

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04214

研究課題名（和文）形状記憶合金の高速変態制御による触覚提示と双方向触覚コミュニケーションの実現

研究課題名（英文）A study of the fast phase transformation of Shape-memory alloy wires and its application to tactile display and bidirectional tactile communication

研究代表者

澤田 秀之（Sawada, Hideyuki）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00308206

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Ti-Ni-Cu系SMAワイヤについて、パルス電流によってその周波数に同期して起こる高速伸縮動作と時間応答を精密に測定し、その物性的特性の理解に繋げた。次に、SMAの変態動作のダイナミクスならびに変態量を正確に制御する手法を確立し、ソフトアクチュエータおよびソフトセンサを提案した。特に、触覚感覚の計測と再現が可能な触覚センサと高密度触覚ディスプレイを構築し、その有効性を確認した。更に、新しいSMAセンサ・アクチュエータの応用として、ソフトロボットへの展開を図った。魚ロボットおよびイモムシロボットを構築し、バイオミメティクスの観点からこれまでにない柔軟な動作が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SMAの相変態は吸熱と発熱による温度によって引き起こされるため、一般的に高速動作が要求されるアクチュエーションには不向きであると考えられていた。SMAワイヤを数百Hzで変位させて振動アクチュエータとして利用するものは、申請者らの研究成果が世界的にも初めてであり、この挙動を科学的に解明し、精密に振動周波数と変位を制御する手法を確立した。更に、微細なSMAワイヤから生じる μm オーダーの微小振動を制御して触覚のセンシングと提示を同時に行うことが可能なデバイスを構築した。本デバイスは2～3V程度の省電力駆動が可能であることから、汎用モバイル機器からの触覚提示が可能であり、触覚通信の実用化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we precisely measured the high-speed contraction and expansion behavior and time response of Ti-Ni-Cu SMA wires, which occurred in synchronization with the frequency of a pulse current, and resulted in the understanding of their physical properties. We then established a method to precisely control the transformation behavior and the amount of transformation of SMA wires, and proposed novel soft actuators and soft sensors. In particular, we constructed a tactile sensor and a high-density tactile display capable of measuring and reproducing tactile sensations when we slide our hand on the surface of a material, and confirmed their effectiveness. Furthermore, we aimed to develop soft robots as an application of the new SMA transducers. A fish robot and a caterpillar robot were constructed, and we demonstrated that unprecedented flexible behavior was possible from the perspective of biomimetics.

研究分野：計測情報工学

キーワード：形状記憶合金 高速相変態 触覚計測 触覚提示 触覚感覚 触覚通信 ソフトアクチュエータ ソフトロボット

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金 (Shape-memory alloy: SMA) は、変態点以下の温度で変形させても加熱により元の形状に戻る超弾性としての性質があり、形状回復時に復元力を生じるため、これをアクチュエータとして応用する研究が進められている。特に変態点が常温以下で、かつ強度を確保できる Ti-Ni 系 SMA は多くの素材が開発され、機械工学、ロボティクスから医療分野まで広く応用が進んでいる。形状記憶合金の相変態は熱の移動によって引き起こされるため、これまでは高速動作が要求されるようなアクチュエーションとその制御には不向きであると考えられていた。実際、これまでの SMA アクチュエータの応用例としては、速度が要求されない小型ロボットの人工筋肉、内視鏡カテーテルや、各種締め付け具、体温に反応して形状が復元する歯科矯正具や肌着などに留まっている。

申請者は人間型ロボット用アクチュエータの研究開発の中で、微細ワイヤに加工した Ti-Ni-Cu 系 SMA ワイヤにパルス電流を流すことによって、長さ方向にその周波数と同期した伸縮を起こす現象を発見した。これまでの研究によって、300 Hz を超えるパルス周波数にまで応答することを実証し、この微小振動を制御して様々な触覚感覚を生成して提示する触覚ディスプレイの開発につながってきた。

2. 研究の目的

本研究では、Ti-Ni-Cu 系 SMA ワイヤを中心とし、パルス電流によってその周波数に同期して起こる高速伸縮動作と時間応答を精密に測定して、その物性的特性を解明することを第一の目的とする。次に、SMA の変態動作のダイナミクスならびに変態量を正確に制御する手法を確立し、ソフトアクチュエータ・フレキシブルセンサへの応用研究を進める。更に、触覚感覚を計測しながら遠隔地に伝送し、これを人の皮膚に対して自在に提示してコミュニケーションを行う触覚通信システムを構築する。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するため、下記の研究項目について遂行した。

1) SMA 試料の温度を制御した変位量の精密計測と変位メカニズムの解析

SMA の変位量は、ワイヤ長 5mm に対して、0.1~1 μ m 程度であることを、以前の研究によって示してきた。この変位量は温度により変化するため、SMA 試料本体の温度を一定に保ちながら、その変位量を精密に測定する計測系を構築した。また、直径 50~100 μ m のワイヤのサブミクロンオーダーの変位を高精度かつ高時間分解能で計測することを可能とした。

上記の計測システムにより、精密に SMA ワイヤの変位量の計測を行った。計測結果をもとに、a) マルテンサイト変態温度 T_m 近辺、b) マルテンサイト変態温度を超える温度域 ($T > T_m$)、c) マルテンサイト変態温度を下回る温度域 ($T < T_m$)、について、計測から得られる変位量の考察を行い、SMA の高速変態ダイナミクスについての理解を深めることにつながった。

2) SMA ワイヤを用いた微小変位センシングの確立

SMA ワイヤに微弱電流を流した状態で引張り力を与えると、長さ方向に微小伸長して抵抗値が変化する現象を報告した。本申請研究では、流す電流を変化させながら、引張り力と抵抗値変化の関係を詳細に調べた。これにより、SMA にパルス電流を与えて微小振動を起こしながら、同時に、ワイヤにかかる張力ならびにワイヤの変位量が、抵抗値計測のみによって測定できることを明らかにした。これらを実現する電子回路を設計し、パラメータの詳細なチューニングにより、SMA ワイヤのみで変位センシングとアクチュエーションが同時に可能なシステムが実現できることを示した。これにより、触覚感覚のセンシング、触覚感覚のディスプレイだけにとどまらず、ソフトセンサ、ソフトアクチュエータとして、新しいロボットの提案につながることを実例の構築により示した。

3) SMA を変位センサ/アクチュエータとして用いた触覚通信の構築

上記 1)、2) の成果を統合し、触覚感覚の双方向コミュニケーションシステムを試作した。人の皮膚下に分布する触覚受容器の構造と機能を踏まえ、触覚感覚を人と同様のなぞり動作によって計測し、これを遠隔地において再現・提示するセンサ・ディスプレイシステムを試作した。微細な SMA ワイヤとこれにより提示可能な微小振動は、皮膚下の触覚受容器を個別に刺激して、高次知覚を生起させて様々な触感を提示することに有利であり、必要となる物理的要件を計測によって明らかにしてシステム開発を行った。特に、肌との接触面における力学的柔軟度、皮膚の表面形状、力学的インピーダンスなどの物理量に着目することにより、対象物に触れた際の触覚感覚を SMA ワイヤによって計測し、その情報を遠隔地に伝送して人の皮膚に対して自在に触覚を提示するシステムの構築につながった。本申請研究では、これまでにない新しいソフトセンサとソフトアクチュエータの提案と構築をおこない、ロボットならびにインタフェースデバイスへの実装によってその有効性を示した。

4. 研究成果

上述の各研究項目について、それらの成果を以下にまとめる。

1) SMA 試料の温度を制御した変位量の精密計測と変位メカニズムの解析

SMA の変位メカニズムの解析と理解のために、2次元の位相的な中間層をもつニューラルネットワークを提案し、各物理特性の関係について考察した。具体的には、SMA ワイヤに印加する矩形型電圧値、その周波数と duty 比、ワイヤにかかる負荷加重とその変位の関係の数学モデルを構築した。

本実験では、SMA ワイヤに対して{1, 5, 10, 20, 30, 40} g の錘をワイヤ中央に懸架して負荷を与え、電圧値{1, 2, ..., 7}ボルト、周波数{1, 3, 5} Hz, duty 比 {0.1, 0.3, 0.5}の矩形波電圧を印加して、全ての実験パラメータの組み合わせに対して安定状態からの変位量を計測した。ここでは、与える電流の周波数によって SMA の変位量が変わるとする仮説を基に、中間層に位相的なマップを形成できるニューラルネットワークである Restricted Radial Basis Function (rRBF)^[1]を用いてパラメータ間の関係を学習させた。rRBF の学習は、duty 比、負荷の質量、各電圧を印加したときのワイヤの変位を入力とし、周波数のラベルを教師信号として与えた。この仮説が妥当であれば、rRBF の中間層には周波数によるクラスタが形成されることとなる。

実験の結果、図 1 に示す位相マップが形成された。このマップからは、明らかに周波数による SMA の変位ダイナミクスのクラスタが確認でき、仮説の妥当性を示すことができた。これにより、各クラスタのダイナミクスを明確にすることができれば、SMA の区分的なダイナミクスの数学モデルを構築することができる。この手法により、SMA の一般的な非線形ダイナミクスを構築する困難さを回避することができると考えられる。なお、仮説の妥当性をより明らかに示すため、負荷のラベルを教師信号として rRBF を学習し、それによって形成された位相マップを図 2 に示すが、この図において明確なクラスタは形成されず、負荷によってダイナミクスが変化しないことは明らかである。これにより、仮説の妥当性を実験的により明確に確認することができた。

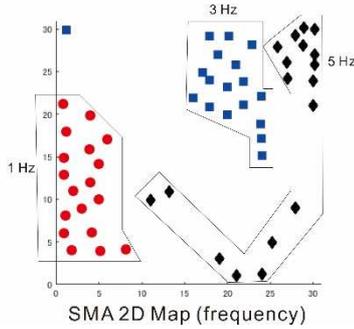


図 1 周波数ラベルによる位相マップ

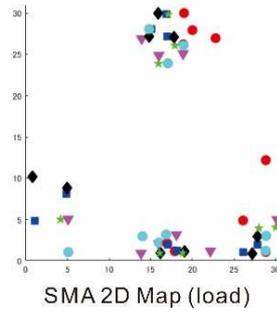


図 2 負荷ラベルによる位相マップ

上述の結果をもとに、図 1 に示す各クラスタに対し、 x_1 : duty 比、 x_2 : 負荷の質量、 x_3 : 電圧値、 d : 負荷の変位とし、以下の近似式(1)を立てた。

$$d = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + \dots + a_{19}x_1x_2x_3 + a_{20} + o(x_1x_2x_3) \quad (1)$$

上式に対し、 d を目的変数、 x_1, x_2, x_3 を説明変数として重回帰分析をおこない、係数 $a_1 \sim a_{20}$ を求めた。重回帰分析による予測エラーは、クラスタ 1 が 0.44mm、クラスタ 2 が 0.26mm、クラスタ 3 が 0.24mm となり、近似式の妥当性を示すことができた。ここで得られた重回帰分析の結果を以下に示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{1\ Hz:} \quad d = & -0.6x_1 + 0.7x_2 - 1.0x_3 + 0x_1^2 - 3.1x_2^2 + 3.0x_3^2 - 0.2x_1x_2 + 0.4x_1x_3 + 1.9x_2x_3 + \\ & 0.5x_1^3 + 2.7x_2^3 - 2.4x_3^3 - 0.5x_1x_2x_3 - 0.6x_1^2x_2^2 + 1.9x_1x_3^2 + 0.7x_1^2x_2 - 0.8x_2^2x_3 - 1.4x_1^2x_3 - \\ & 1.3x_2^2x_3 + 0.4 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{3\ Hz:} \quad d = & -0.2x_1 + 0.6x_2 + 0.4x_3 + 0x_1^2 - 1.1x_2^2 + 0x_3^2 - 0.2x_1x_2 + 0.5x_1x_3 + 0.3x_2x_3 + \\ & 0.2x_1^3 + 0.6x_2^3 - 0.4x_3^3 - 0.1x_1x_2x_3 - 0.3x_1^2x_2^2 + 1.0x_1x_3^2 - 0.1x_1^2x_2 - 0.2x_2^2x_3 - 0.2x_1^2x_3 - \\ & 0.3x_2^2x_3 + 0.0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{5\ Hz:} \quad d = & 0x_1 + 0.4x_2 - 0.4x_3 + 0x_1^2 - 0.8x_2^2 + 0.9x_3^2 + 0.1x_1x_2 - 0.1x_1x_3 - 0.1x_2x_3 + 0.0x_1^3 + \\ & 0.4x_2^3 - 0.5x_3^3 - 0.0x_1x_2x_3 + 0.2x_1^2x_2^2 - 0.0x_1x_3^2 - 0.4x_1^2x_2 - 0.1x_2^2x_3 + 0.4x_1^2x_3 - 0.0x_2^2x_3 + \\ & 0.0 \end{aligned} \quad (4)$$

上の結果により、本実験から SMA の振動周波数による、物理量と変位量との間の区分的なダイナミクスを表す数学モデルを構築することができた。

[1] P. Hartono, et al., Learning-Regulated Context Relevant Topographical Map, IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 26, No. 10, pp. 2323-2335 (2015).

2) SMA ワイヤを用いた微小変位センシングの確立

形状記憶合金の超弾性現象は、結晶構造がオーステナイト相と応力誘起マルテンサイト相の間で可逆的に変化する現象である。形状記憶効果が温度変化に伴う相変態によって起こるのに対し、超弾性現象は SMA が変態温度(M_f)より高い温度にあるとき、外力による負荷に起因して起こる現象である。SMA に外力が加わると、その内部状態はオーステナイト相から応力誘起マルテンサイト相に変化し、除荷すると元のオーステナイト相に戻る。このとき、相状態に応じて SMA の抵抗率が変化することを示した。また、ある種の SMA は、変態の過程で R 相と呼ばれる菱面体晶系の結晶構造を経て、単斜晶系のマルテンサイト相へ変態するが、この R 相変態は高い時間応答性を持つことも上述の 1)における成果により示した。したがって、R 相変態する超弾性現象を利用すれば、SMA ワイヤに加わる外力の大きさの変化を、電気抵抗値の変化として高い時間分解能で取り出せることが可能であり、この R 相変態に伴う超弾性特性を触覚センシングに利用した。

本研究で使用した Ti-Ni-Cu 系 SMA ワイヤは、直径が $75\mu\text{m}$ で、 $M_f=72^\circ\text{C}$ まで加熱されると最大 5%程度長さ方向に収縮し、 $A_f=68^\circ\text{C}$ まで下がると元の長さに戻る。作成した触覚デバイスの概要とその外観写真を図 3 に示す。長さ 12mm の SMA ワイヤの両端を、エポキシ基板に圧着する。エポキシ基板は横幅が 15mm、縦幅が 4mm、厚さが 1mm のもので、SMA の両端に導線をはんだ付けすることで、パルス電流を流して微小振動が起こる。また、SMA ワイヤの中央部に直径 1.2mm の金属製のピンを取り付けることで、その上部において微小振動が増幅されて様々な触覚感覚が提示できる。SMA ワイヤはパルス電流を流すことにより、ON 時にジュール熱による発熱が起こり、OFF 時には自然放熱により冷却される。このときの温度変化によってマルテンサイト変態及び逆変態が起こるので、SMA ワイヤが伸縮を起こしてピンが上下運動を繰り返す。これにより SMA ワイヤの伸縮を微小振動として取り出せるので、ピンの上部を皮膚に接触させることで触覚感覚が提示できる。

触覚センシングでは、皮膚がピンに触れた際の接触力がピンを通じて SMA ワイヤに伝わる。超弾性特性に従って、応力によって SMA ワイヤの相変態が誘起されるので、SMA ワイヤの電気的抵抗値が変化する。これを計測することで、触覚感覚の計測が可能となる。

ここでは、図 3 のデバイスを 3 個配置したアレイ型触覚センサについて報告する。図 4 に、3 連アレイ型センサおよび、なぞり動作の概略図を示すが、図 3 に示すデバイスを上下逆に 2.54mm 間隔で 3 個、基板に取り付けている。SMA ワイヤに定電流源によって 18 mA 程度を流すと、抵抗ジュール熱によって変態温度を保つことができる。本センサを計測対象の素材と接した状態で、一定の荷重を加えながら水平方向に動かすと、ステンレスピンが物体表面の凹凸をなぞることによって SMA ワイヤに応力が加わることとなる。この際のワイヤの電気抵抗値変化を計測することで、素材をなぞった際の触覚感覚として記録することが可能となる。

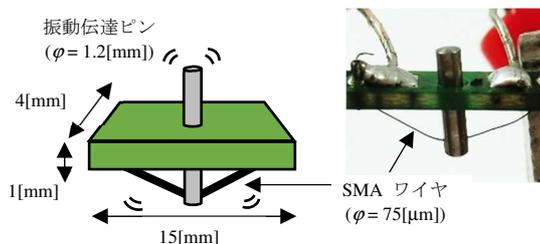


図 3 触覚デバイスの概要と外観

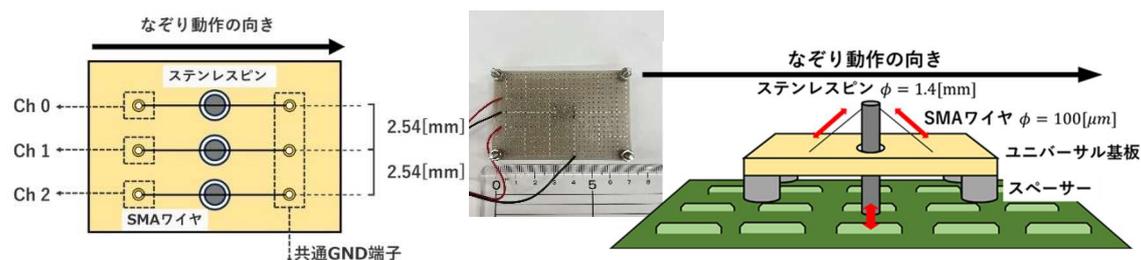
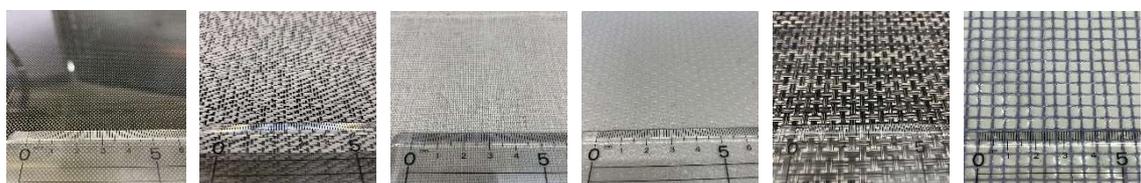


図 4 3 連アレイ型触覚センサとなぞり動作による触覚感覚の計測

構築したアレイ型触覚センサについて、図 5 に示す 6 種類の異なるテクスチャを持つ素材を用いて、なぞり動作による触覚計測実験を行った。なぞり速度を 10, 20, 30 mm/sec の 3 種類、距離を 100mm に設定し、各素材についてサンプリング周波数 10 kHz で計測した。計測結果の例として、図 6 に f) ビニルメッシュを 10 mm/sec でなぞった際の波形を示す。メッシュは 5mm 間隔の凹凸があるが、この繰返しパターンと素材の特徴が明確に表れていることが解る。



a) ガラス b) 塩ビ製マット(細目) c) 麻布 d) プラ製マット e) 塩ビ製マット(荒目) f) ビニルメッシュ

図 5 触覚センシングの対象素材

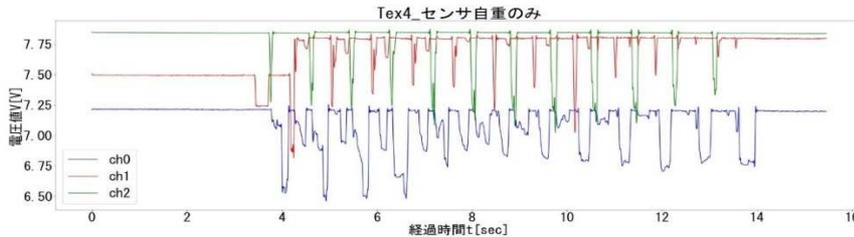


図6 ビニルメッシュを 10 mm/sec でなぞった際の波形

6種類の素材について、DTW(動的時間伸縮法)を用いて弁別実験をおこなった。なぞり速度の違いに対して、頑健に素材の認識ができることが解った。

更に、SMA ワイヤをソフトセンサ、ソフトアクチュエータとして応用し、図7に示す魚ロボットおよびイモムシロボットを構築した。魚ロボットは、SMA ワイヤアクチュエータを尾びれに内蔵することにより、0.5~6Hz の範囲の周期で自在に尾びれを振りながら水中を遊泳することが可能である。SMA アクチュエータは低電圧および低消費電力で駆動が可能のため、身体内部に制御回路およびバッテリーを内蔵することにより、無線で自律駆動を可能としている。

単一機体及び連結状態での歩行を可能とするイモムシ型ソフトロボットは、自己修復素材で作られたボディ、SMA アクチュエータ、足の3つの要素によって構成されている。SMA ワイヤは、ボディの上面と下面に2本を配置しており、交互に伸縮を繰り返すことで尺取り動作による歩行を可能とした。ボディは自己修復ゲルで形成されているため、機体同士が接触した状態で一定時間が経過すると、自己癒着して連結される。連結された新たな機体は、機械学習により歩行動作を自律的に獲得し、効率的な歩行が可能となることを示した。

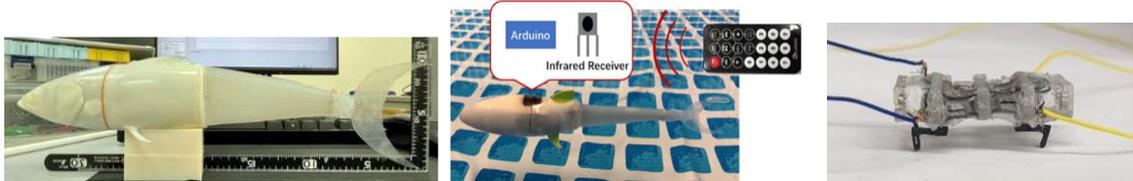


図7 柔軟に自律遊泳する魚ロボット(左・中)と自己修復可能なイモムシロボット(右)

3) SMA を変位センサ/アクチュエータとして用いた触覚通信の構築

本研究で構築してきた触覚センサと触覚ディスプレイを結合し、触覚感覚の伝送システムを試作した。多様な触覚感覚を再現するため、人の指先の2点弁別域である2mm 間隔で、8列×6行=48本のSMA アクチュエータを面状に高密度に配置したディスプレイを構築した(図8)。図4に示す触覚センサで物体の表面をなぞった際のデータを基に、触覚ディスプレイを駆動するためのパルス電流の電圧値、周波数、duty 比を決定することで、触覚感覚を再現することが可能である。

また、映像、音響、触覚ディスプレイを統合した仮想空間において、仮想物体の触覚感覚を体験できるVRシステムを構築した。触覚ディスプレイを握ったユーザの指の位置をトラッキングし、仮想空間内でオブジェクトと接触した場合に、オブジェクトに応じた触覚刺激を触覚ディスプレイから指先に提示することが可能である。仮想物体の触覚感覚は、画像特徴から自動生成する。システム評価のためのユーザ実験において、実素材を撫でている感覚が得られることを確認した。

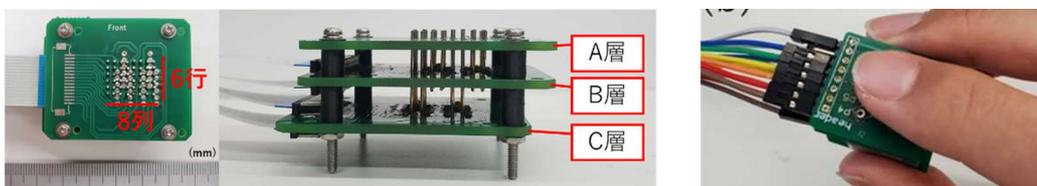


図8 高密度触覚ディスプレイと指先への触覚感覚の提示

本研究では、Ti-Ni-Cu系SMA ワイヤについて、パルス電流によってその周波数に同期して起こる高速伸縮動作と時間応答を精密に測定し、その物性的特性の理解に繋げた。次に、SMA の変態動作のダイナミクスならびに変態量を正確に制御する手法を確立し、ソフトアクチュエータおよびソフトセンサを提案した。特に、触覚感覚の計測と再現が可能で触覚センサと高密度触覚ディスプレイを構築し、その有効性を確認した。更に、新しいSMA センサ・アクチュエータの応用として、ソフトロボットへの展開を図った。魚ロボットおよびイモムシロボットを構築し、バイオメタモルフィシスの観点からこれまでになかった柔軟な動作が可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Xiaojie Chen, Kewei Ning, Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada	4. 巻 Vol.8, No.4
2. 論文標題 An untethered soft robotic fish using SMA wires and its performance analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 229-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2021.120384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shingo Maeda, Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada	4. 巻 Vol.34, No.2
2. 論文標題 Self-Actuating and Nonelectronic Machines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 249-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Haruo Igarashi, Hideyuki Sawada	4. 巻 HSI2021
2. 論文標題 Touching 4D Objects with 3D Tactile Feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Human System Interaction	6. 最初と最後の頁 132-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HSI52170.2021.9538790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Geier Andreas, Tucker Rawleigh, Somlor Sophon, Sawada Hideyuki, Sugano Shigeki	4. 巻 5
2. 論文標題 End-to-End Tactile Feedback Loop: From Soft Sensor Skin Over Deep GRU-Autoencoders to Tactile Stimulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6467-6474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3012951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakai Yuki, Miwa Takanobu, Shigemune Hiroki, Sawada Hideyuki	4. 巻 exsy.12668
2. 論文標題 Four dimensional collision detection and behaviour based on the physics based calculation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Expert Systems	6. 最初と最後の頁 e12668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/exsy.12668	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akane Musha, Manabu Daihara, Hiroki Shigemune, Hideyuki Sawada	4. 巻 ICANN2020
2. 論文標題 Morphological Computation of Skin Focusing on Fingerprint Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN2020	6. 最初と最後の頁 470-481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chen Xiaojie, Shigemune Hiroki, Sawada Hideyuki	4. 巻 ICMA2020
2. 論文標題 An Untethered Bionic Robotic Fish Using SMA Actuators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 1768-1773
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMA49215.2020.9233798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aiemsetthee Nuttasorn, Sawada Hideyuki	4. 巻 HSI2020
2. 論文標題 Presenting Braille Information on Two Fingers Using Vibratory Patterns from an Array of Shape-memory Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE International Conference on Human System Interaction	6. 最初と最後の頁 322-327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HSI49210.2020.9142676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩名 紘基、重宗 宏毅、澤田 秀之	4. 巻 J106-C, No.2
2. 論文標題 形状記憶合金ワイヤの微小振動特性に関する考察	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 79 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2022JCP5005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryusei Oya, Hideyuki Sawada	4. 巻 16 (3)
2. 論文標題 An SMA Transducer for Sensing Tactile Sensation Focusing on Stroking Motion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1016 ~ 1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16031016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kewei Ning, Hideyuki Sawada	4. 巻 11 (4)
2. 論文標題 A wireless bionic soft robotic fish using shape-memory alloy actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)	6. 最初と最後の頁 278 ~ 278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11591/ijra.v11i4.pp278-287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kewei Ning, Pitoyo Hartono, Hideyuki Sawada	4. 巻 7
2. 論文標題 Using inverse learning for controlling bionic robotic fish with SMA actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MRS Advances	6. 最初と最後の頁 649 ~ 655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/s43580-022-00328-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Junjie Shen, Yiwen Chen, Hideyuki Sawada	4. 巻 22 (12)
2. 論文標題 A Wearable Assistive Device for Blind Pedestrians Using Real-Time Object Detection and Tactile Presentation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4537 ~ 4537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22124537	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gembong Edhi Setyawan, Pitoyo Hartono, Hideyuki Sawada	4. 巻 13 (9)
2. 論文標題 Cooperative Multi-Robot Hierarchical Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Computer Science and Applications	6. 最初と最後の頁 35 ~ 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14569/IJACSA.2022.0130904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gembong Edhi Setyawan, Pitoyo Hartono, Hideyuki Sawada	4. 巻 SIET2022
2. 論文標題 An In-Depth Analysis of Cooperative Multi-Robot Hierarchical Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 119 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3568231.3568258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Chujo, Hideyuki Sawada	4. 巻 6 (3)
2. 論文標題 The Application of Micro-Vibratory Phenomena of a Shape-Memory Alloy Wire to a Novel Vibrator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Vibration	6. 最初と最後の頁 584 ~ 598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/vibration6030036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yiwen Chen, Junjie Shen, Hideyuki Sawada	4. 巻 3 (3)
2. 論文標題 A wearable assistive system for the visually impaired using object detection, distance measurement and tactile presentation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Intelligence & Robotics	6. 最初と最後の頁 420 ~ 435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20517/ir.2023.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Renke Liu, Shuyao Zhang, Yusuke Baba, Hideyuki Sawada	4. 巻 12 (11)
2. 論文標題 A Novel Cooling Design for an Agonistic?Antagonistic SMA Tendon-Driven Actuator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 415 ~ 415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act12110415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Haruya Fukuchi, Hideyuki Sawada	4. 巻 35 (6)
2. 論文標題 An Inchworm Robot with Self-Healing Ability Using SMA Actuators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1615 ~ 1621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p1615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Renke Liu, Huakai Zheng, Maros Hliboky, Hiroki Endo, Shuyao Zhang, Yusuke Baba, Hideyuki Sawada	4. 巻 9 (3)
2. 論文標題 Anatomically-Inspired Robotic Finger with SMA Tendon Actuation for Enhanced Biomimetic Functionality	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Biomimetics	6. 最初と最後の頁 151 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/biomimetics9030151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ryo Onose, Hideyuki Sawada	4. 巻 11
2. 論文標題 A ball-jointed tendon-driven continuum robot with multi-directional operability for grasping objects	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-024-00272-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Renke Liu, Hideyuki Sawada	4. 巻 ICMA2023
2. 論文標題 An SMA Wire-based Tendon Actuator and its Application on Robotic Fingers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 681 ~ 686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMA57826.2023.10216073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Pitoyo Hartono	4. 巻 4 (3)
2. 論文標題 Context-flexible cartography with Siamese topological neural networks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Discover Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s44163-023-00098-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minako Oriyama, Pitoyo Hartono, Hideyuki Sawada	4. 巻 1961
2. 論文標題 Human-Guided Transfer Learning for Autonomous Robot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ICONIP 2023 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 186 ~ 198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-8126-7_15	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kewei Ning, Hideyuki Sawada
2. 発表標題 A Wireless Soft Robotic Fish for the Natural Swimming Behavior
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 第58回秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬場悠輔, 澤田秀之
2. 発表標題 SMAワイヤを用いたピンアレイ型ウェアラブル触覚ディスプレイ
3. 学会等名 情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩名紘基, 重宗宏毅, 澤田秀之
2. 発表標題 形状記憶合金ワイヤの振動特性の計測
3. 学会等名 情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 Socio-Economic Changes with AI and Robots
3. 学会等名 KKU International Engineering Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 Displaying Tactile Sensation using SMA Actuators and Sensors
3. 学会等名 28th International Display Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 A shape-memory alloy wire that generates micro-vibration while sensing force
3. 学会等名 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大矢隆晟, 澤田秀之
2. 発表標題 なぞり速度が SMA 触覚センサに与える影響の考察
3. 学会等名 情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩名紘基, 澤田秀之
2. 発表標題 形状記憶合金ワイヤの振動現象の解析とアクチュエータ応用について
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 第57回 秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大矢隆晟, 澤田秀之
2. 発表標題 SMAセンサを用いた深層学習による触覚パターンの分類
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 碓井宏和, 澤田秀之
2. 発表標題 カラーセンシングと SMAアクチュエータを用いた色 - 触覚変換デバイス
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嵐治雄, 澤田秀之
2. 発表標題 触覚フィードバックを伴う4次元空間可視化システム
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideyuki Sawada
2. 発表標題 New physical properties of a shape-memory alloy and their applications to sensors and actuators
3. 学会等名 FILKOM Tech Talk webinar, Universitas Brawijaya, Indonesia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田秀之
2. 発表標題 物理学の視点から Science を味わう
3. 学会等名 菅平スキー科学セミナー2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kewei Ning, Pitoyo Hartono, Hideyuki Sawada
2. 発表標題 Using Inverse Learning for Controlling Bionic Soft Robot Fish with SMA Actuators
3. 学会等名 2022 Virtual Materials Research Society (MRS) Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福地晴也, 澤田秀之
2. 発表標題 自己修復ゲルを用いたイモムシ型ロボットの尺取り動作の再現
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Liu Renke, 澤田秀之
2. 発表標題 An SMA-wire-driven actuator for robotic finger
3. 学会等名 日本電子材料技術協会 第59回秋期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中條崇, 澤田秀之
2. 発表標題 形状記憶合金の微小振動現象を利用したバイブレータの開発
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野澤朋広, 澤田秀之
2. 発表標題 振動と温度のマルチモーダルディスプレイを用いた皮膚の触覚感覚の評価
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤舟, 澤田秀之
2. 発表標題 SMAワイヤを用いたエイ型ロボットのためのヒレ構造の開発
3. 学会等名 ROBOMECH2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 五十嵐治雄, 澤田秀之
2. 発表標題 力覚による接触感覚提示を伴う4次元空間インタラクションシステムの構築
3. 学会等名 情報処理学会 第86回全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大西公平, 内村裕 監修	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 340
3. 書名 ハプティクスとその応用 力触覚の伝送・記録・再現・表示	

〔産業財産権〕

〔その他〕

早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科 澤田研究室 http://www.sawada.phys.waseda.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	重宗 宏毅 (Shigemune Hiroki) (40822466)	芝浦工業大学・工学部・准教授 (32619)	
研究分担者	ハルトノ ビトヨ (Hartono Pitoyo) (90339747)	中京大学・工学部・教授 (33908)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

スロバキア	Technical University of Kosice			
-------	-----------------------------------	--	--	--