

形状記憶ポリマーのロボットの姿勢維持への応用

高嶋一登^{*1}, Jonathan ROSSITER^{*2,3}, 郭士傑^{*4}, 向井利春^{*3}

Application of Shape-memory Polymer to Position Keeping of Robot

Kazuto TAKASHIMA^{*5}, Jonathan ROSSITER,
Shijie GUO and Toshiharu MUKAI

^{*5} Advanced Science Institute, RIKEN
2271-130 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya-shi, Aichi, 463-0003 Japan

Above their glass transition temperatures (T_g), shape-memory polymers (SMPs) can be deformed by applying a small load. They maintain their shape after they have been cooled below T_g , and then return to a predefined shape when next heated above T_g . The reversible change in the elastic modulus between the glassy and rubbery states of SMPs can be of the order of 100 to 1000 times. Exploiting these characteristics, this study seeks to evaluate the application of SMPs to low energy position keeping of a robot arm. Prototypes of a SMP-based position keeping module were fabricated, together with a prototype hybrid McKibben actuator using a SMP. When the SMP is heated above T_g it softens and the prototypes can deform upon the application of a small load. After the robot arm attains a desired length, the SMP is cooled to below T_g and it is fixed in a rigid state. This state is maintained without the need for any electric power, air supply or control system. The enhanced versatility of this application of SMP to position keeping of a robot is shown through a series of experiments conducted on the prototypes.

Key Words : Shape-memory Polymer, Shape Fixity, Robot, Actuator, Glass Transition Temperature, Arm, McKibben Actuator, Smart Material, Positioning

1. 緒 言

人間は行う動作に応じて、関節の回りの屈筋・伸筋を弛緩・収縮させることにより、関節を柔らかくしたり硬くしたりさせる。一方、ロボットアームでは、駆動した後、荷重を負荷した状態で姿勢を維持することが必要な場合が多い。これまでそうしたロボットアームやフィンガーの姿勢維持には、例えばブレーキ機構、ラチェット式の爪、ギアなどを用いている。しかし、例えば、電磁モータと大きな比率のギアを組み合わせると、大出力が得られても、ロボットの関節が硬くなり、バックドライブビリティが失われる。一方、ラチェット機構をつけると、維持する位置が不連続である。

そのため、我々は、ロボットのアームやフィンガーでも人間と同様に「柔軟性」と「大きな力」を両立させた

姿勢維持が行えるように、形状記憶ポリマー（以下SMP）^{(1)~(3)}の応用を検討した。従来、姿勢維持に限らず関節の剛性を制御するためには、位置のサーボ剛性を利用する方法などが考えられてきたが、材料自体の剛性変化を利用することが本研究の特徴である。本研究では、SMPを用いた姿勢維持モジュールおよびMcKibben型アクチュエータを試作し、評価実験を行い、ロボットアームの姿勢維持への応用を検討した。

2. SMPを用いた姿勢維持モジュール

2.1 基本仕様 SMPとは、成型加工後に力を加えて変形しても、ガラス転移温度(T_g)以上に加熱すると元の形状に回復するポリマーである。さらに、SMPは室温付近に設定された T_g 以上に加熱すると弾性係数が大きく変化する。このため、 T_g 以上でゴムのように柔らかく大変形可能で、その状態で T_g 以下にすると、変形した任意の形状を保持したまま、ガラスのように固く変形しにくくできる。その後、 T_g 以上に加熱すると、材料は柔軟性を取戻し、本来の弾性力によって元の形状に回復する。

本研究では、図1に示すように、SMPを用いてロボットアームの関節の剛性変化を行い、姿勢維持すること

^{*1} 正員, 理化学研究所基幹研究所 (〒463-0003 愛知県名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-130)

^{*2} Department of Engineering Mathematics, University of Bristol (University Walk, Bristol BS8 1TR, UK)

^{*3} 理化学研究所基幹研究所

^{*4} 正員, 東海ゴム工業株式会社 (〒485-8550 愛知県小牧市東3-1)

E-mail: takasima@nagoya.riken.jp

を検討する。すなわち、移動時には加熱しゴム状態で低剛性とする。これは、人間が関節周りの屈筋・伸筋を同時に弛緩させ、外部から自由に動かされるようになった状態に対応する。このとき、衝突時の衝撃も小さくできる。また、荷重を保持する場合など姿勢維持時に冷却しガラス状態で高剛性を保つ。これは例えば人間が物を把持したとき、対象物の重さによって関節の硬さを設定することに対応する。SMPを用いることによって、それ以外にも以下の利点が考えられる。

- (1) 部品点数が少なく、小型化・軽量化が可能である。
- (2) 完全にフリーな状態だと、外乱により容易に可動範囲を超える可能性があるが、各部が連結されているので、可動範囲を超えるには、材料が破壊するほど大きな力が必要である。
- (3) 姿勢維持時のエネルギー供給が不要である。

2・2 実験 本研究では、 $T_g = 55^\circ\text{C}$ のポリウレタン系SMP（ディアプレックス製ダイアリイ、MP5510）をチューブ状に成型したサンプル（外径：8mm，内径：6mm）に継手やカバー等を取り付け、姿勢維持モジュールを構成した。加熱・冷却は、内部を通す温風・冷風によって行った。また、SMPチューブの取り付けには、加熱した状態で竹の子継ぎ手を挿入し、インシュロックで結束した。ただし、SMPチューブの実際に変形する部分の長さは、119mmであった。

本研究では、図1のように二つの姿勢維持モジュールをアームに拮抗に配置させた。ロードセルを自動ステージに載せ、アームに接触させた状態で移動させ、そのときのアームの変位をアームの根元の関節に取り付けてあるポテンシオメータで測定した。アームの関節からSMPが取り付けられている位置、ロードセルによって荷重を加えた位置の距離はそれぞれ112mm，164mmとした。

2・3 結果 SMPが、ガラス状態、ゴム状態それぞれにおいて一定速度でアームに力を加えたときの変形特性を図2に示す。自動ステージはステップモータ駆動なので、ガラス状態では、反力が大きく、アームの角度は変化しなかった（図2左）。一方、ゴム状態では、小さい力でアームが動かされた（図2右）。なお、本グラフには、サンプルのサイズ、カタログ記載のSMPの弾性係数を用いて算出した発生トルクも理論値としてプロットした。理論値と実験値が近い値となっていることが分かる。

3. SMPを用いたMcKibben型アクチュエータ

3・1 基本仕様 前章では、SMPを剛性変化する受動要素としてのみ用いた。SMPの形状回復性も、駆動源として利用可能ではあるが、SMPは形状記憶合金に比べ

て形状回復力が小さいので⁽¹⁾、本章ではアクチュエータとの組み合わせを検討する。

McKibben型アクチュエータ⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、網状の繊維スリーブに覆われたゴムチューブの内部に圧縮空気を給気すると長さ方向に収縮し、空気を排気すると元の長さに戻る空気圧アクチュエータであり、軽量、高出力などの利点を持つ。McKibben型アクチュエータをロボットの関節に用いる場合、拮抗運動型にして関節の剛性を高くすることが多いが、ガススプリングのようなものなので、保持力に限界がある。また、非線形性やヒステリシスといった特性を持ち、正確な位置制御や速度制御が難しい。そのため、本研究では、SMPを用いたMcKibben型アクチュエータを開発した。

本アクチュエータの動作を図3に示す。従来のMcKibben型アクチュエータと同様に使用する際は T_g 以

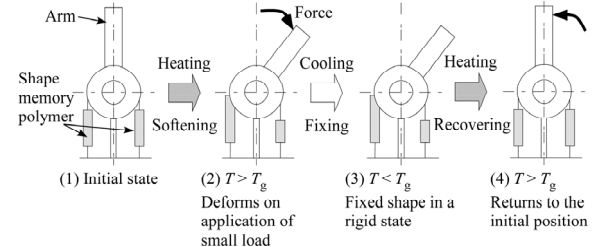


Fig. 1 Schematic of a position-keeping module that uses an SMP for robotic arm application

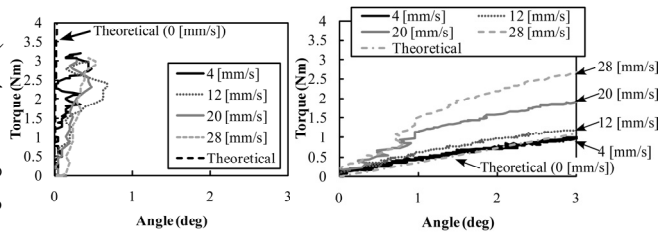


Fig. 2 Relationship between generated torque and joint angle of robotic arm using SMP position-keeping module. (Left) $T < T_g$ and (right) $T > T_g$

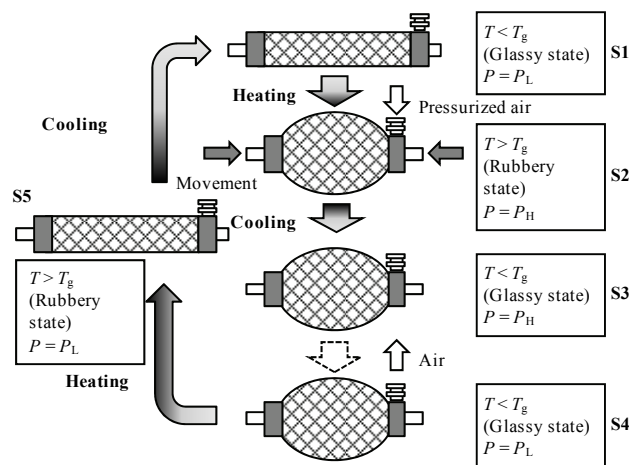


Fig. 3 Schematic of McKibben actuator that uses SMP (P_H : high pressure, P_L : low pressure)

上まで加熱して SMP 自体をゴム状態にして駆動する (S1→S2) . その後, 目標とする位置で T_g 以下まで温度を下げ, SMP をガラス状態にして硬くし, その状態で保持する (S3) . その結果, 強い力で姿勢保持できる. さらに, 圧縮空気を供給しなくてもこの長さを保つことができる (S4) . その後, T_g 以上に加熱すると, 柔軟性を取戻し, 元の形状に回復する (S5) .

3・2 実験 本研究では, $T_g = 45^\circ\text{C}$ のポリウレタン系 SMP (ディアプレックス製ダイアリイ, MP4510) を市販の McKibben 型アクチュエータ⁵⁾ (外径: 20 mm, 伸長させた長さ: 210 mm, Shadow robot company Ltd.) の繊維スリーブに塗布し, 試作品を作製した. その後, 試作品を等張試験で評価した. すなわち, 一定荷重 (62 N) を負荷した状態で内圧を変化させ, そのときの変位をレーザ変位計で測定した. また, オートグラフに試料を取り付け, 一定速度 (5 mm/min) で試作品を伸長し, 受動要素としての変形特性を調べた. いずれの実験も, 試作品はボックスの中に入れ, 周囲温度が T_g より十分高い 70°C 以上になるように加熱した.

3・3 結果 図3の動作手順に沿って, 試作品を動作させた. 内圧, 変位, 周囲温度の経時変化を図4に示す. まず, 無荷重で冷却固定した試作品の片端こもりをぶらさげ, T_g 以上に加熱すると, おもりの重さで試作品は徐々に伸長した (図4(a)) . これは加熱によりゴム状態の部分が徐々に増加するためである. その後, 圧縮空気を注入すると収縮した (図4(b)) . すなわち, SMP をゴム状態にすることにより動作可能となった. さらに, その状態で, T_g 以下に冷却後, 内圧を低下させても, 試作品の長さは変化しなかった (図4(c)) . すなわち, ガラス状態の SMP によって荷重負荷可能だった. さらに, 異なる内圧で異なる長さに固定しても, 排気後 1h, 大きな変形は見られなかった.

受動変形特性を図5に示す. SMP を塗布することによって, 変形抵抗が大きくなった. さらに非線形性が強くなった. また, ゴム状態からガラス状態にすると, 変形抵抗が大きくなった. 本研究では, 塗布した SMP は厚く, 繊維スリーブの網目の中を埋めており, 試作品の変形を阻害したので, 今後, SMP の塗布方法の検討が必要である. 一方, 変形抵抗の非線形性の一因として, SMP 自体の材料特性の非線形性が挙げられる. さらに, 網目内に閉じ込められた SMP は, せん断, 引張の混じった多軸の複雑な変形状態にあるので, 非線形性が増したと考えられる.

本研究のように, SMP を姿勢維持の用途に応用する場合, 例えば, 姿勢維持できる荷重を増やそうと, アームに取り付ける SMP を増やすと, その分, 動作状態でアームに働く

抵抗が大きくなってしまふ. また, 姿勢維持は大きな力を負荷可能だが, 動作状態では, 別付けのアクチュエータで荷重を動かすので, 大きな力を出すことができない. そのため, 今後, 使用する用途をさらに具体的に検討を進めていきたい.

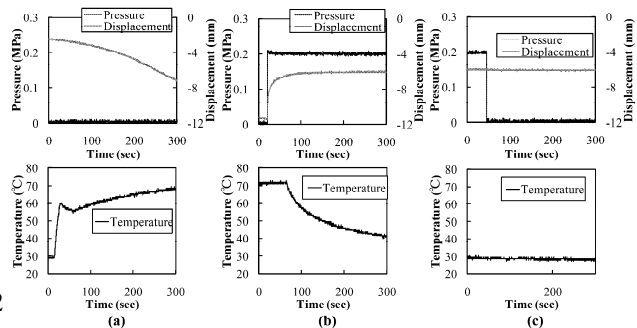


Fig. 4 Motion of the prototype actuator when the internal pressure was changed with heating and cooling under a constant load (62 N). (a) $T < T_g \rightarrow T > T_g, P = P_L$, (b) $T > T_g, P = P_L \rightarrow P_H$, (c) $T < T_g, P = P_H \rightarrow P_L$

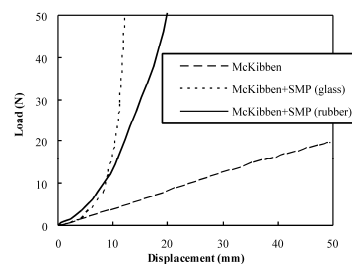


Fig. 5 Passive tension-length relationship of the prototype under a constant pressure (0 MPa).

4. 結 語

本研究では, SMP を用いた姿勢維持モジュールおよび McKibben 型アクチュエータを試作し, その基本特性について検討した. 試作品を用いた評価実験により, 本コンセプトの有効性を示した.

文 献

- (1) Irie, M., Development of Shape-memory Polymers, (2000), CMC Publishing.
- (2) Tobushi, H., Tanaka, K., Horikawa, H., and Matsumoto, M., Shape Memory Materials and their Applications, (2004), Corona Publishing.
- (3) Behl, M. and Lendlein, A., Shape-memory Polymers, *Materials Today*, Vol. 10, No. 4 (2007), pp. 20-28.
- (4) Noritsugu, T., Takaiwa, M. and Sasaki, D., Pneumatic Rubber Artificial Muscles and Application to Welfare Robotics, in: Higuchi, T., Suzumori, K. and Tadokoro, S. (Eds.), Next-generation Actuators Leading Breakthroughs, Springer, New York, (2009), pp. 255-266.
- (5) <http://www.shadowrobot.com/airmuscles/>