

PME膜ジャミンググリッパを用いた変形開始点検出による 繊細な物体把持

○榎本朋（東京大学） 石毛真修（東京大学） 梅舘拓也（信州大学）
亀崎 允啓（東京大学） 川原圭博（東京大学）

ジャミンググリッパは簡単な制御で様々な形状の物体を把持できる。しかし、押付の過程で必要以上の力を加えると把持対象を破壊してしまうため壊れやすい物体を扱うことが難しい。そこで、対象の変形を検出することで必要以上の押付を避けることが重要である。本研究では、ジャミンググリッパの膜を永久磁石エラストマ (PME) で作製し、磁場の変化を監視することで対象の変形開始点を検出する手法を提案し、ロールケーキやポテトチップスといった壊れやすい物体を破壊せずに把持できることを示した。

1. はじめに

様々な形状の物体を傷付けずに扱えるグリッパの需要は食品業界などで高まっており、高コンプライアンスのソフトグリッパはこの目的のために有用である。特にジャミンググリッパ [1] は、簡単な制御で様々な形状の物体を把持できるため注目されている。しかし、ジャミンググリッパが対象を確実に把持するにはグリッパを対象に十分に押付する必要がある、これは壊れやすい把持対象の損傷に繋がる。そこで、把持が成功し、かつ対象物を傷付けない適度な押付で把持する必要がある。

適度な押付の実現には、押付過程におけるフェーズの遷移を検出することが重要である。粒子の充填率が低いジャミンググリッパ [2] は弱い押付力で物体を把持できるため繊細な把持に有用である。このジャミンググリッパは押付の過程で剛性が大きく変化する。初めは空気層が圧縮されるため剛性が低いが、空気層が潰れてジャミング粒子が圧縮されると剛性が上昇する。この特性により、押付の際にグリッパが主に変形するフェーズから把持対象が主に変形するフェーズへの遷移が起こる。このフェーズ遷移が起こった瞬間を特定することで、把持対象の変形開始点の検出が実現できる。

本稿では、ジャミンググリッパで押付過程でのフェーズ遷移を検出するための永久磁石エラストマ (PME) 膜を用いた手法を提案する。PME 膜が生成する磁場を磁気センサが監視することで、膜の変形がセンシングされる。磁場データの変曲点からフェーズが遷移した瞬間を特定することで、対象の変形開始点検出が実現できることを示した。これにより、ロールケーキなどの繊細な対象を傷付けずに把持することができる (図 1)。

2. 関連研究

ジャミンググリッパが繊細な把持を実現するには、(1) 小さい押付で対象を把持できるグリッパを設計すること、(2) 触覚センシングを通じて把持対象の変形を検出することで適度な押付を実現すること、が重要である。そこで、これらのこれまでの試みを纏める。

2.1 弱い押付で物体を把持するジャミンググリッパ

発泡スチロール (EPS) ビーズの利用は脱気時の体積収縮により把持力の増強に繋がる [3]。これにより、小さい押付で物体を把持するジャミンググリッパが実現

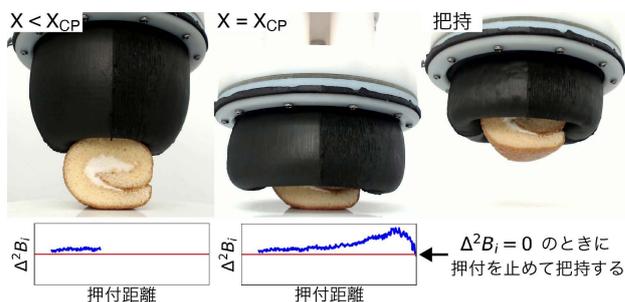


図 1: PME 膜ジャミンググリッパがロールケーキを把持している様子。対象の変形が始まる押付距離 X_{CP} を磁場を介して検出することで、ロールケーキを傷付けずに把持できている。

されている。また、粒子の充填率を下げることは押付力を小さくすることに繋がることが知られている [2]。膜内部の空間を多層化することも有効である [4]。

2.2 ジャミンググリッパにおける触覚センシング

触覚センサは、膜の自由度の高い変形を阻害せず、膜内部の設計や粒子選択の自由度を損なわない必要がある。また、膜全体をセンシング領域とできることも、把持位置によらないセンシングに繋がるため望ましい。しかし、これらの要件を満たす手法には課題があった。多くの触覚センサは膜の変形に耐えられない。光学式的手法 [5] は内部設計や粒子選択を制限してしまう。柔軟な圧力センサを用いる手法 [6] は、広いセンシング領域の実現にはセンサを密に並べる必要がある。これは把持力の低下や作製の手間、断線のリスクに繋がる。

そこで本稿では PME [7] を用いた手法を提案する。PME は柔軟であり、広い面積をカバーできる。また、磁場は光とは異なり不透明な構造を透過するため、グリッパ内部の設計や粒子選択の幅を狭めない。

3. 把持対象の変形開始点検出

3.1 概要

ジャミンググリッパの膜を PME を用いて作製し、グリッパ底部に磁気センサを配置する (図 2A)。PME 膜が生成する磁場を磁気センサが測定する。PME 膜の変形により引き起こされる磁場の変化を監視することで、把持対象の変形開始点検出が実現できる。

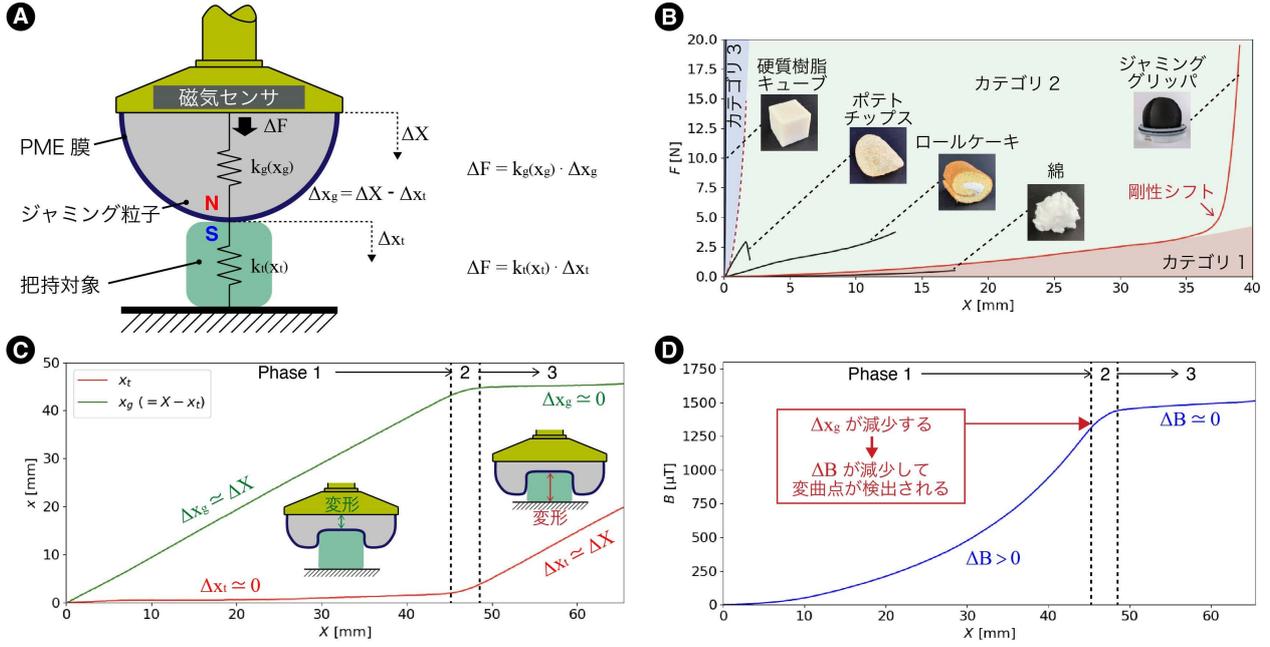


図 2: (A) PME 膜ジャミンググリッパの概要と、バネによる変形のモデル化。(B) グリッパと様々な物体の剛性を示したグラフ。グリッパの剛性シフトにより、把持対象は 3 つのカテゴリに分類される。(C) グリッパが把持対象を押付した際のグリッパと対象の変形を示したグラフ。以下のフェーズ遷移が起こる：グリッパが主に変形するフェーズ → 遷移フェーズ → 対象が主に変形するフェーズ。(D) (C) において磁気センサが測定する磁場を示したグラフ。遷移フェーズにおいて ΔB が大きく減少し、グラフの傾きが変化する。この変化を検出することで、遷移フェーズ、つまり対象の変形開始点を検出できる。((C), (D) のグラフは 5.1 節の T2 を押付した際の実データである。)

3.2 グリッパと把持対象の変形モデル

グリッパと対象の変形を理解するためにバネモデル (図 2A) を採用した。粘性は押付速度が小さい (1 mm/s) ため無視した。グリッパと対象のバネ定数をそれぞれ k_g, k_t 、変形量をそれぞれ x_g, x_t と置く。ここで、 k_g, k_t はそれぞれ x_g, x_t の値で決まる非線形バネである。 X はグリッパの押付距離を表し、 ΔX の押付を行った際に、 ΔF の力が加わるとする。次式、

$$\Delta X = \Delta x_g + \Delta x_t \quad (1)$$

を仮定する。このとき、次式、

$$\frac{\Delta x_t}{\Delta x_g} = \frac{k_g(x_g)}{k_t(x_t)} \quad (2)$$

が成立し、グリッパの変形は次の 3 つのフェーズに分けられる。

$$\begin{cases} \Delta x_g \approx \Delta X, & \text{if } k_g(x_g) \ll k_t(x_t) \quad \dots \text{Phase 1} \\ \Delta x_g \approx \Delta x_t, & \text{if } k_g(x_g) \approx k_t(x_t) \quad \dots \text{Phase 2} \\ \Delta x_g \approx 0, & \text{if } k_g(x_g) \gg k_t(x_t) \quad \dots \text{Phase 3} \end{cases} \quad (3)$$

部分的に充填されたジャミンググリッパの剛性は、特定の押付距離に達すると顕著に変化する (図 2B)。この特性を剛性シフトと呼ぶ。この特性から、把持対象は次の 3 つに分類できる。カテゴリ 1) 自身の剛性が、剛性シフト前のジャミンググリッパの剛性より小さい。カテゴリ 2) 自身の剛性が、剛性シフト前のジャミンググリッパの剛性より大きい、剛性シフト後のジャミンググリッパの剛性より小さい。カテゴリ 3) 自身の剛性が、剛性シフト後のジャミンググリッパの剛性より大きい。本研究では、カテゴリ 2 に分類される物体を主な把持対象とし、これにはロールケーキやポテト

チップスなどの壊れやすい物体が含まれる。理由は以下である。まず、カテゴリ 1 の物体は柔らかすぎるため変形させずに把持することは難しい。また、カテゴリ 3 の物体は十分な剛性があり、多少乱雑に押付をしても傷つくリスクが低い。

押付過程では次のフェーズ変化が起こる：Phase 1 → Phase 2 → Phase 3。このときのグリッパと対象物の変形量を図 2C に示す。Phase 1 では、対象物の変形は $\Delta x_t \approx 0$ で表せる。しかし、一定の押付距離を超えると $\Delta x_t \approx \Delta X$ となる (Phase 3)。この遷移の段階が Phase 2 である。Phase 3 では ΔX の大部分が Δx_t に寄与するため、把持対象に大きな変形が加わり傷つくリスクが高い。したがって、Phase 3 の前、つまり、Phase 2 までに押付を止めることが重要である。

3.3 磁場を介した変形開始点検出

図 2D は、磁気センサが測定する磁場の変化を示している。Phase 2 では Δx_g が減少する。 x_g は PME 膜と磁気センサの距離を決定し、磁場の強さに影響を与えるため、このフェーズでは ΔB も減少する。ここで、 ΔB は磁場の変化率である。よって、Phase 2 の検出は ΔB の急激な変化点 (CP) の検出により実現できる。

磁力はソースからの距離に対して線形以上に増加するため、図 2D は Phase 1 において凸関数となる (少なくとも、本研究における実験のすべてのケースにおいてはそうであった)。よって、本稿では CP を変曲点として定義した。グリッパは等速移動をするため ΔX は定数であり、CP は次式から検出される。

$$X_{CP} = X | \Delta^2 B_i = 0 \quad (4)$$

ここで、 X_{CP} は CP の押付距離、 i はデータのインデックスである。 ΔB_i と $\Delta^2 B_i$ は、次式のように移動平均



図 3: (A) グリッパの構成と, (B) 実際に作成したグリッパ, (C) 磁気センサは 4×4 のアレイ状に 10 mm の間隔で配置されている.

(窓サイズはそれぞれ w_1 と w_2) を用いて計算される.

$$\Delta B_i = \frac{B_i - B_{i-w_1}}{w_1} \quad (5)$$

$$\Delta^2 B_i = \frac{\Delta B_i - \Delta B_{i-w_2}}{w_2} \quad (6)$$

本稿では, w_1 と w_2 の両方を 15 とし, サンプリング周期を 0.176 s とした. 窓サイズとサンプリング周期を大きくとると, ノイズが軽減される一方で遅延が大きくなる. このトレードオフを考慮し, 正確かつ低遅延の CP 検出を実現するために, これらの値を選んだ.

4. 作製したグリッパ

図 3A にグリッパの構成を, 図 3B に実際に作製したプロトタイプを示す. PME 膜は, 強度と柔軟性を確保するために, 厚さ 1.5 mm, 硬度 00-10 (ショア硬度) とした. また, 膜のサイズは磁化の際にコイルに収まる条件下でできるだけ大きくするため, 直径 37.5 mm, 高さ 56.25 mm とした. 磁気センサは, ホール素子 (MLX90393; Melexis) を用いた. 4×4 のアレイ状に 10 mm の間隔で配置し (図 3C), これらは z 軸方向の磁場を測定する. 一つのバスに最大 16 個の素子を組み込めるため, 16 個の素子を使用した. 測定値は, Arduino に I2C 通信で送信される. ジャミング粒子は, EPS ビーズを 50% の充填率で用いた. EPS ビーズを低い充填率で利用することは, 弱い押付で把持を行うジャミンググリッパに適しているためである [2].

5. 実験

5.1 対象の変形開始点検出

5.1.1 データ収集

図 4A に実験の様子を示す. ジャミンググリッパはロボットアーム (UR3; Universal robots) の先端に取り付けられている. 土台下部のロードセル (FNZ; Forsentek) は対象物に加わる力を測定する. グリッパは対象物を 1 mm/s の速度で押付し, グリッパの損傷を避けるために 7.5 N の力が加わった時点で停止する. ホール素子の測定値は, Arduino を介してローカル PC によってサンプリングされる. CP 検出には, 全てのホール素子の中で磁場の変化が最も大きいホール素子の測定値を採用した. これは, 磁場変化が最も顕著な領域は膜が最も大きく変形している領域であり, 下部に対象物が存在する可能性が高いためである. 対象の上部からは赤いマーカの付いた糸が吊るされている. 糸の視認性を高めるために図 4A では青色の点線として強調しているが, 実際は対象物の内部を通過している. Web

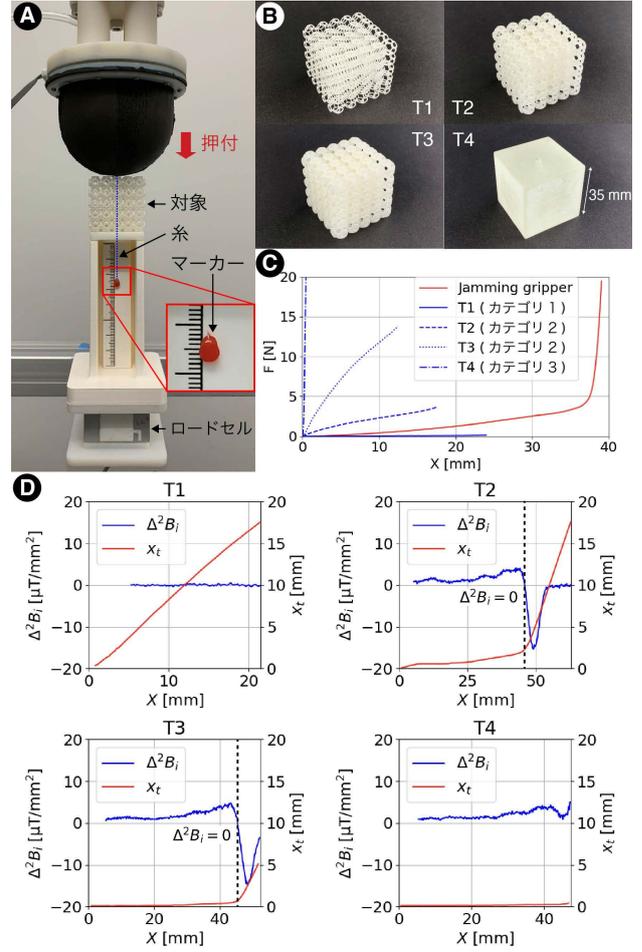


図 4: (A) 実験の様子. PME 膜ジャミンググリッパが垂直方向に対象を押付し, そのときの磁場と対象物の変形量 (マーカの降下量) が記録される. (B) 3D プリントで作成した対象と, (C) これらの剛性を設計した. (D) 対象物の変形量と $\Delta^2 B_i$ を示したグラフ. T2 と T3 については, $\Delta^2 B_i = 0$ が検出されたタイミングで対象物の変形が始まっている.

カメラ (C920; logicool) を用いてマーカの降下量を計測することで, 対象物の変形を測定した.

対象物は, 3D プリント (Agilista, AR-S1) した 4 つの 35 mm の立方体である (図 4B). 各オブジェクトの剛性を図 4C に示す.

5.1.2 結果・考察

結果を図 4D に示す. x_t と $\Delta^2 B_i$ は, 対象物が元の半分 (17.5 mm) の高さに潰れる, または 7.5 N の力が加わるまでプロットした. T1 は初めから $\Delta x_t \approx \Delta X$ を示すが, T4 は最後まで $\Delta x_t \approx 0$ を示している. これは, 3.2 節で示したカテゴリの特性と一致する. 一方, カテゴリ 2 (T2, T3) に分類される対象物は, $\Delta x_t \approx 0$ から $\Delta x_t \approx \Delta X$ への顕著な変化を示す. CP はこの変化と一致している. この結果は, $\Delta^2 B_i = 0$ を用いて対象物の変形開始点検出が実現できることを示している.

5.2 身近な物体の変形検出

本手法をロールケーキ, ポテトチップスといった身近な物体にも応用した.

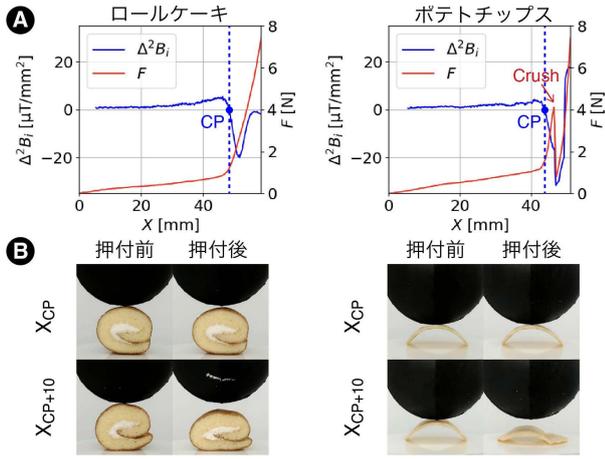


図 5: (A) 対象物に印加されている力と $\Delta^2 B_i$ を示したグラフ。両方の対象物において、大きな力が印加され始める瞬間に CP が検出されている。(B) X_{CP} , X_{CP+10} まで対象物を押付した前後の外観の変化。 X_{CP} のケースではどちらの対象物も殆ど変形が起っていないが、 X_{CP+10} のケースではどちらの対象物も不可逆な変形を起こしている。

5.2.1 データ収集

5.1 節と同じセットアップで実験を行った。ただ、本実験では糸を用いて対象物の変形を測定する代わりに、ロードセルを用いて対象に加わる力を測定した。これらの物体に糸を通して変形を測定することが困難であったためである。

5.2.2 結果・考察

図 5A に結果を示す。いずれの場合も、対象物に大きな力が加わり始める瞬間に CP が検出されている。さらに、CP を超えて押付を続けた場合、ポテトチップスは割れてしまった。これらの結果から、対象物に大きな力が加わりそうであることを検出するために本手法は有用であると言える。

図 5B は、 X_{CP} または X_{CP+10} まで押付後の対象物の外観を示している。ここで、 X_{CP+10} は $X_{CP}+10$ mm を意味する。 X_{CP} まで押付されたものはほとんど変形を示していないのに対し、 X_{CP+10} まで押付されたものは不可逆的な変形を示している。ポテトチップスは割れ、ロールケーキは潰れてクリームがこぼれグリッパに付着している。このことは、CP において、これらの物体を傷付けずに把持できることを示唆している。

5.3 CP 付近における把持テスト

ロールケーキとポテトチップスに対して、 X_{CP-10} から X_{CP+10} まで 5 mm 刻みの押付距離において把持テストを行った。それぞれ 5 回把持テストを行い、その内の把持が成功した数と把持対象に損傷を与えなかった数を数えた。結果が表 1 である。把持の成功は、把持対象が地面から離れた後 10 秒以上把持を継続できたかで判定した。損傷は、ポテトチップスは割れたこと、ロールケーキはクリームがグリッパに付着したことで判定した。

X_{CP} において、どちらのケースも 80% 以上の割合で把持が成功しており、把持対象に損傷は与えていない。一方で、 X_{CP} を超えると把持対象に損傷を与えてしまい、 X_{CP} に満たないとロールケーキの把持が失敗して

表 1: CP 付近における把持の成功数

	ロールケーキ		ポテトチップス	
	把持成功	損傷なし	把持成功	損傷なし
X_{CP-10}	0	5	5	5
X_{CP-5}	0	5	5	5
X_{CP}	4	5	5	5
X_{CP+5}	5	2	5	1
X_{CP+10}	4	0	-	-

いる。 X_{CP-10} においてポテトチップスの把持が成功したのは、ポテトチップスが軽量であったため比較的少ない把持力でも把持できたためだと考えられる。この結果は、 X_{CP} は対象物を傷付けずに把持を成功させるために適した押付距離であることを示している。

6. おわりに

ジャミンググリッパで繊細な把持を実現するための PME 膜を用いた手法を提案した。ジャミンググリッパは、押付距離が小さいと十分な把握力が得られず、押付距離が大きいと把持対象にダメージを与えてしまう。したがって、把持対象物の変形を検出し、把持が成功するがダメージを与えない適切な押付距離で把持することが重要である。本研究では、ジャミンググリッパの膜を PME で作成し、磁場を介して押付過程におけるフェーズ遷移を検出することで、把持対象の変形開始点を検出できることを示した。これにより、ロールケーキやポテトチップスなどの物体を傷付けずに把持することが実現できた。

今後は、複数の磁気センサの測定値を用いて、把持対象のどの箇所が変形をしているかを検知する。また、センシング能力や把持力を向上するために、グリッパの設計や磁気センサの配置を探索する。

謝辞 PME の作成にご協力いただいた日本ペイントホールディングス株式会社の方々に感謝します。

参考文献

- [1] S. G. Fitzgerald, G. W. Delaney, and D. Howard: "A review of jamming actuation in soft robotics," *Actuators*, vol. 9, no. 4, p. 104, 2020.
- [2] P. Kremer, H. R. Nohooji, J. L. Sanchez-Lopez, and H. Voos: "Trigger: A lightweight universal jamming gripper for aerial grasping," *IEEE Access*, 2023.
- [3] H. Götz, A. Santarossa, A. Sack, T. Pöschel, and P. Müller: "Soft particles reinforce robotic grippers: robotic grippers based on granular jamming of soft particles," *Granular Matter*, vol. 24, pp. 1–9, 2022.
- [4] M. Fujita, K. Tadakuma, H. Komatsu, E. Takane, A. Nomura, T. Ichimura, M. Konyo, and S. Tadokoro: "Jamming layered membrane gripper mechanism for grasping differently shaped-objects without excessive pushing force for search and rescue missions," *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 11, pp. 590–604, 2018.
- [5] S. Li, L. Ye, H. Yu, X. Yin, C. Xia, W. Ding, X. Wang, and B. Liang: "Jamtac: A tactile jamming gripper for searching and grasping in low-visibility environments," *Soft Robotics*, 2023.
- [6] L. Y. W. Loh, U. Gupta, Y. Wang, C. C. Foo, J. Zhu, and W. F. Lu: "3d printed metamaterial capacitive sensing array for universal jamming gripper and human joint wearables," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 5, p. 2001082, 2021.
- [7] S. Shembekar, M. Kamezaki, P. Zhang, Z. He, Y. Iwamoto, Y. Ido, H. Sakamoto, and S. Sugano: "Development of a permanent magnet elastomer (pme) infused soft robot skin for tactile sensing," *IROS*, pp. 6039–6046, 2021.