

袋内の MR 流体に磁束を伝播する磁性ピンアレイグリッパ機構 — 磁束伝播性能・剛性可変性・物体把持性能の評価 —

Magnetic Pin-Array Gripper Mechanism that Propagates Magnetic Flux to MR Fluid in Pouches
- Evaluation of Magnetic Flux Propagation, Stiffness Variability, and Object Grasping -

○ 釘持 優人¹ 金田 侑² 西谷 誠治²
戸島 亮² 正 高根 英里¹ 正 渡辺 将広¹
正 多田隈 建二郎¹ 正 昆陽 雅司¹ 正 田所 諭¹
(¹東北大学) (²パナソニック株式会社)

Yuto KEMMOTSU¹, kemmotsu.yuto@rm.is.tohoku.ac.jp
Yu KANEDA², Seiji NISHITANI², Ryo TOSHIMA²,
Eri TAKANE¹, Masahiro WATANABE¹,
Kenjiro TADAKUMA¹, Masashi KONYO¹, Satoshi TADOKORO¹
(¹Tohoku University) (²Panasonic Corporation)

Grippers with soft structures can be adapted to the object shapes, making it possible to handle various items without complicated control. They can change their apparent stiffness, for example, by using MR fluids or pin-array structures. However, MR fluid grippers have difficulty propagating magnetic flux to MR fluids. Pin-array grippers also have a problem that they need many pins to transfer object shapes. This paper proposes a magnetic pin-array gripper mechanism that combines MR fluid and pin-array structure. Each pin-unit has a flexible pouch filled with MR fluid, and a magnet can be inserted into the pipe inside the pouch. We conducted some experiments on magnetic flux density, pouch hardness, and object grasping. The results showed that the proposed mechanism can change the stiffness by effectively propagating magnetic flux to the pouches' MR fluid. We also confirmed that it could grasp objects by its shape adaptability and stiffness variability.

Key Words: Gripper, Mechanism, MR fluid, Pin-array

1. 緒言

複雑な制御を用いることなく不定形な物体を把持することを目的に、柔軟構造を有するグリッパ機構に関して様々な研究が行われている。その多くは、柔軟構造部を対象物に押し当てて形状を転写した後、接触部分の剛性を高めることによって対象物を保持する。サイズ・形状の異なる物体だけでなく、生体などの軟弱・脆弱な対象物にも対応可能である点がメリットである。

これらのグリッパは、形状の転写・剛性の切り替えの方法からいくつかの種類に分けられる。これまでに提案された主な方式として、i)袋状構造の内部に粉体を封入してジャミング転移現象を利用するもの[1]-[3]や、ii)袋内に MR 流体を封入して磁場印加により硬化させるもの[4]-[6]、iii)直動する多数のピンを並列に配置するピンアレイ構造を用いたもの[7]-[10]がある。i)の粉体ジャミング方式は、粉体の流動性が乏しいため形状転写時の押付力が大きくなるのに対し、ii)、iii)の方式は押付力を比較的小さく抑えることが可能である。しかし、ii)の MR 流体方式は流体封入部全域に磁束を伝播することが困難であり、物体との接触面付近で十分に剛性を高めることができない。また、iii)のピンアレイ方式は、形状転写の分解能を高めるためにピンを密に配置する必要があり、ピン本数の増加によって機構が複雑化する。

そこで本研究では、低い押付力で優れた形状適応と、対象物との接触面付近における剛性の大幅な変化が可能な磁性ピンアレイグリッパ機構の考案・具現化を目的とする。本報では、考案機構を構成する各ユニットの基礎特性の評価実験と、考案機構の物体把持性能の確認を行ったのでここに報告する。

2. 磁性ピンアレイグリッパ機構の原理

2.1 基本構成

磁性ピンアレイグリッパ機構の基本構成を Fig.1 に示す。本機構においてピンアレイ構造を構成する各ユニットは、先端に袋状構造を搭載した中空のパイプからなる。パイプ内部の

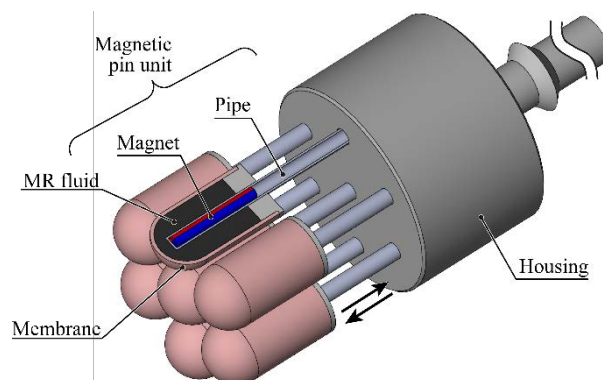


Fig. 1 Basic configuration concept of the magnetic pin-array gripper mechanism

空間では円柱型の永久磁石が自由に直動できるようになっており、パイプ先端の袋部分には MR 流体が封入されている。パイプの先端まで磁石を挿入することにより、袋内に磁界を供給し、MR 流体を高粘度化することが可能である。

2.2 動作の仕組み

磁性ピンアレイグリッパ機構の把持動作を Fig.2 に示す。初期状態ではパイプの根元部分に磁石を収納する (Fig.2(a))。この状態では袋内の MR 流体に磁界が供給されないため、袋部分の剛性は低くなっている。この状態で対象物に押し当てると、対象物に接触したユニットが直動すると同時に袋部分が柔軟に変形するため、優れた形状適応性が実現できる。

対象物を保持する際には、パイプ先端に磁石を挿入して袋内の MR 流体を高粘度化し、袋部分が対象物形状になじんだ状態を維持する (Fig.2(b))。袋の先端付近までパイプが通っているため、MR 流体の近傍に磁石を挿入することが可能である。これにより対象物との接触面付近においても MR 流体の粘度を高めることができ、高い物体保持力を実現できる。

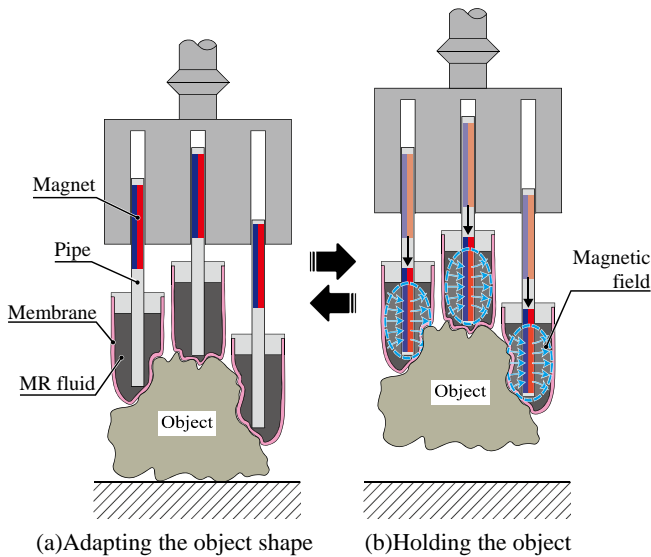


Fig. 2 Operating principle of magnetic pin-array gripper

3. 実機の具現化

3.1 磁石の着磁方向の検討

本機構では円柱型の永久磁石を使用するが、この着磁方向には主に軸方向と径方向の2種類が存在する。そこで、どちらの着磁方向がより広範囲に磁束を伝播できるかを調べるため、磁石をパイプ内に挿入した際に吸着するMR流体の体積を測定し、比較した。

実験の様子を Fig. 3 に示す。磁石は寸法が同じ（直径 3 mm × 長さ 20 mm）で着磁方向のみが異なるネオジウム磁石を用いた。また、パイプは SUS304 製で肉厚が 0.3 mm のものを、MR 流体は LORD 社製 MRF-132DG を使用した。MR 流体に浸した肉厚 0.3 mm のパイプ内に磁石を挿入し、パイプを持ち上げた際に吸着した MR 流体の重量を測定した。事前に測定した MR 流体の密度を用いて体積に換算し、5 回の測定の平均値を比較した。

MR 流体吸着量の測定結果を Fig. 4 に示す。径方向着磁の場合の吸着量が軸方向の場合の約 1.5 倍という結果となった。このことから、材質・寸法が同一の磁石について比較した場合、径方向着磁の方がより広範囲の MR 流体に磁束を伝播できることが示唆された。従って、磁性ピンアレイグリッパー機構においても径方向着磁の磁石を用いることが有効であると考えられる。

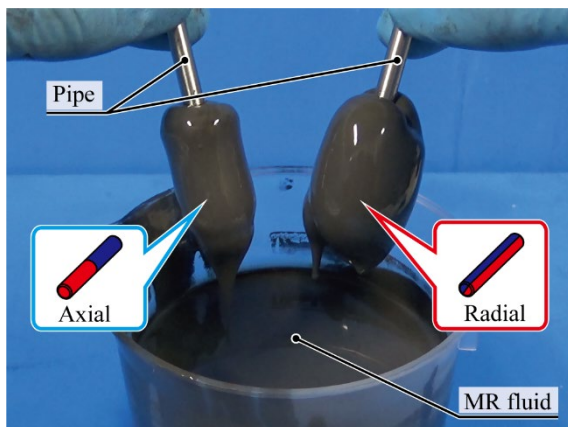


Fig. 3 Measurement of adsorbed volume of MR fluid

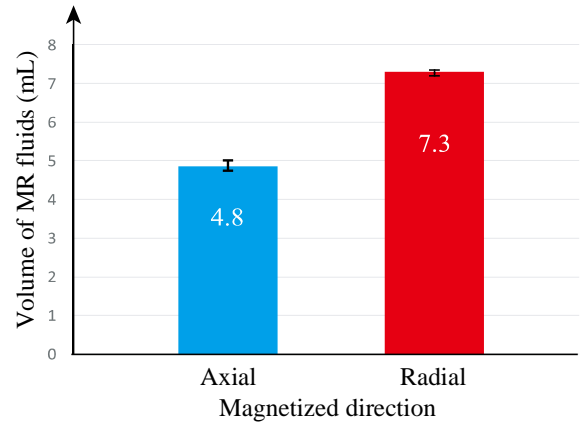


Fig. 4 MR fluid adsorption test results

3.2 実機の試作

考案した磁性ピンアレイグリッパー機構の原理実証機を試作した。実機の外観を Fig. 5 に、仕様を Table 1 に示す。考案原理を示すにあたって構造を単純化するため、3本のユニットを一次元的に並列配置する設計とした。前節のMR流体吸着実験の結果から、磁石は径方向着磁のものを使用し、樹脂製のロッドの先端に接着することで挿入・引き抜き動作を可能とした。MR流体を封入する袋はシリコンゴム（硬度ショア A50）を用いて製作した。

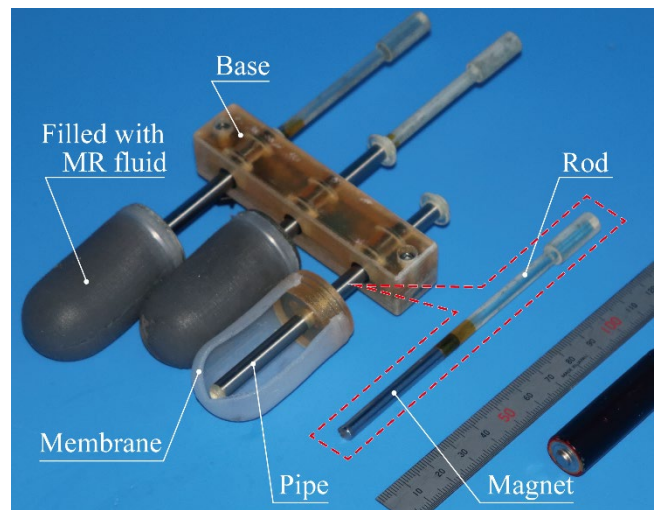


Fig. 5 Prototype of the magnetic pin-array gripper mechanism

Table 1 Prototype specification

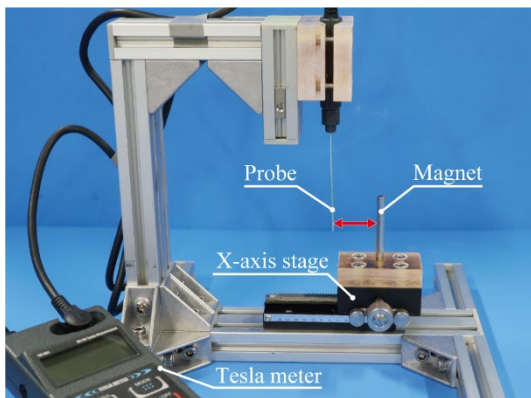
Magnet	Material	Neodymium
	Diameter [mm]	5
	Length [mm]	50
Pipe	Material	SUS304
	Outer diameter [mm]	6
	Thickness [mm]	0.3
	Length [mm]	100
Membrane	Material	Silicone
	Thickness [mm]	1.5
	Length [mm]	40
MR fluid	Hardness	Shore A50
	Maker	LORD
	Model number	MRF-132DG

4. 基礎実験

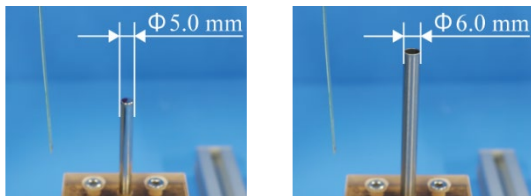
4.1 ピン周辺の磁束密度の測定

パイプ周辺の MR 流体を封入する領域において、磁石をステンレスパイプで覆うことによる磁界の遮蔽を評価するため、磁束密度の測定を行った。Fig. 6(a)のように、テスラメータのプローブを固定し、磁石は X 軸ステージに取り付けた。磁石表面がプローブに接する位置を原点とし、磁石を 0.5 mm ずつプローブから遠ざけながら磁束密度を測定した。実機で使用している直径 5 mm の円柱型磁石に対して、磁石表面を露出した場合 (Fig. 6(b)) と外径 6 mm、肉厚 0.3 mm のステンレスパイプを被せた場合 (Fig. 6(c)) とで同様の測定を行い、パイプの存在によってどの程度磁束密度が低下するかを調べた。

磁束密度の測定結果を Fig. 7 に示す。磁石を露出させた場合とパイプで覆った場合とで磁束密度にほとんど差は見られず、低下幅は最大で約 6% であった。この結果から、パイプによる



(a) Appearance of the experimental equipment



(b) When the magnet is exposed (c) When covered with a pipe

Fig. 6 Magnetic flux density measurement

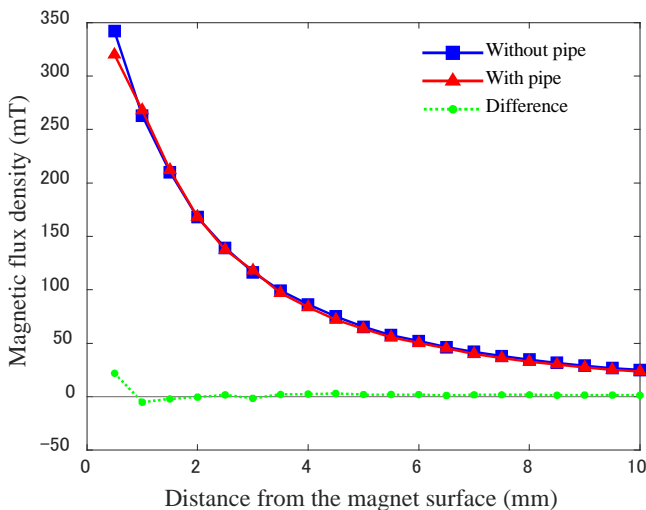


Fig. 7 Magnetic flux density measurement results

磁界の遮蔽は無視できる程度であり、MR 流体封入部に磁石を直接挿入した場合と同等の磁束伝播を実現できると考えられる。この程度まで磁界の遮蔽が抑えられた要因としては、パイプが非磁性の SUS304 製であり、かつ厚みが 0.3 mm と薄肉であることが考えられる。

4.2 MR 流体封入部の圧縮試験

パイプ内の磁石からの磁場印加による MR 流体封入部の剛性の変化を評価するため、円柱型のプローブによって袋部分を圧縮する実験を行った。実験装置の外観を Fig. 8 に示す。材料試験機に直径 4 mm の円柱型のプローブを取り付け、押し込み速度 0.5 mm/s で袋部分を圧縮し、その際の荷重を測定した。同じサイズのパイプ・磁石を用いた場合に袋の太さが剛性に与える影響についても調べるため、内径 d が 16 mm, 20 mm, 24 mm の 3 種類の袋を用意した。それぞれの袋内径について、パイプ先端に磁石を挿入しない場合と挿入した場合の 2 通りで測定を行った。

結果を Fig. 9 に示す。グラフの横軸はパイプ表面からの距離 x であり、図の右から左の向きに袋が圧縮されたことを示している。圧縮荷重が 2.5 N (圧力にして約 200 kPa) に達したところでパイプ表面に接触したものとみなし、その位置を $x = 0$ とした。いずれの袋径においても、磁石の挿入によって圧縮に要する荷重が増加していることが確認された。

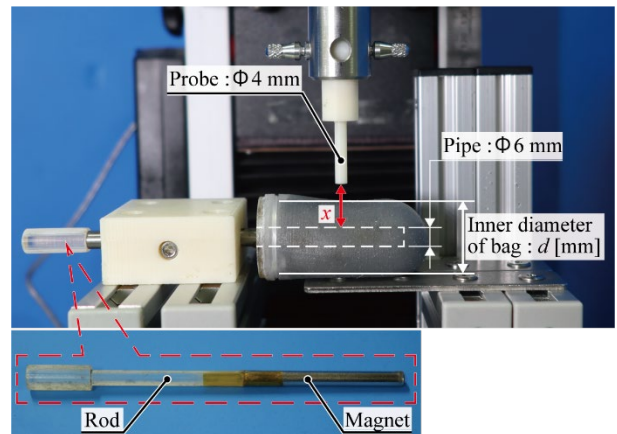


Fig. 8 Compression test of MR fluid filled part

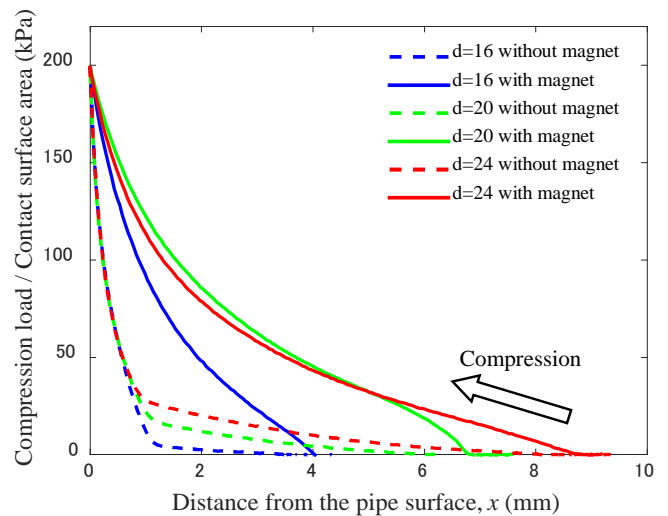


Fig. 9 Measurement results of compression load

また、磁石挿入時の荷重に注目すると、パイプからの距離 x が等しい位置と比較しても内径 $d = 16$ の時のみ荷重が小さいという結果が得られた。この結果は袋部分の内径をある程度大きくすることの有効性を示唆している。本ユニット一本当たりの直径を大きくすることができれば、ピンアレイ方式の課題であったピン本数の低減につながると考えられる。

4.3 物体把持実験

考案機構の形状適応性及び物体把持性能を検証するため、原理実証機を用いて物体把持実験を行った。対象物には形状の大きく異なるマスキングテープ（直径 53 mm, ×高さ 40 mm, 重量 65 g）及びプラスチックケース（幅 50 mm ×奥行き 50 mm ×高さ 50 mm, 重量 23 g）を用意した。

実験の様子を Fig. 10 に示す。いずれの物体についても、磁石が未挿入の状態では袋部分を対象物に押し当て（①-②）、パイプ内に磁石を挿入し（③-④）、袋内の MR 流体を硬化させることで把持に成功した（⑤-⑥）。対象物ごとに見ると、マスキングテープの場合（Fig. 10 (a)）は 3 本のユニットが上に凸の配置となるように直動し、両端のユニットの袋部分は折れ曲がったような形状になった。一方、プラスチックケースの場合（Fig. 10 (b)）は、3 本のユニットが下に凸の配置となり、ケースの端部が袋部分に食い込んだような状態となった。このように、考案機構の形状適応性と剛性可変性によって物体の把持が可能であることが確認された。ピンユニットの数と密度を高めれば、凹凸の配置の組み合わせによりさらに複雑な形状の物体を把持できる可能性がある。これは単一の袋を使った MR 流体グリッパよりも形状適応性に優れる。

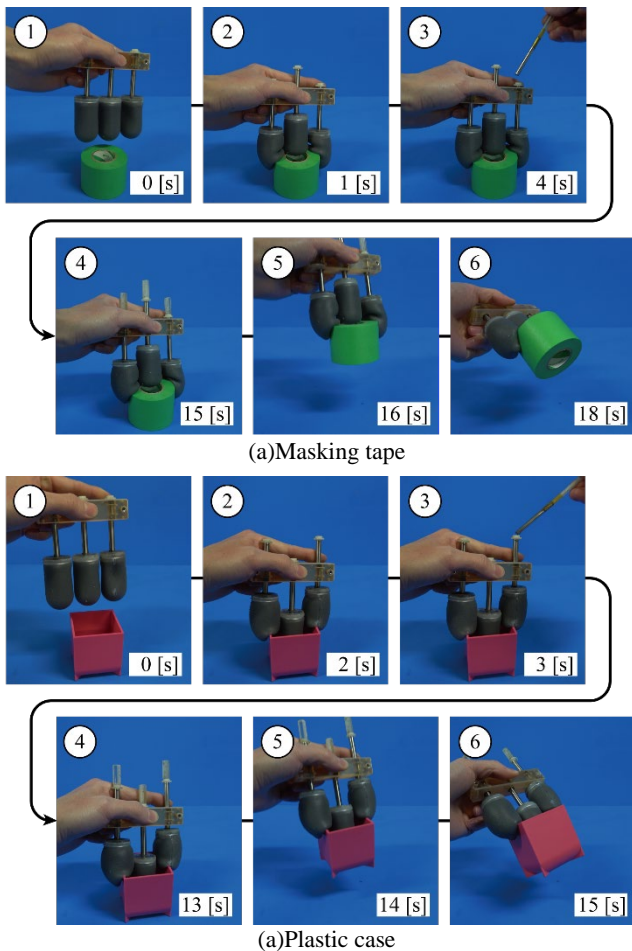


Fig. 10 Object Grasping test



Fig. 11 Overview of the Prototype Model of the Jamming Pillow Mechanism

また、柔剛切替えを行う機構の 1 つとして Fig. 11 に示すように枕機構に関する実機の具現化を行っている。こちらも我々が従来より取り組んできているジャミング膜グリッパ[3]と同様に房状の構造を有しており、これらの空気室を独立で能動的に駆動させることによって、寝返り支援などにも応用できるものと考えている。

5. 結言

本研究では、MR 流体とピンアレイ構造を組み合わせた磁性ピンアレイグリッパ機構を考案・具現化した。本報では試作実機を用いた基礎実験を行い、考案機構が優れた形状適応性と剛性可変性を有しており、それによって物体の把持が可能であることを確認した。

今後は把持特性のさらなる定量的評価、及びピンを同心円状など二次元平面に配置したピンアレイグリッパへの拡張に取り組む。また、ニトリルゴム膜の使用による耐油性の向上も目指していく。

謝辞

本研究の基礎の一部は JSPS 科研費、新学術領域研究「ソフトロボット学」18H05471 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. Bancon and B. Huber, "Depression and grippers with their possible applications," vol. 46, no. 2, p. 55, 1982.
- [2] J. Amend, E. Brown N. Rodenberg, H. Jaeger, H. Lipson, "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 107, no. 44, pp. 18809–18814, 2010.
- [3] M. Fujita, Masahiro Fujita, Kenjiro Tadakuma, Hirone Komatsu, Eri Takane, Akito Nomura, Tomoya Ichimura, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, "Jamming layered membrane gripper mechanism for grasping differently shaped-objects without excessive pushing force for search and rescue missions," *Adv. Robot.*, vol. 32, no. 11, pp. 590–604, 2018.
- [4] A. Pettersson, S. Davis, J. O. Gray, T. J. Dodd, and T. Ohlsson, "Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes," *J. Food Eng.*, vol. 98, no. 3, pp. 332–338, 2010.
- [5] T. Nishida, Y. Okatani, and K. Tadakuma, "Development of Universal Robot Gripper Using MR α Fluid," *Int. J. Humanoid Robot.*, vol. 13, no. 4, pp. 0–4, 2016.
- [6] Y. T. Choi, C. M. Hartzell, T. Leps, and N. M. Wereley, "Gripping characteristics of an electromagnetically activated magnetorheological fluid-based gripper," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 5, 2018.
- [7] P. B. Scott, "The 'Omnigripper': A form of robot universal gripper," *Robotica*, vol. 3, no. 3, 1985.
- [8] H. Fu and W. Zhang, "The development of a soft robot hand with pin-array structure," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 5, 2019.
- [9] J. Wang and W. Zhang, "An adaptive robot hand with spiral blade expansion slide tube," *IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2019*, no. December, pp. 778–783, 2019.
- [10] H. Yuan and W. Zhang, *A Novel Hedgehog-Inspired Pin-Array Robot Hand with Multiple Magnetic Pins for Adaptive Grasping*, vol. 11744 LNAI. Springer International Publishing, 2019.