

形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用した 触覚センサに関する研究

○帆足 悠人 (九州工業大学), 高嶋 一登 (九州工業大学, 理化学研究所),
神園 大樹 (九州工業大学), 向井 利春 (理化学研究所)

Study on Tactile Sensor Utilizing Stiffness Change of Shape-Memory Polymer According to Temperature

○Yuto HOASHI (KIT), Kazuto TAKASHIMA (KIT, RIKEN),
Hiroki KAMIZONO (KIT), and Toshiharu MUKAI (RIKEN)

Abstract: In this study, we propose a tactile sensor using shape-memory polymer (SMP) whose stiffness varies according to the temperature. The relationship between the applied force and the deformation of the SMP changes depending on the temperature. Therefore, the spatial resolution and the stiffness of the sensor using the SMP can be changed. In this study, we investigated the characteristic of the prototype sensor.

1. 緒言

ロボットは近年, 介護・福祉などの分野に適用され, 従来のように工場のみで使用される場合に比べて幅広い環境で使用されるようになり, さまざまな外界情報の測定や柔軟性が必要になってきた. 我々はこれまで形状記憶ポリマー (SMP) の温度による剛性変化を利用した姿勢維持モジュールやアクチュエータをいくつか開発してきた[1-4]. ここで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率が大きく変化し, 約100~1000分の1になる. 本研究ではこれまでの知見を活かし, SMPをロボットの触覚センサへ応用するために, 試作品を用いて, T_g 以上と以下での特性の違いを評価した.

2. SMPを用いた触覚センサの基本仕様

ロボットの触覚センサには柔軟で弾力があり, 変形性にも富む性質が求められる一方, 空間的分解能を低下させないように注意する必要がある[5]. そこで本研究では, 触覚センサの表面をSMPで構成した. Fig.1に示すように, SMPは温度によって剛性が変化するので, 同じ力を加えても温度に応じて応力の分布が異なる. さらにSMPを触覚センサへ応用することで以下のような利点がある.

- (1) 医療・福祉分野以外の産業用ロボットにおいても多品種少量生産となり, さまざまな環境でさまざまな仕様で動作する必要があり, そのような場合にも対応できる.
- (2) ロボットが移動する際, 剛性を低くすることによって, 予期しない物体に衝突した場合の衝撃が小さくなる.

- (3) 人間と違って, カメやダンゴムシなど危険を察知して特徴的な形態になる生物は多い. 同様に外界の危険を察知して, 表面の剛性を変え, 自分を保護するロボットを構成することができる.
- (4) 生物の皮膚は柔軟性を活かしてエッジ形状など対象物に倣う. SMPを利用することにより, その倣った状態で表面を硬くしたりすることもできる.

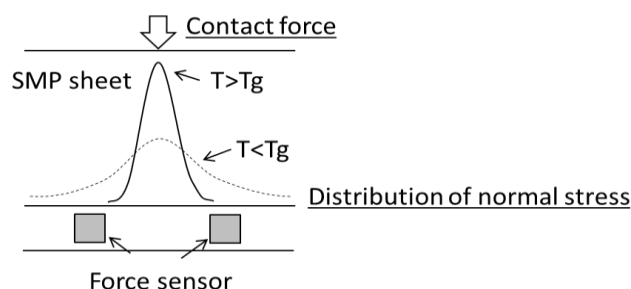


Fig.1 Distribution of normal stress

3. 実験方法

3.1 電熱線埋め込み型シート

Fig.2 が実験に用いた触覚センサの一部である SMP シート (厚さ: 1 mm) の試作品である. 本研究では, SMP テクノロジーズの SMP (MP 4510, $T_g=45^\circ\text{C}$, 曲げ弾性率:1350MPa ($T < T_g$), 4.5MPa ($T > T_g$)) を使用した. A 剤 B 剤の二液を混合して, 70°C で 2 時間加熱することで硬化し, その形状を記憶させた. その後, 厚さ 0.5 mm の SMP シートを 2 枚作製するため, 加熱プレス (190°C , 10MPa, 10 分以上) し形状を再記憶させた. さらに, 温度を制御するために 2 枚のシートの間に電

熱線（Φ0.26 mm，電気固有抵抗：108±6×10⁶Ω cm，ヤング率：214GPa）を挟んだ。そして加熱プレス（150℃，20分）し，2枚のSMPを接着させ，SMP自体にその形状を再記憶させた。

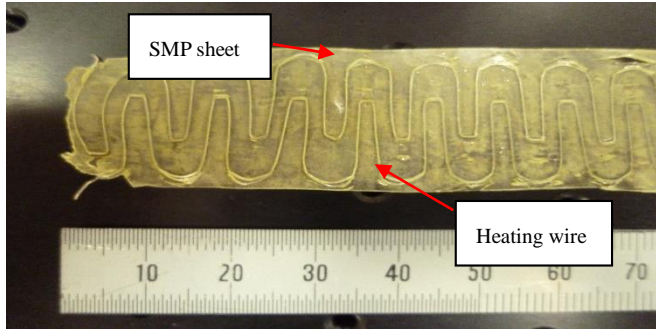
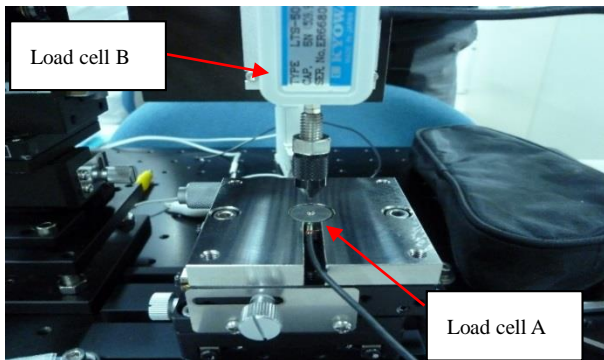


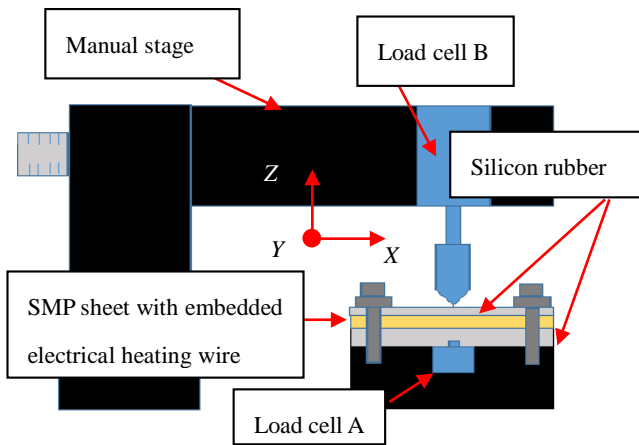
Fig. 2 Prototype of SMP sheet

3.2 実験装置および実験方法

Fig.3 に実験装置を示す。実験ではロードセル A（共和電業，LMA-A-10N-P）の上に断熱を目的としてシリコンゴム（2 mm）を被せた。その上に 3.1 で作製した SMP シート，さらに上からシリコンゴム（0.5 mm）を乗せた。これらはシートの両側からプレートで押さえて固定した。この部分が今回試作した SMP を用いた触覚センサに相当する。また，ロードセル A はφ12



(a) Photograph



(b) Schematics

Fig.3 Experimental apparatus to evaluate tactile sensor

mm の円筒の上部に突起（φ1.8 mm，SR2 mm）がついている。本実験では 常温（<T_g）と高温（>T_g）に分けロードセル B（共和電業，LTS-500GA）につけた圧子で一定の力で押し，試作した触覚センサの空間分解能や柔軟性を評価した。両ロードセルは手動ステージに取り付け，加圧場所や加圧力を変化させた。また，電熱線をスライダックに接続し，電圧を調整して温度を制御した。

4. 結果および考察

4.1 柔軟性

Fig.4 はロードセル B によって加えた力とそのときの SMP シートとシリコンゴムの変形量の関係を表した図である。この図より同じ力を加えても T>T_g では変形量が大きく T<T_g では小さく柔軟性が異なることが分かる。また，変形量の差が T<T_g と T>T_g の間で大きくなり始める 0.64N の力を以降の実験で用いた。

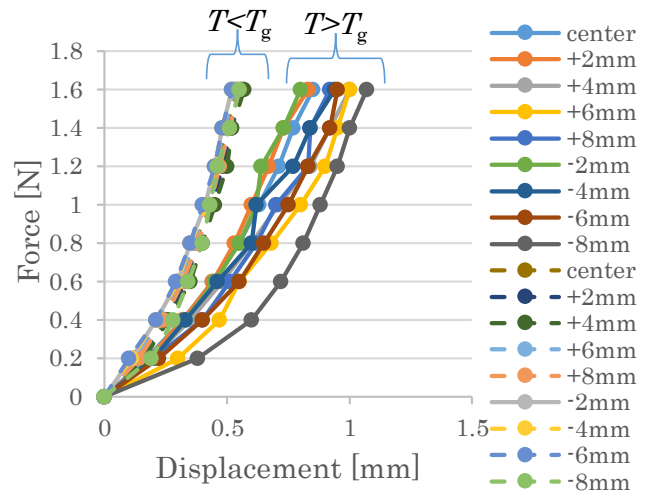


Fig.4 Relationship between applied force and displacement

4.2 空間分解能

Fig.5, Fig.6 はそれぞれ T<T_g, T>T_g において 1 mm ずつロードセル B による加圧位置を変化させて，ロードセル A により検出された力と送った距離との関係を表した図である。Fig.5 より常温では力の変化はほぼ無いことが分かる。また Fig.6 より中心から端へ向け力が小さくなっていく様子がわかる。下条らは，触覚センサ表面の縦弾性係数が大きくなると空間分解能が劣化することを示したが[5]，本実験でも同じ傾向を示した。しかし，中心から離れるにつれ同心円上の広がり方をしていないことも分かる。この原因として接触センサを固定するときのシート上部のゴムのたわみと電熱線の埋め込み時の異方性が考えられる。

また，応力分布関数 $g(r)$ の式は以下で表せる[5]。

$$g(r) = \frac{3F}{2\pi} \frac{h^3}{(r^2 + h^2)^{5/2}} \quad (1)$$

ここで F は接触力， h はカバー表面からの深さ， r は半径方向の距離である。ただし，弾性体カバーとセンサの材質が等しく半無限弾性体に接触力 F が加わる場合のみ式(1)は適用できる。Fig.7 は T<T_g, T>T_g においてロ

ロードセル A の中心から 1 mm ずつ X 方向にロードセル B を送り、ロードセル A によって検出された力とロードセル A の中心部からの距離との関係を表すと同時に式(1)の理論値との比較をした図である。力の変化の大きさが理論値に比べると緩やかだが同じ傾向を示していることが分かる。

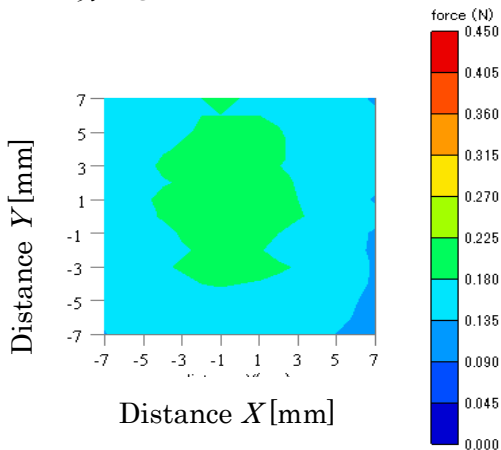


Fig.5 Relationship between applied force and distance ($T < T_g$)

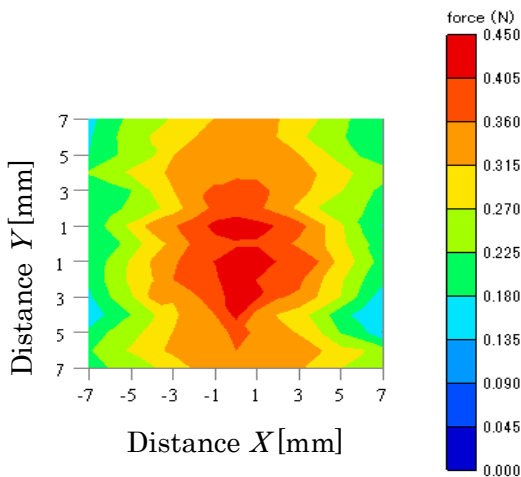


Fig. 6 Relationship between applied force and distance ($T > T_g$)

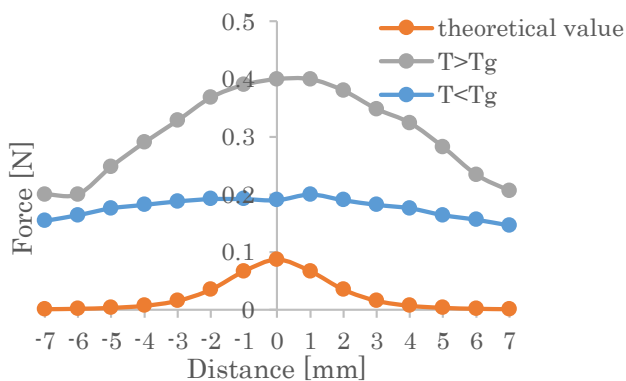


Fig. 7 Relationship between applied force and distance

5. 結言

本研究では、ロードセルの上に SMP を乗せ、表面に力を与えたときの応力分布を測る触覚センサの検証を行った。この触覚センサを用いることで T_g 以上と以下での特性の違いを評価した。 $T > T_g$ と $T < T_g$ でセンサの空間分解能と柔軟性を変更できることを確認できた。

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 (2010), pp.905-912.
- [2] K. Takashima, J. Rossiter, T. Mukai, McKibben artificial muscle using shape-memory polymer, *Sensors & Actuators: A. Physical* vol. 164 (2010) pp. 116-124.
- [3] K. Takashima, T. Noritsugu, J. Rossiter, S. Guo, T. Mukai, Curved type pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.24 no.3 (2012) pp.472-479.
- [4] 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).
- [5] 下条 誠, “触覚センサにおける弾性体カバーの空間周波数フィルタリング効果”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.59, no.567 (1993), pp.3458-3463.