

電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートを用いた 関節剛性制御に関する研究

○森本 尚祐 (九州工業大学),
高嶋 一登 (九州工業大学, 理化学研究所), 向井 利春 (理化学研究所)

Study on Joint Stiffness Control Using Shape-memory Polymer Sheet with Embedded Electrical Heating Wire

○Naohiro MORIMOTO (Kyushu Institute of Technology),

Kazuto TAKASHIMA (Kyushu Institute of Technology, RIKEN), and Toshiharu MUKAI (RIKEN)

Abstract: We have investigated the joint stiffness control of a robot arm using shape-memory polymer (SMP). In this study, we examined the temperature control of the SMP sheet with embedded electrical heating wire. We evaluated the prototype of the robot arm using two SMP sheets with the heating wires.

1. 緒言

人間は関節の周りに拮抗して存在する屈筋・伸筋を弛緩・収縮させることによって、関節を固定させたり可動させたりなど関節剛性の制御を行っている。我々はこの屈筋と伸筋の役割を形状記憶ポリマー（以下、SMP）[1][2]によって行わせることで、柔軟性と大きな力を併せ持った関節剛性制御に関する研究を行ってきた[1]。

SMP とは、設定されたガラス転移温度 (T_g) を境に機械的特性が大きく変化するポリマーである。 T_g は室温付近に設定でき、 T_g 以上に加熱すると、弾性係数が100~1000分の1になる。そのため T_g より高い温度ではゴムのように大きく変形させることが可能である。変形を保ったまま T_g 以下の温度に冷却すると変形を保持したまま形状を固定することができる（形状固定性）。その後再度 T_g 以上の温度に加熱すると、SMP は弾性力によって元の形状に回復する（形状回復性）。

Fig.1 に SMP の特性を利用したロボットアームの動作例を示す。可動時には SMP をゴム状態にすることで関節を低剛性にし、アームが物体に衝突した際の衝撃を小さくすることができる。姿勢維持時にはガラス状態にすることで高剛性に変化させ、エネルギー供給が不要になる。

その中で、SMP の弾性係数を変化させるために必要である温度制御は、温風を用いて行っていた[1]。しかし、温風による加熱では、素早く温度を上昇させることや、一定に温度を保つことが困難であった。

そこで、本研究では電熱線を埋め込んだ SMP のシートを試作し、ジュール熱での温度制御を検討した。さらに、試作した電熱線埋め込み型 SMP シートを用いた関節の機械的特性を評価した。

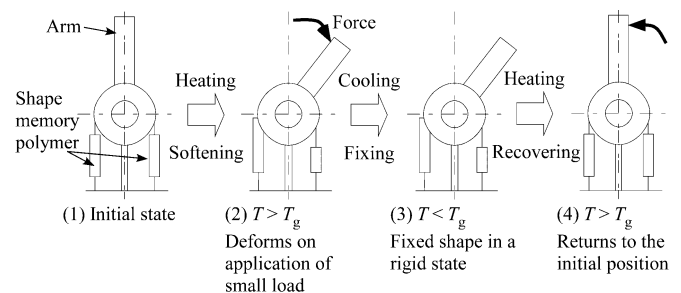


Fig.1 Principle of motion for robotic arm application using SMP

2. 実験

2.1 電熱線埋め込み型 SMP シートの試作

本研究で用いた電熱線を埋め込んだ SMP シートの試作品の外観を Fig.2 に示す。作製した2枚のサンプルをサンプル A、サンプル B とする。サンプル A、B のサイズはそれぞれ 153mm×17mm×1.30~1.35mm, 147mm×16mm×1.50~1.55mm であった。従来のチューブ型の SMP は断面積 22mm², 長さ 150mm であった[1]。今回使用した SMP は、ディアプレックス製ダイアリイ (MP4510) であり、 $T_g=45^{\circ}\text{C}$ である。プレスして作製した2枚の SMP シートの間に電熱線 (ニクロム, $\phi 0.26\text{mm} \times 710\text{mm}$) を挟み、 150°C で1時間加熱することで作製

した。また、電熱線部の長さはそれぞれ 118mm, 121mm, 電熱線の電気抵抗は共に 15Ω である。

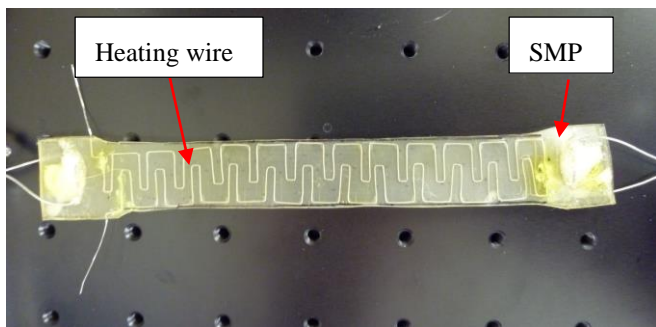


Fig.2 SMP sheet with embedded electrical heating wire

2.2 実験方法

SMP を用いたロボットアームの動作は 4 つの動作に分けることができ、それぞれ以下のような特性が求められる。

- ・姿勢維持状態 ($T < T_g$)
強い力で対象を固定するための形状固定性が求められる。
- ・動作状態 ($T > T_g$)
アームを動かす際に、柔軟に関節部を拘束する必要がある。
- ・冷却状態 ($T < T_g \rightarrow T > T_g$)
冷却する際に、正確に位置決めを行える精度が必要である。
- ・形状回復状態 ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)
柔軟に関節部を拘束する性能、さらに SMP 自体の形状回復性によって初期位置に戻る性能が求められる。

本研究ではこれらの 4 つの状態における特性について Fig.3 に示す装置を用いて検討した。電熱線埋め込み型 SMP シートを Fig.3 のようにワイヤを経て拮抗して取り付けた。電熱線に印加する交流電圧はスライダックを用いて変化させた。ロードセルを自動ステージに取り付け、アームに接触した状態で移動させることで、関節部に生じるトルクを測定し、同時に関節に取り付けたポテンショメータでアームの角度を検出した。SMP の温度は表面に貼り付けた熱電対で測定し、ON-OFF 制御を行った。ON-OFF 制御の切り替え温度は 70℃ に設定した。実際の温度はデジタル放射温度センサ (キーエンス, FT-H10) で測定した。

本研究で用いた 2 枚の SMP シートがまったく同じ形状・材質で、初期位置で同じ長さに伸ばされていたと仮定する。SMP シートの断面積、電熱線部の長さをそれぞれ A , l , 関節の中心からワイヤまでの距離を r , アームの角度を θ , SMP の弾性係数、粘性係数を E , μ と

すると (添字 g , r はそれぞれ、ガラス状態, ゴム状態を表す), 関節部に発生するトルク τ は次の式で表される [1].

$$\tau = \begin{cases} -2r^2 A(E_r \theta + \mu_r \dot{\theta})/l & (T > T_g) \\ -2r^2 A\{E_g(\theta - \theta_g) + \mu_g \dot{\theta}\}/l & (T < T_g) \end{cases} \quad (1)$$

ただし,

$$\theta_g = \begin{cases} 0 & (T > T_g) \\ T_g \text{以下に冷却される直前の} \theta & (T < T_g) \end{cases} \quad (2)$$

本研究においては式 (1) で理論値を求め、実測値と比較した。 A , l , r , E_r , E_g はそれぞれ, 22.3mm², 119.5mm, 106mm, 4.5MPa, 1800MPa, $\mu_r = \mu_g = 0$ MPa·s とした。

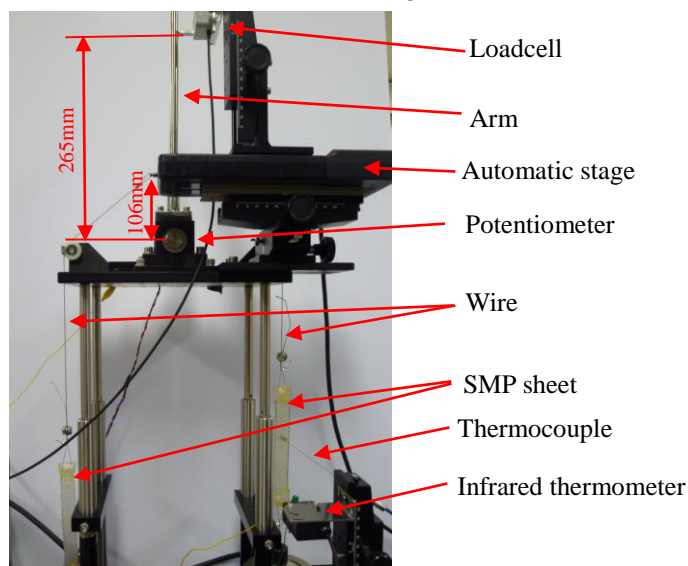


Fig.3 Experimental system for evaluating a robotic arm that uses the SMP sheets

3. 結果および考察

電熱線に加える電圧を 10~30V と変化させたときの SMP シートの温度変化の様子を Fig.4 に示す。従来の温風を使った温度制御では 70℃ まで加熱するのに 100 秒近くかかっていたが [1], 10V では 60 秒, 20V では 20 秒程度で加熱することができた。しかし, ON-OFF 制御では電圧を大きくするとオーバーシュートが生じ、一定の温度を保つことが難しかった。特に 30V で電流を流したときには、大きなオーバーシュートが生じ温度を 70℃ 付近に制御できなかった。

Fig.5 に SMP がガラス状態のときにアームに力を加えた後 20V の電圧で電熱線を加熱し、再度アームに力を加えた場合のアームの角度と関節部に発生するトルクの挙動を示す。20 秒程度で SMP シートの温度を変化させて関節剛性を大きく変化させることができた。

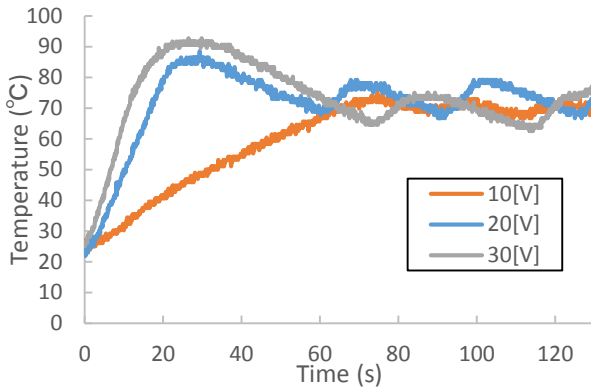


Fig.4 Transition of temperature of SMP sheet

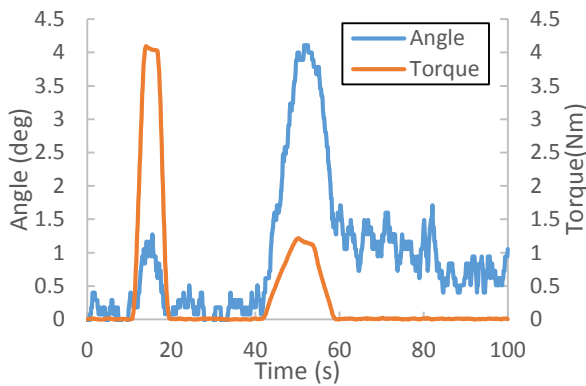


Fig.5 Example of joint stiffness control using SMP sheets

・姿勢維持状態 ($T < T_g$)

SMP をガラス状態にしたアームに一定速度で力を加えたときの角度と関節部に発生したトルクを Fig.6 に示す. 理論値と比較すると, 大きくアームが動いたが, スケールを用いて SMP の長さ変化を測定したところ, 伸びはほとんど計測されなかった. そのため, この角度の変化は SMP の変形の影響ではなく, SMP とアームを繋いでいるワイヤやその連結部のたわみによって発生しているものと考えられる.

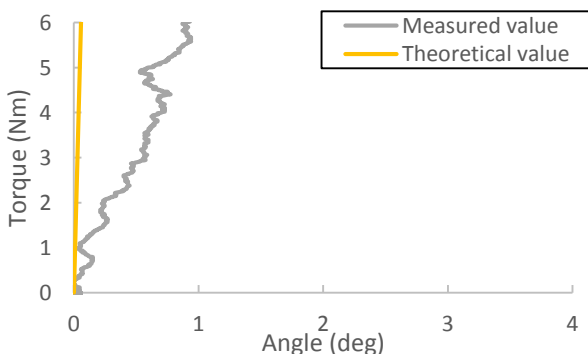


Fig.6 Relationship between generated torque and joint angle of robotic arm using SMP sheets ($T < T_g$)

・動作状態 ($T > T_g$)

ゴム状態においてアームに一定速度で角度が 4° になるまで力を加えた場合の角度とトルクを Fig.7 に示す. ガラス状態に比べ, 小さな力でアームを動かせるようになった. ただし, ロードセルの移動速度に依存するのは, 粘性の影響を受けているためと考えられる. 理論値と比較すると大きなトルクが生じているものの, 理論値は粘性を考慮していない値であること, 装置の精度等を踏まえると得られた結果に問題はないといえる. 以前のチューブ型 SMP を用いた実験の結果 [1] と比較すると大きなトルクが生じているのは, SMP に埋め込んでいる電熱線の影響であると推測できる.

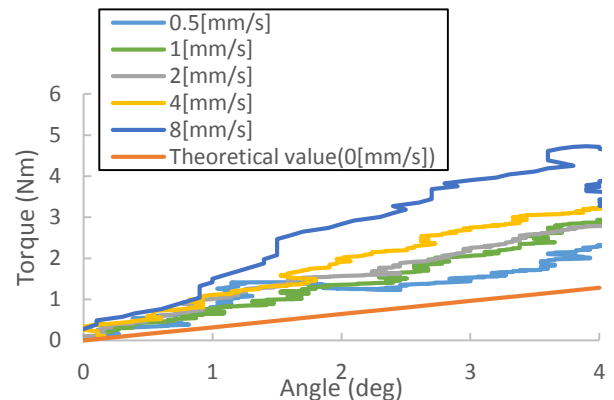


Fig.7 Relationship between generated torque and joint angle of robotic arm using SMP sheets ($T > T_g$)

・冷却状態 ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)

SMP を加熱し, ゴム状態にしてアームの角度を変化させ, その状態を保持したまま 5 分間かけて室温 (27°C) まで自然冷却した. このときのアームの角度別の関節部に発生したトルクと温度の関係を Fig.8 に示す. 図中に矢印で示すように温度が下がっていくにつれてトルクが増加した. 原因としては SMP が熱収縮しているためと考えられる. この挙動は大きくアームの角度を変化させた場合のほうが顕著に現れた.

また, この熱収縮によってロードセルによるアームの拘束を無くした際にスプリングバックも生じた (Fig.9). この現象もアームの角度を大きく変化した場合のほうが大きく現れた. そのため, 今後, アームの可動可能な角度を増加させていく場合, アームの位置決め精度にスプリングバックが影響を与えないようにする必要がある.

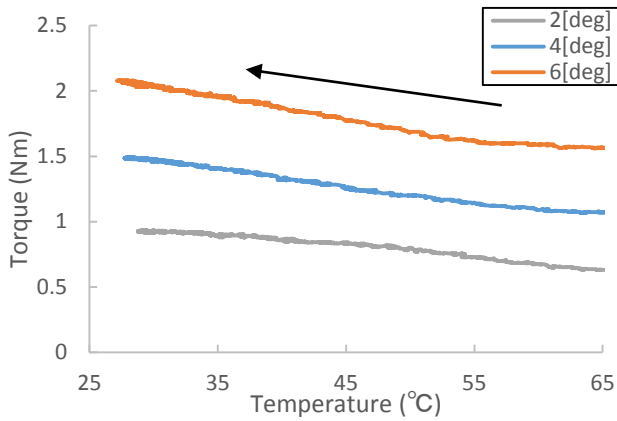


Fig.8 Transition of generated torque of robotic arm using SMP sheets when fixed at different angles ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)

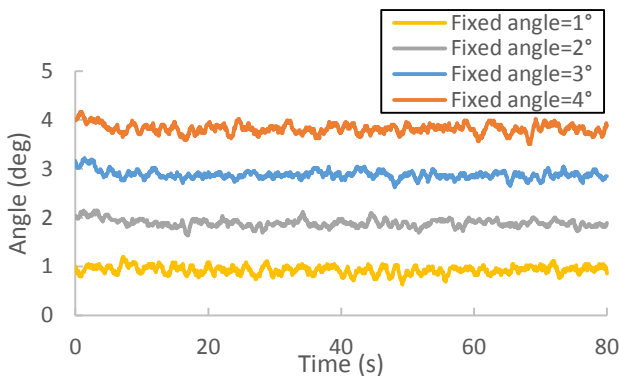


Fig.9 Spring-back phenomenon of robotic arm using SMP sheets

・形状回復状態 ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)

アームの角度を変化させた状態で冷却し、アームを固定した。その状態でロードセルによる負荷を排除し、電熱線に 20V の電流を流して加熱した場合のトルクと温度の経時変化を Fig.10 に示す。アームの角度の回復を角度別に調べたものが Fig.11 である。SMP の形状回復特性によってアームの角度の回復の大部分は温度が上がるにつれて素早く行われるが、10 パーセント程度は回復せずに角度の変化が残ってしまった。これは SMP に埋め込んでいる電熱線が塑性変形している影響であると考えられる。改善するためには、電熱線の配置、材質、太さ等の見直しが必要である。

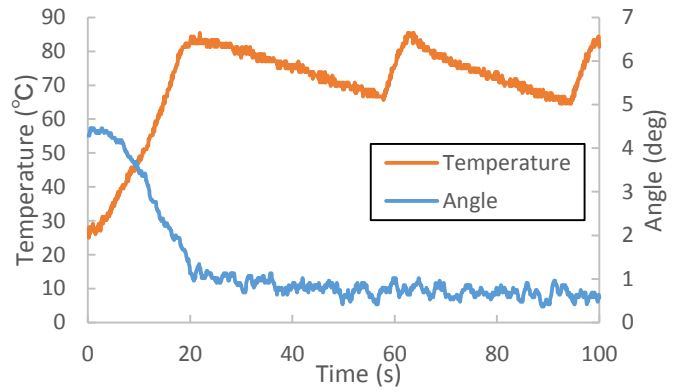


Fig.10 Transition of temperature and joint angle of robotic arm using SMP sheets when heated with no loading ($T < T_g \rightarrow T > T_g$)

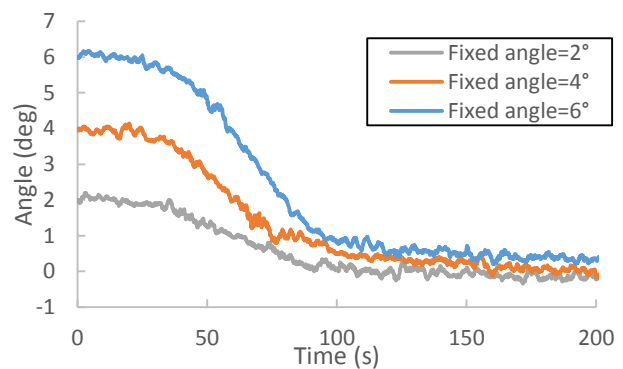


Fig.11 Transition of joint angle of robotic arm using SMP sheets for different fixed angles when heated with no loading ($T < T_g \rightarrow T > T_g$)

4. 結言

本研究では、電熱線埋め込み型 SMP を用いた関節の剛性制御について、基本的特性を検討した。電熱線による温度制御で今まで課題とされていた速やかな SMP の加熱を行えることが示された。ただし、電熱線を埋め込むことによって動作状態や形状回復状態において性能が下がってしまうという問題が発生したため、今後その改善を行っていききたい。

謝辞

本研究は、公益財団法人マツダ財団からの研究助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 高嶋一登, 張楠, 向井利春, 郭士傑, “形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールの基礎研究”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.7, pp.905-912, 2010
- [2] 杉谷和洪, 則次俊郎, 向井利春, 高嶋一登, “形状記憶ポリマーを用いた空気圧ゴム人工筋の温度制御の検討”, SI2012, pp.1144-1146, 2012