伸長されループが変形した際のポテンシャルエネルギー U の増加が収縮力に大きく影響すると考えられる。このことから、収縮力を計算するために糸の状態を定義するにはその曲率が容易に求まることが重要である。

3.2 クロソイド曲線を用いた編目モデリング

これまで用いてきた編目は Fig. 1 に示すようにループの頂点を基準点としてモデリングをしている。しかし、実際には Fig. 7 のように編目は糸が交差する白塗点を代表とするような 4 か所で拘束されており、編地が伸長・収縮するなどの変形時に一つの編目に力が直接作用する点は編地の端部以外の大部分において糸が交差するこの 4 点のみであり、Fig. 1 のモデルのようにループの頂点に力がかかることはない。福田らは糸が交差する 4 点にループの頂点 2 点を加えた 6 点を、カーディナルスプライン曲線を用いて補間する 3 次元モデリング手法を提案している [31] が、編地の変形やそれにとまう収縮力の計算までには言及されていない。そこでループの変形や伸長時の張力の計算を容易に可能とするために、力が直接作用する 4 点を通る補間曲線として曲率の算出が容易な

Fig. 7 Force acting points on a stitch in photograph.

クロソイド曲線を用いることで、ループをモデリングすることを提案する。クロソイド曲線は、曲線の長さに比例して曲率が変化する曲線であり、与えられた点列間をなめらかに接続し、曲率が連続的に変化する曲線である。一般に、自由曲線補間の問題では、連続性がよく曲率が小さい解が得られる [27-29]。今回は一番簡単な 2 次元平面上においてモデリングを行なった。ただし、ループをモデリングする際に基準となる 4 点を P1~P4 とすると、糸の太さを無視した場合 Fig. 7 に示す白塗点となるが、実際には糸に太さがあるため接触位置は点とはならず、(後述の Fig. 10 などの) 画像でも確認できるように一定の範囲に分布した状態となる。そこで、糸の太さを考慮して P2, P3 の 2 点は Y プラス方向に、P1, P4 の 2 点は Y マイナス方向に移動させた黒塗点をモデリングの基準点とした。同様に、青ループにおいては P2, P3 の 2 点は Y マイナス方向に移動した青塗点、赤ループにおいては P1, P4 の 2 点は Y プラス方向に移動させた赤塗点をそれぞれのループの基準点とした。以下にその方法と、モデリングした結果を示す。

まず、モデリングのための基準点となる 4 点の座標を P1 ($a,0$), P2 (a,b), P3 ($2a,b$), P4 ($2a,0$) とし、各点での接線方向は接点とその前後の点を直線で結んだ方向ベクトル (弦ベクトル) が転向した角度を二等分する弦ベクトル転向角二分法を用い、各点の接線方向は Fig. 8 に示すとおり $\pm 45^\circ$ とした。これは、無負荷時はループが安定した形状に落ち着いていることから、クロソ

Fig. 8 Tangential direction at each point via bisection method of chord vector deflection angle.

Fig. 9 Model of clothoid curve for a stitch.

イド曲線の接続点となる交差点においても接線方向が一致するとしたことによる。なお、Fig. 8における点線は接続点までの弦ベクトルの方向をわかりやすくするために、接続点にて延長したものである。これらの条件のもとで b を $0.5a$ から $2a$ まで 0.5 刻みでモデリングした結果、Fig. 9 のように全てなめらかで違和感のない編目をモデリングできることを確認した。なお、Fig. 9 のクロソイド曲線の1周期の全長は $3.33a + 2.13b$ であり、1ループの糸長を $P0$ と $P1$ を結ぶ曲線の中点から $P4$ と $P5$ を結ぶ曲線の中点までとすると、その長さは $2.22a + 2.13b$ となった。

福田ら [31] は作製した編地サンプルのループ長の実測値とモデリングしたループ長が近似する値となっていることでその妥当性を評価した。そこで、同様に試作した SMA 編地の画像から力が基準点となる4点を測定し、 $a = 1.39$ mm, $b = 2.03$ mm としてモデリングした結果、ループ長は 7.47 mm となった。編地をほどいて1コース分の糸長を測定しウェール数で割ることによって算出した編目一つ当たりの糸長(ループ長)は 7.93 mm であり、実測値を 100% とした場合に比べ 5.8% 小さい 94.2% であった。糸の太さや3次元方向の生地の厚みを考慮すると計算値は大きくなることから、本モデリング手法は妥当であると判断した。

3.3 編目の変形モデリング

編目の変形については、編地を二軸伸長させた場合の挙動について川端らにより理論解析されている [32]。その挙動は、伸長率が小さいときは Fig. 10(a) のように糸が曲がった状態でその交差点がずれていくこと、その後、一定以上の伸長率になると糸のずれが止まり、Fig. 10(b) のように糸の曲がり伸びて真っ直ぐになっていき、Fig. 10(c) に示すように糸が真っ直ぐになった後は糸が伸長される状態へと移行していくことが示されている。また、この糸の曲がり伸びて真っ直ぐになるまでは糸の伸びの影響がほとんどないとされている。以上のことから、今回提案したモデリング手法は伸長率が小さい状態、すなわち交差点がずれていく範囲については、SMA 糸に限らず編地全般に適用できる。そこで、編地が伸長された時の編目を試作した SMA 編地の比である $b = 1.46a$ として、以下のようにモデリングした。編地がウェール方向に伸長されたとすると、 $P1(a,0)$, $P2(a,1.46a)$ 間と $P3(2a,1.46a)$, $P4(2a,0)$ 間の距離が大きくなる。一軸引張の場合、コース方向に収縮するため次のように計算した。仮に編地のウェール方向伸長率を 10% とし、 $P1(a,0)$ を基準点(動かない点)とすると、 $P2(a,1.46a)$ は 10% Y 軸方向に伸びるため、その座標は $P'2(a,1.61a)$ となる。 $P3, P4$ は同じ X 座標をとり、Y 座標は、 $P3$ は $P2$ と $P4$ は $P1$ と同じ値となることから、 $P'3(x,1.61a)$, $P'4(x,0)$ とできる。金属繊維(SMA 糸を含む)に限らず 10% 伸長では編目の交差点がずれていく領域であり糸自体の伸びは影響しないと考えられることから、糸長は変化しない。そこでループ長を変形前の値と同じ $5.33a$ となるように調整した結果が Fig. 11 である。この時の接線角度は変わらず $\pm 45^\circ$ であり、 $P'2 P'3$ は $0.86a$ となった。変形前の $P1P2$ ($P3P4$) 間 $1.55a$ 及び、 $P2P3$ 間の糸長 $1.11a$ が変形後の $P1P'2$ ($P'3P'4$) 間は $1.71a$, $P'2P'3$ 間の糸長は $0.96a$ となり交差点のずれが表現できていることを確認した。そして伸長時の張力発生メカニズムとしてこれまでにループ頂点の曲げ変形が大きく影響していると考えられてきた [25,32] ことから、 $P'2P'3$ 間の曲率に注目すると、変形前の $P2P3$ 間の曲率は $1.41/a$ であったが変形後は $1.64/a$ と増加しており、 $P'2P'3$ 間のポテンシャルエネルギー U が増加する結果となることを

Fig. 10 Deformation behavior of stitches.
 (a) The range where intersection points of yarns shift
 (b) The range where the yarns deform straight
 (c) The range where the yarns stretch

Fig. 11 Clothoid curve of the stitch model stretched for wale direction.

Fig. 12 Clothoid curve of the stitch model for yarn contraction.

確認した。なお、Fig. 11 においては、 $P'0P1$ 間、 $P'4P'5$ 間の曲線は $P'2P'3$ 間の曲線を X 軸対称に反転したものとなることから省略した。

次に、加熱により SMA 糸が収縮する場合について検討する。SMA 平編地のウェール方向伸長時の発生力測定においては、SMA 糸が収縮するとき編地のウェール方向両端は固定されている。そのため $P1P2$ 間と $P3P4$ 間の距離は変化しない。一方で、糸長は 4 % 短くなるためコース方向に収縮する。一軸伸長の場合と同様に $P1$ を基準点とすると、 $P2$ も移動しない点となる。そして、 $P3$ 、 $P4$ は同じ X 座標をとり、それぞれ $P'3(x, b)$ 、 $P'4(x, 0)$ となる。ここで試作した SMA 編地の比である $b=1.46a$ として、10 % 伸長時にループ長が加熱により $5.33a$ から 4 % 短い $5.11a$ になったとしてモデリングした結果を Fig. 12 に示す。この結果、 $P2P'3$ は $0.86a$ から $0.83a$ とコース方向に 3.0 % 収縮し、曲率は $1.64/a$ から $1.94/a$ と増加しており $P2P'3$ 間のポテンシャルエネルギー U が増加する結果となることを確認した。

4. 結 言

SMA 平編地の発生収縮力算出の精度向上を目的に、非加熱時と加熱時の SMA 糸のヤング率と糸径を測定した。この測定値を用いて算出した曲げ剛性値を用いることで、SMA 平編地の加熱による発生収縮力の算出精度を向上させること

ができた。また、さらなる精度向上を目的に、SMA 編地により適した編目モデルとして、クロソイド曲線を補間曲線とする編目のモデリングを行なった。そして、このモデルが SMA 糸の収縮による曲率変化によるポテンシャルエネルギーの増加を表現でき、糸の収縮により編地が発生する収縮力の解析に適用可能なことを示した。

今回提案したクロソイド曲線による補間モデリングは、編目の変形時の各接点点間の糸長を容易に算出できることから、スマートテキスタイルにおいて用いられる導電糸を編み込んだ編地センサなどの変形時の挙動と抵抗値変化など、センサ機能の解析にも応用可能と考えている。特に、SMA 編地においてはその伸び量をセンシングする自己センシング機能の搭載を検討し、その挙動を制御できるように取り組んでいく予定である。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20K04374 の助成を受けたものです。

References

- [1] Murakami T, Masuda A, Yoshida Y, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) Journal of Textile Engineering, **62**, 51–56 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.62.51>
- [2] Murakami T, Masuda A, Sasaji T, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) Journal of Textile Engineering, **62**, 117–122 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.62.117>
- [3] Murakami T, Masuda A, Kondo K, Sasaji T, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) Journal of Textile Engineering, **62**, 181–185 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.56.181>
- [4] Murakami T, Masuda A, Hirakue M, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) Journal of Fiber Science and Technology, **72**, 120–125 (in Japanese). <https://doi.org/10.2115/fiberst.2016-0018>
- [5] Fujioka J, Kuroda N (2014) Sen'i Kikai Gakkaishi (Journal of the Textile Machinery Society of Japan), **67**, 115–119 (in Japanese)
- [6] Fujioka J, Yoshida Y, Ise T, Seki H (2018) Journal of Textile Engineering, **64**, 19–27 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.64.19>
- [7] Namikawa S, Enokibori Y, Mase K (2016) Interaction 2016 Ronbunshu, Information Processing Society of Japan, 396–401 (in Japanese)
- [8] Sakaguchi A, Kato M, Ishizawa H, Kimura H, Koyama S (2016) Journal of Textile Engineering, **62**, 129–134 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.62.129>
- [9] Shimakami Y, Horiba T, Tanaka T, Miyamoto K, Enokibori Y, Mase K, Kawabe T, Shimizu T, Yanagisawa S, Mizuno H, Suzuki A (2016) Technical Report of Aichi Center for Industry and Science Technology 2016, 22–125
- [10] Koyama S, Sakaguchi A, Ishizawa H, Yasue K, Oshiro H,

- Kimura H (2017) *Journal of Fiber Science and Technology*, **73**, 300–308. <https://doi.org/10.2115/fiberst.2017-0046>
- [11] Koyama S, Ishizawa H, Hosoya S, Kawamura T, Chino S (2017) *Journal of Fiber Science and Technology*, **73**, 276–283. <https://doi.org/10.2115/fiberst.2017-0042>
- [12] Suganuma K (2017) “Advances in Healthcare Wearable Devices”, CMC Publishing, Tokyo (in Japanese)
- [13] Kasai N, Ogasawara T, Nakashima H, Tsukada S (2017) *IEICE Communications Society Magazine*, **41**, 17–23 (in Japanese). <https://doi.org/10.1587/bplus.11.17>
- [14] Tada Y, Inoue M, Tokumaru T (2013) *Journal of Textile Engineering*, **59**, 141–148. <https://doi.org/10.4188/jte.59.141>
- [15] Suzumori K (2015) *Journal of the Robotics Society of Japan*, **33**, 656–659 (in Japanese). <https://doi.org/10.7210/jrsj.33.656>
- [16] Asaka K (2016) *Synthesiology*, **9**, 117–123 (in Japanese). https://doi.org/10.5571/synth.9.3_117
- [17] Haines CS, Lima MD, Li N, Spinks GM, Foroughi J, Madden JDW, Kim SH, Fang S, Jung de Andrade M, Göktepe F, Göktepe Ö, Mirvakili SM, Naficy S, Lepró X, Oh J, Kozlov ME, Kim SJ, Xu X, Swedlove BJ, Wallace GG, Baughman RH (2014) *Science*, **343**, 868–872. <http://doi.org/10.1126/science.1246906>
- [18] Maziz A, Concas A, Khaldi A, Stalhand J, Persson N, Jager EWH (2017) *Science Advances*, **3**, e1600327. <http://doi.org/10.1126/sciadv.1600327>
- [19] Dono S, Saito A, Kuwata T (2003) Matsushita Electric Works technical report, Aug, 59–63 (in Japanese)
- [20] Saito T, Ji Q, Goto K (2005) *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, **71**, 2312–2327 (in Japanese). <https://doi.org/10.1299/kikaic.71.2321>
- [21] Hatamura M (2016) “A study on development of new actuators using a Ti–Ni shape memory alloy (SMA) and Fe–based SMA”, Yokohama National University, Japan, Ph. D. thesis (in Japanese)
- [22] Abel J, Luntz J, Brei D (2012) *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, **21**, 085011. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2009-1426>
- [23] Abel J, Luntz J, Brei D (2013) *Smart Materials and Structures*, **22**, 125001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/12/125001>
- [24] Nakashima A, Higuchi Y, Wakako L, Kinari T (2018) *Journal of Textile Engineering*, **64**, 133–139 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.64.133>
- [25] Shimizu Y, Ikemura S, Tabata M, Uno M (1966) *Journal of the Textile Machinery Society of Japan* (predecessor journal of *Journal of Textile Engineering*), **19**, T301–T308 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/transjtmsj1965b.19.T301>
- [26] Nakashima A, Higuchi Y, Wakako L, Kinari T (2019) *Journal of Textile Engineering*, **65**, 47–53 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.65.47>
- [27] Makino H (1994) *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **60**, 80–85 (in Japanese). <https://doi.org/10.2493/jjspe.60.80>
- [28] Qiu S, Suda H, Makino H (1994) *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **60**, 1596–1600 (in Japanese). <https://doi.org/10.2493/jjspe.60.1596>
- [29] Lan A, Tamai H, Makino H (2010) *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **76**, 1194–1199 (in Japanese). <https://doi.org/10.2493/jjspe.76.1194>
- [30] Wakamatsu H, Inoue M, Kurashiki T, Morinaga E, Arai E, Takeuchi S (2014) *Journal of Textile Engineering*, **60**, 41–50 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.60.41>
- [31] Fukuta Y, Ohta K, Kinari T (2011) *Journal of Textile Engineering*, **57**, 37–44 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/jte.57.37>
- [32] Kawabata S, Niwa M, Nanashima Y, Kawai H (1970) *Journal of the Textile Machinery Society of Japan* (predecessor journal of *Journal of Textile Engineering*), **23**, T95–T108 (in Japanese). <https://doi.org/10.4188/transjtmsj1965b.23.T95>

文献（日本語表記）

- [7] 並川真也, 榎堀優, 間瀬健二 (2016) インタラクシオン 2016 論文集 (情報処理学会), 396–401
- [12] 菅沼克昭監修 (2017) “ヘルスケア・ウェアラブルデバイスの開発”, シーエムシー出版