

形状記憶ポリマーシートを用いたウェアラブル姿勢維持機構の開発

○森本 尚祐 (九州工業大学),
高嶋 一登 (九州工業大学, 理研), 竹中 慎 (香川県産業技術センター, 九州工業大学),
則次 俊郎 (津山高専), 向井 利春 (理研)

Development of Wearable Position-keeping Mechanism

Using Shape-memory Polymer Sheet

○Naohiro MORIMOTO (Kyushu Institute of Technology),

Kazuto TAKASHIMA (Kyushu Institute of Technology, RIKEN),

Makoto TAKENAKA (KPITC, Kyushu Institute of Technology)

Toshiro NORITSUGU (Tsuyama National College of Technology), Toshiharu MUKAI (RIKEN)

Abstract: In order to develop a wearable position-keeping mechanism using shape-memory polymer (SMP) sheet, we evaluated the prototype of the device. This device is used for the assistance of position keeping of the elbow joint. We examined the fundamental characteristics of the prototype using the SMP sheet with embedded electrical heating wire.

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]~[3]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][2]。

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）。更にSMPには形状記憶合金などと比較して、軽量であること、変形量が大きいなどの利点がある。

Fig.1 に SMP の特性を利用した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。

以前の研究で我々はアームに SMP を拮抗して配置させた Fig.1 に示すコンセプトの有用性を示した[1]。また、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せた[2][3]。

本研究では、このような SMP の特性を利用することで小型かつ軽量のウェアラブル姿勢維持機構の開発、評価を行った。

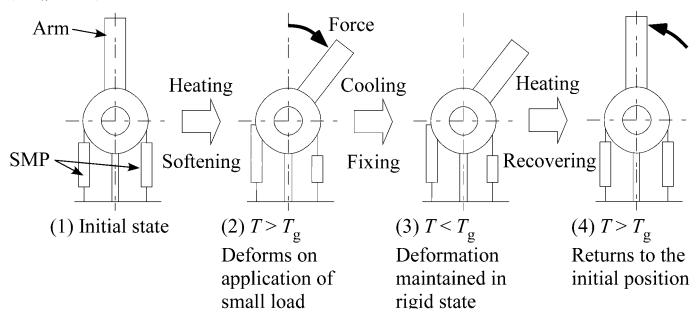


Fig.1 Principle of motion for robotic arm application using SMP

2. 実験

2.1 ウェアラブル姿勢維持機構の概要

Fig.2 に我々が開発を行っているウェアラブル姿勢維持機構の使用時のイメージ図を示す。この装置を腕に装着することで、人間が重いものを持つ際や、上向き作業での腕の姿勢維持を行なう際の肘関節の剛性制御の補助を行うことを目的とした。電熱線を用いた加熱を

行うことで SMP シートの温度制御の応答を速くすると共に、装置の小型化を図った。また、シートの冷却はタンクに貯蔵した圧縮空気をチューブから吹き付けて行うことを想定している。Fig.3 に今回の研究で用いた試作装置の外観を示す。今回の研究では、荷重支持を行う際の動作時及び、姿勢維持時の基本的な特性を検証した。

電熱線埋め込み型 SMP シート[2][3]を Fig.3 のように機構に取り付けた。シートのサイズは 153 mm×17 mm×1.2 mm であった。今回使用した SMP (SMP テクノロジー製, 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, $\phi 0.26\text{ mm}$) を挟み、 150°C で 20 分間加熱することで作製した。また、電熱線部の長さは 121 mm, 電熱線の電気抵抗は 15Ω である。

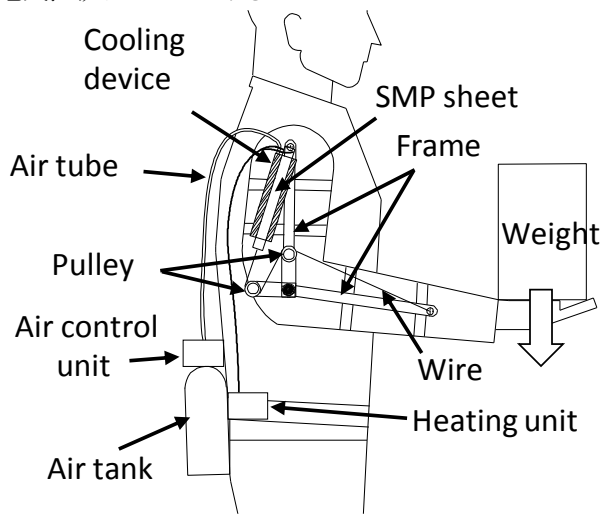


Fig.2 Application image of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet

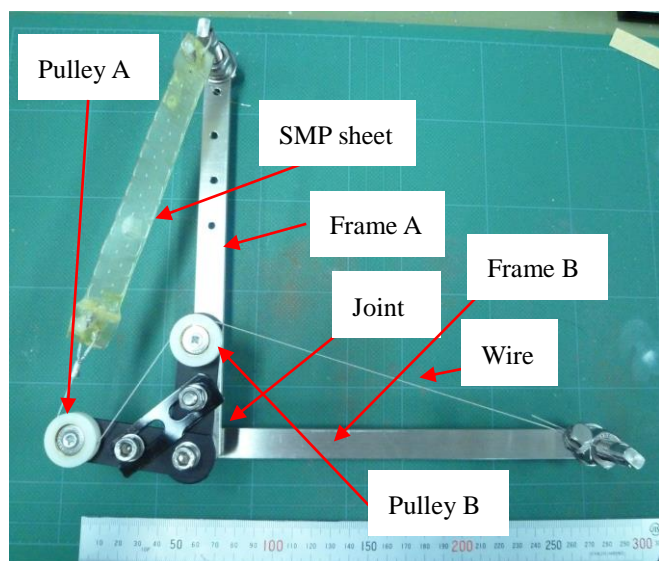


Fig.3 Prototype of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet

2.2 実験方法

SMP を用いた姿勢維持機構は 2 つの動作に分けることができる。

- 姿勢維持状態 ($T < T_g$)

強い力で腕の姿勢を維持するための固定性が求められる。

- 動作状態 ($T > T_g$)

小さな力で違和感無く姿勢を変化させるための柔軟性が求められる。

本研究ではこれらの動作における特性について Fig.4 に示す装置を用いて検討した。Fig.4 のように機構本体を自動ステージに固定して鉛直上向きに移動させた。機構の一方の端をワイヤを経てロードセルと接続することで、関節部に発生するトルクを検出した。自動ステージの移動速度は 0.25, 0.5, 1, 2 mm/s とした。この装置において、自動ステージを 1 mm 移動させることでフレーム間の角度が 0.29° 変化する。機構の移動距離はレーザ変位計 (キーエンス製, LK-GD500, LK-G150) を用いて測定した。SMP の温度制御はパルス幅変調 (PWM) 制御 (10V, 1s サイクル, デューティ比:60~70%) を用いて行い、動作状態での温度は 70°C 以上となるように設定した。

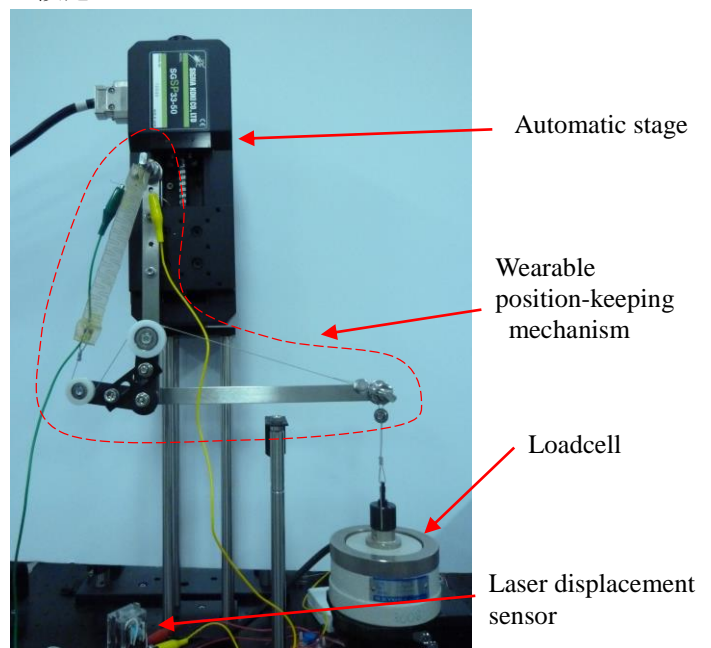


Fig.4 Experimental system for evaluating wearable position-keeping mechanism using SMP sheet

3. 理論式

本研究では、機構の慣性を無視して静的なつり合いだと仮定し、関節部に発生するトルクの理論式を求めた。Fig.5 のように関節が動いたとき、プーリ B からフレーム B の先端までのワイヤの長さが変化し、SMP シートが伸長され、関節部にトルクが発生する。計算に用

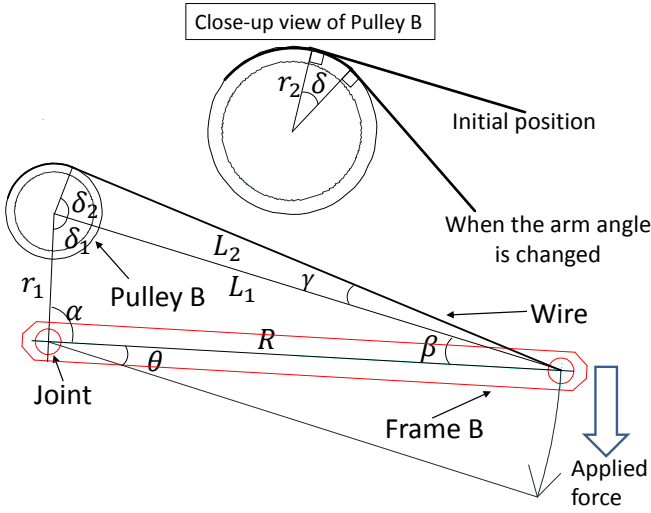


Fig.5 Model of generated torque when joint angle is changed

いる記号は Fig.5 に示す通りそれぞれ、フレーム B の長さを R 、関節部からプーリ B の中心までの距離を r_1 、プーリ B の半径を r_2 、プーリ B からフレーム B の先端までの距離を L_1 、プーリ B とワイヤの接点からフレーム B の先端までの距離を L_2 、各角度を α 、 β 、 δ_1 、 δ_2 、として計算に用いた。 θ を初期位置からの回転量とすると、余弦定理より

$$L_1^2 = r_1^2 + R^2 - 2r_1R \cos(\alpha + \theta) \quad (1)$$

となる。つまり

$$L_1 = \sqrt{r_1^2 + R^2 - 2r_1R \cos(\alpha + \theta)} \quad (2)$$

である。一方

$$L_2 = \sqrt{L_1^2 - r_2^2} \quad (3)$$

であるので

$$L_2 = \sqrt{r_1^2 + R^2 - 2r_1R \cos(\alpha + \theta) - r_2^2} \quad (4)$$

である。すなわち、 L_2 の変化分 ΔL_2 は

$$\Delta L_2 = \sqrt{r_1^2 + R^2 - 2r_1R \cos(\alpha + \theta) - r_2^2} - \sqrt{r_1^2 + R^2 - 2r_1R \cos \alpha - r_2^2} \quad (5)$$

で表される。また、プーリに巻きついたワイヤの長さは、 $r_2\delta$ となる。ワイヤがプーリに巻きついた部分の角度 δ は、以下の $\delta_1 + \delta_2$ の $\theta = 0$ のときからの減少分として求められる。

$$\delta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r_1^2 + L_1^2 - R^2}{2r_1L_1}\right) \quad (6)$$

$$\delta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{r_2}{L_1}\right) \quad (7)$$

SMP の伸びは、 $\Delta L_2 + r_2\delta$ となるので、関節部に発生するトルク T は、SMP のばね定数を k とすると、

$$T = k(\Delta L_2 + r_2\delta) \sin(\beta + \gamma) \quad (8)$$

となる。ただし余弦定理より、

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + R^2 - r_2^2}{2L_1R}\right) \quad (9)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \quad (10)$$

である。式 (5) ~ (10) より、 θ が決まると T を求めることができる。

今回計算に用いた機構の寸法を Table 1 に示す。 Fig.6 にこれらの値を用いて式 (5) ~ (10) から求めた角度 θ とトルク T の関係を示す。さらに図中に人間が持つ肘関節剛性 (0.017~3.491 Nm/deg) [4]から求めた θ と T の関係を示す。このグラフから、この機構が持つ理論的な性能は人間の持つ肘関節と同様に剛性を大きく変化させることが可能である。すなわち、装着者自身が関節の剛性を変化させなくとも、機構によって関節の剛性を変化させることが可能になる。

Table 1 Specifications of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet

r_1 [mm]	50
r_2 [mm]	15
R [mm]	200
α [deg]	90
$k (T > T_g)$ [N/mm]	0.75
$k (T < T_g)$ [N/mm]	225

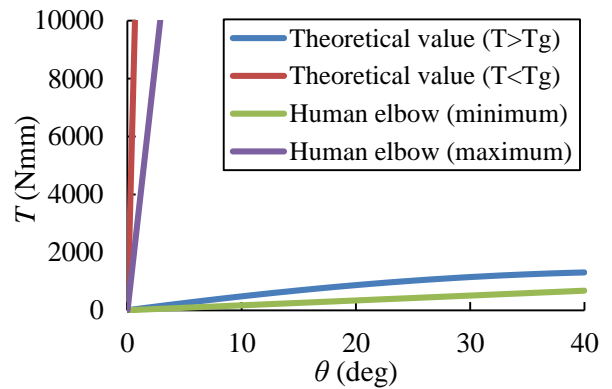


Fig.6 Relationship between generated torque and joint angle of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet (Theoretical values)

4. 結果および考察

SMP の温度が $T < T_g$ と $T > T_g$ それぞれの状態において、自動ステージで 0.5 mm/s (0.14 deg/s) の速度で機構を動かして関節部の角度を変化させたときの、関節部に発生するトルクと角度の関係を Fig.7 に示す。SMP の温

度が $T > T_g$ の場合においては比較的理論値に近い結果を得ることができた。しかし、 $T < T_g$ の場合には、理論値と比較すると大きな誤差があることが分かった。機構の固定性能としては今後改善が必要である。しかし、 $T < T_g$ の状態においてアーム角度を変化させた際の SMP シートの伸びはほとんど確認されなかったため (1 mm 以下)、原因としては、SMP の接続部分や、機構自体の変形などが原因であると考えられる。

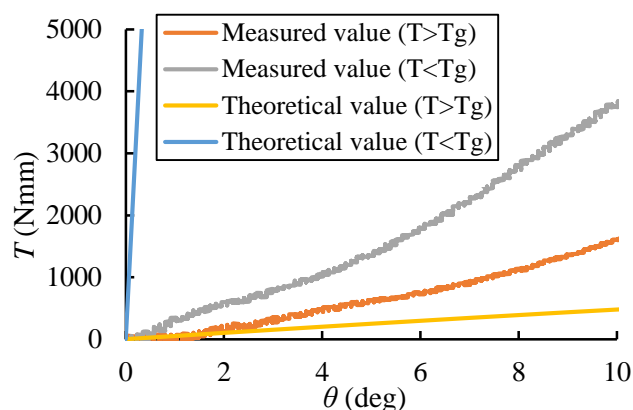


Fig.7 Relationship between generated torque and joint angle of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet

また、SMP の温度が $T > T_g$ 時において、一定速度で 40 mm (11°) 機構を動かす、アームの角度を変化させた際の速度別の時間とトルクを Fig.8 に示す。グラフから速度が大きいほど最大発生トルクが大きくなっていることが分かる。これは SMP の粘性および、機構の慣性の影響であると推測される。機構の角度を更に素早く変化させる際には大きな影響を与えられ。そのため、実際に動作させる場合にはこの速度依存の影響を考慮しなければならない。また、動作後に応力緩和が起こっている。

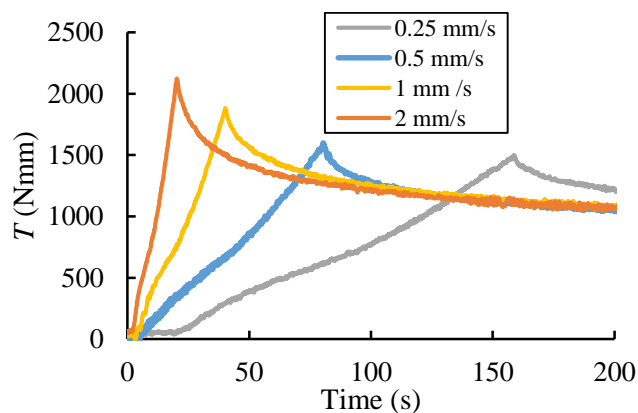


Fig.8 Transition of generated torque of wearable position-keeping mechanism using SMP sheet ($T > T_g$)

5. 結言

本研究では、SMP シートを用いたウェアラブル姿勢維持機構の開発、評価を行った。SMP の特性を利用することで姿勢維持機構としての基本的な動作を行わせることができた。今後は更に冷却装置の開発、検討なども行なっていきたい。

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] 森本尚祐, 高嶋一登, 向井利春, “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”, SI2013, pp.2468-2471, 2013
- [3] K. Takashima, K. Sugitani, N. Morimoto, S. Sakaguchi, T. Noritsugu, T. Mukai, Pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer sheet with embedded electrical heating wire, Smart Materials and Structures (accepted).
- [4] 山下忠, 武内顕一, 奥野康, 相良慎一, “拮抗駆動関節による剛性とトルクの制御:空気圧アクチュエータによる実験的検討”, 日本ロボット学会誌, vol. 3 no. 5, pp. 666~673, 1995