

小物体把持のための改質 MR 流体を用いるユニバーサルグリップの開発

○福崎 琢也, 津上 祐典, 西田 健 (九州工業大学)

Development of Universal Robot Gripper Using Reformed Magnetorheological Fluid for Grasping Small Objects

○Takuya FUKUZAKI, Yusuke TSUGAMI, Takeshi NISHIDA (Kyushu Institute of Technology)

Abstract : We developed a universal gripper consists of two fingers for industrial robots using reformed magnetorheological (MR) fluid for the purpose of grasping small objects. The finger tip is composed of an elastic membrane enclosing the reformed MR fluid. The finger has a diameter of 25 mm or less, and a magnetic flux circuit structure for changing the magnetic flux density within 0.1 s or less by 0.24 T or more: solidification can be controlled, was realized by the rotation mechanism of the permanent magnet. Several experimental results show the effectiveness and performance of the developed universal gripper.

1. はじめに

産業用ロボットの対象物に直接作用する部分をエンドエフェクタと呼び、特に対象物の把持動作に使用するものをグリップと呼ぶ。産業用ロボットの作業工程では、対象物の形状や姿勢に応じて適切なグリップへの交換を行うことが一般的であるが、近年、その低減を狙うユニバーサルグリップの開発が数多くなされている。空気圧を利用するものには、柔軟膜を対象物に押し当てた後に膜内部を陽圧にすることで膨張させ包み込むグリップ^[1]や、エラストマを空気圧で変形させ把持を行うグリップ^[2,3]、エラストマの変形による陰圧で吸着するタコの吸盤を模したグリップ^[4]などがある。粒子を封入した柔軟膜内を陰圧にすることで発生するジャミング転移により対象物を包み込むグリップもある^[5-7]。その他にも、脆い物体を含めた種々の形状の対象物を把持可能なグリップとして柔軟膜内に注入する非圧縮性流体の多寡により包み込み把持を行うグリップ^[8]が開発されている。しかし、アクチュエータとして空気圧の増減を利用する場合には、粉塵環境や高温多湿環境では使用の制約が生じる。また空気や非圧縮性流体など流動体の制御による把持戦略では、把持と解放動作の応答速度に制約が生じる。

外部環境の影響を受けず応答速度に優れたグリップとして、MR 流体を用いたグリップが開発されている^[9-11]。MR 流体 (Magneto-Reological Fluid) は、磁界を与えることで瞬時に見かけ粘度が大きくなる機能性流体の一種であり、本研究ではこれに非磁性体を添加して粘度を上昇させた改質 MR 流体を用いる。

2. 関連研究

Pettersson らの開発したグリップ^[9]は平行チャックの把持部に MR 流体を封入した柔軟膜を装着し電磁石により磁

界制御を行う。Nishida らによるグリップ^[10]は MR 流体に非磁性体を混合することで MR 流体に比べ磁束に対する見かけ粘度が大きく比重が小さい特徴をもつ改質 MR 流体 (MR α 流体) を用いたものである。津上らは磁界制御にネオジム磁石を用いることで MR α 流体グリップの小型化に成功している^[11]。いずれも MR 流体が低粘度の状態に対象物に柔軟膜部を押し付けて対象物を包み込み、電磁石もしくはネオジム磁石により磁界を与えることで MR 流体を高粘度の状態にして、形態拘束と静止摩擦力により対象物を把持する。解放時は磁界を消失させて MR 流体を低粘度の状態に戻すことで対象物を開放する (文献^[9,11]ではその後平行チャックを開く)。

しかし、平行チャックを用いた MR 流体グリップ^[11]は、作業台との接触を避ける必要があるため、柔軟膜で包み込むことができないほどに小さな対象物の把持ができない。また文献^[10]のグリップは、柔軟膜の摩擦力で対象物を把持するため、質量の小さい対象物は解放時に柔軟膜に張り付き解放できない場合がある。また対象物の上方からグリップを押し当てるため、押し当て力で破損する可能性がある対象物の把持はできないことが指摘されている^[11]。本研究では、これらの従来の MR 流体を用いたグリップが不得意であった、壊れやすい物体を含む小さな対象物の把持を行うグリップを開発した結果を示し、その性能を検証する。

3. 開発したグリップの動作原理と構造

小さい対象物の把持および解放を行うために、文献^[11]のグリップの機構を大幅に見直すことで小型の改質 MR 流体グリップを開発した。具体的には、直径 25 mm 以下の指型のグリップを二本開発し、それらを対向させて平行チャックに組み込む構造とした。

改質 MR 流体の粘度の制御には、その多少に関わらず高い磁束密度が必要である。したがって、グリップの小型化

と高磁束密度の生成消滅を両立させるために、ネオジウム磁石の回転によって改質 MR 流体へ印加する磁束の制御を行う機構を開発した。開発したパラレルグリッパの磁気回路の構造を Fig. 1 に示す。この図の下方に改質 MR 流体を封入した柔軟膜を装着する。この機構では、径方向に着磁されたネオジウム磁石を一对のヨークで挟み、磁石を 90 deg 回転させることで改質 MR 流体に印加する磁束密度を制御する。Fig. 2(a) に示すヨークとネオジウム磁石の位置関係を 0 deg と定めると、この状況では磁束はヨークを通過するため、改質 MR 流体への磁束は供給されない。一方、Fig. 2(b) のようにヨークと磁石の位置関係が 90 deg の場合には、N 極から出た磁束は N 極側ヨークの長さ方向に流れ、改質 MR 流体を通り¹、S 極側ヨークに入った後磁石の S 極に戻る。したがって、90 deg 回転させることでヨークおよび改質 MR 流体を通過する磁束の最大量と最小量を切り替えることができる。磁石を回転させるために、AC サーボアクチュエータ（ハーモニックドライブシステムズ、RSF-5B-100-E050-C）と AC サーボドライバ（HA-680-4B-24）を用いて、0.1 s 以内の磁束密度の切り替えを可能にした。

つぎに、これらの 0 deg と 90 deg の位置関係において、ヨークと改質 MR 流体内部の磁束密度分布のシミュレーションを行った。ここで、材質記号 N40 のネオジウム磁石の利用を仮定し、残留磁束密度を 1.26 T とした。その結果を Fig. 3(a) と (b) に示す²。同図 (a) より、0 deg では磁束が弧状ヨークに沿って水平方向に流れ、90 deg では磁束が上から下に流れることが確認できる。また、改質 MR 流体中の磁束密度の変化についてシミュレートした結果を Fig. 4 に示す。ここでは、改質 MR 流体を直径および高さが 25 mm の円柱と仮定した。磁石を 90 deg 回転させることにより、改質 MR 流体中の磁束密度の平均値は、0.04 T から 0.24 T まで変化することが確認された。使用したネオジウム磁石は、直径 15 mm、長さ 25 mm、および穴径 4 mm である。また、ヨークは長さ 28 mm、厚さ 3 mm、100 deg の円弧形状で、材質は SS400 である。ネオジウム磁石とヨークの間には、0.4 mm の間隙がある。

4. 柔軟膜の開発

現在までに、ゴム製の指先表面に凹凸加工を施し、対象物を凹凸に引っ掛けることで小物体の把持を行うグリッパ^[12]や、指先に対象物の下部に差し込むための薄い爪と薄爪の変形を抑えるための厚い爪を有するグリッパ^[13]が開発されている。

¹改質 MR 流体の透磁率は空気より大きく鉄よりも低い。シミュレーションでは比透磁率を 3 と設定した。

²COMSOL Multiphysics の AC/DC モジュールを用いた。

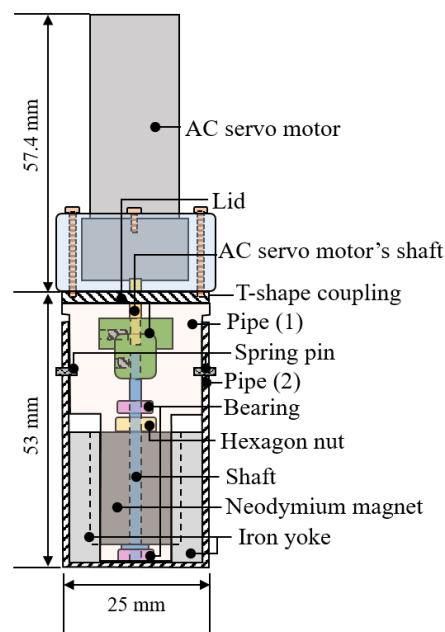


Fig. 1. Structure of developed parallel gripper. The bottom part is connected to a reformed MR fluid and an elastic membrane.

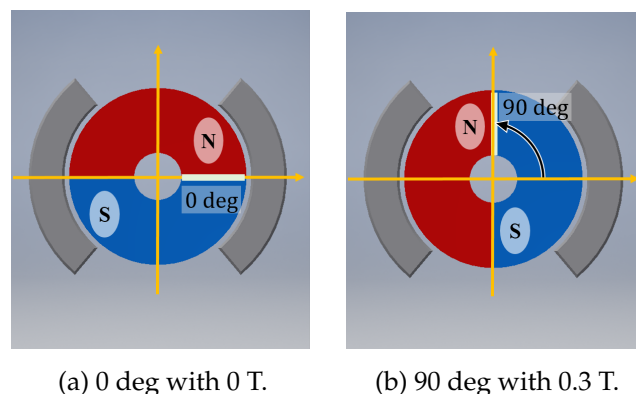
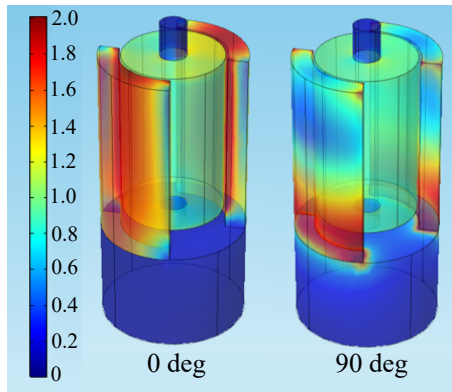


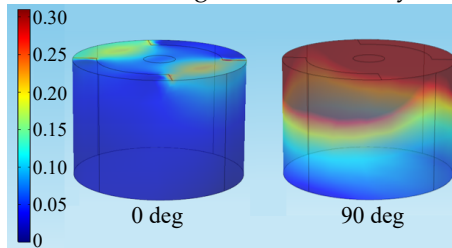
Fig. 2. Positional relationship between magnet and yoke view from the bottom.

4.1 柔軟膜の設計

これらの従来研究の成果を考慮し、本研究では Fig. 5 に示す形状の柔軟膜を開発した。円筒部の柔軟膜の厚みは 2 mm、対象物に接触する部分は 0.5 mm である。図中の「Thick part」は、柔軟膜の厚みが最大で 2 mm あり、把持動作における柔軟膜の外側への変形を抑える「爪」の役割を果たす。また、対象物と柔軟膜が張り付く現象の発生を抑えるために、対象物と接触する曲面部分全体に梨地処理を施した。上部の円筒部を磁気回路に装着し、下部の曲面部分で把持を行う。



(a) Simulation of the magnetic flux density in the yoke.



(b) Simulation of the magnetic flux density in the reformed MR fluid.

Fig. 3. Simulation of distribution of magnetic flux density corresponding to the magnet angle.

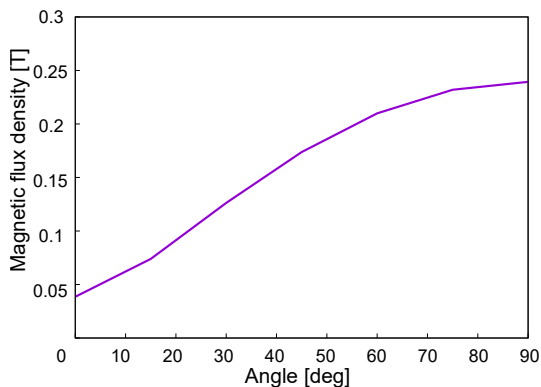


Fig. 4. Average magnetic flux density applied to reformed MR fluid by magnet rotation angle.

4.2 材質の選定

MR 流体に含まれる油分が柔軟膜を膨潤するため、できるだけその程度が低い柔軟膜素材を探索するための耐 MR 流体試験を行った。試験材料として、シリコンゴム (Q)、水素化ニトリルゴム (HNBR)、フッ素ゴム (FKM)、ニトリルゴム (NBR) とポリ塩化ビニル (PVC) ブレンド、Q とフロロシリコン (FQ) のブレンド、および NBR とエチレンプロピレンジエンゴム (EPDM) のポリマーアロイを用いた。本研究で柔軟膜に封入する MR 流体 (LORD

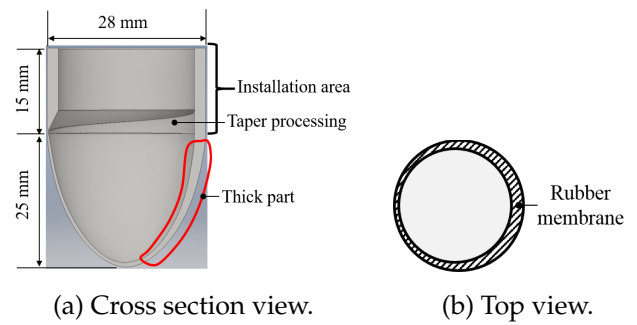


Fig. 5. Shape of rubber.

製 MRF-140CG-1000) を試験液として、100 °C の試験液に各試験材料を 70 h 浸漬し、浸漬後の体積変化率を評価した。実験結果を Table 1 に示す。この結果より、HNBR が最も耐 MR 流体性能に優れていることが確認できた。NE は試験開始後ただちに膨潤し測定不可能となった。以上の結果より、柔軟膜の素材として HNBR を採用した。

5. 平行チャックへの組み込み

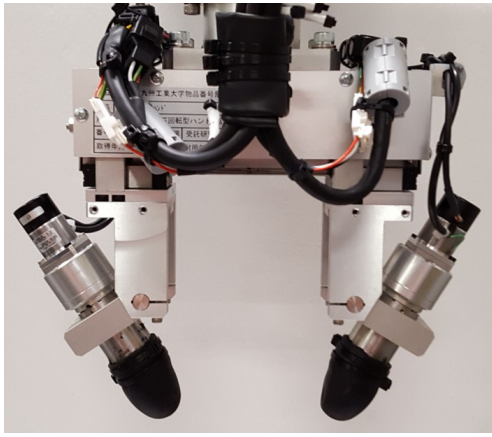
Fig. 1 に示した磁気回路と、改質 MR を封入した Fig. 5 の柔軟膜を組み合わせて、小型のユニバーサルグリッパを構築した。本研究ではこれを「MR 指」と呼ぶ。さらに、二台の MR 指を対向させて平行チャックに組み込み、Fig. 6 に示すユニバーサルグリッパを構成した。ここで、文献^[4]と同様の平行チャックを使用した。平行チャックは電流値として開閉力を計測することが可能である。各 MR 指は、60 deg の角度で平行チャックに取り付けられている。柔軟膜内の MR 流体は、柔軟膜の対象物との接触部分に 1 mm 程度のへこみができる程度に充填した。

産業用ロボットに搭載された場合の本平行チャックの動作シーケンスは次の通りである。

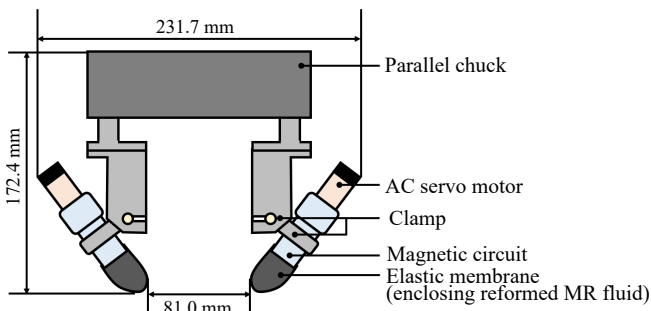
- (1) 対象物が両指の柔軟膜の中央位置に来るよう産業用ロボットによってハンドを移動する。

Table 1. Experiment for MR fluid resistance.

Material	Volume change ratio [%]
Q	32
HNBR	1.9
FKM	4.0
NBR + PVC	30
Q + FQ	36
NE	-



(a) Overview of the developed parallel gripper.



(b) Structure of the developed parallel gripper.

Fig. 6. Overview of the developed parallel gripper.

- (2) 対象物をパラレルグリッパで挟み込み動作を開始する。
- (3) 電流値のフィードバック制御により、目標の挟み込み力に到達させる。
- (4) MR 指のサーボモータを 90 deg 回転させて磁界を印加し、柔軟膜部を高粘度化する。
- (5) 対象物を搬送する。
- (6) 目的位置で平行チャックを開けて対象物を解放する。

6. 実験

6.1 様々な形状と材質の対象物の把持

まず、壊れやすい対象物として、ウズラの卵、クッキー、電球、おでんの大根の把持実験を行い、いずれも傷つけることなく把持できることを確認した (Fig. 7)。特に、クッキーは作業台上に置かれた状態から把持可能であった。さらに、だし液に浸ったおでんの大根を把持することも可能であった。これは、吸引によるグリッパでは把持できない対象物である。

つぎに、木製の球体の把持実験の様子を Fig. 8 に示す。球の直径部だけでなく、滑りやすい球上部での把持も可能であることが確認された。これにより、開発したグリッパが位置ずれに対する把持のロバスト性を有することが確認できた。

さらに、棒状で表面が不均一なキュウリを用いて、対象物の回転トルクに対抗する把持力に関する実験を行った。キュウリの端部を把持した状態で持ち上げ、その状態のまま、MR 流体に印可している磁界を消失させる実験を行った。Fig. 9(a) に示すように、MR 流体の高粘度化の作用によって、キュウリが作業台上に置かれた状態のまま把持できることが確認された。一方、MR 流体への磁束印可を停止して低粘度化することによって、Fig. 9(b) のように、把持姿勢が保持できなくなる現象が確認された。この実験により、MR 流体の高粘度化によって、把持対象物の回転トルクに対抗し、その把持姿勢が保持されることが確認された。

6.2 把持性能の検証

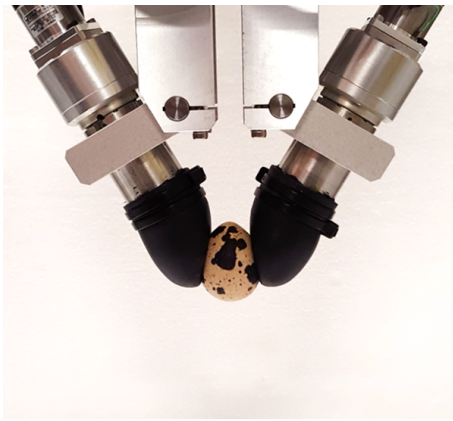
改質 MR 流体を高粘度化することで得られる把持性能の向上を、以下の手順により検証した:

- (1) フォースゲージを接続した把持対象物をパラレルグリッパで挟む。
- (2) 磁界を印加して柔軟膜部を高粘度化する。
- (3) フォースゲージを鉛直方向に引き下げ、対象物が解放される引張力を把持力として測定する。

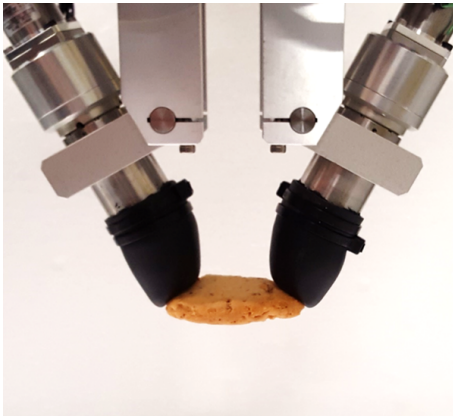
さらに、手順 (2) を省いた実験も同様に行うことで、二種類の実験結果の比較により、改質 MR 流体による把持性能向上への寄与を検証した。本実験における把持対象物として、一辺 30 mm の木製の立方体 (wood cube)、同様の木製立方体の側面に幅 4 mm、深さ 3 mm の溝を加工により施したもの (wood cube with groove processing)、および鏝径 23 mm、胴径 11.35 mm、内幅 25 mm の木製ボビン (wood bobbin) の三種類を用いた。二種類の立方体は、平行な二面を、ボビンは胴部を把持部とした。各対象物ごとに 10 回ずつ実験を行った結果を Fig. 10 に示す。計測された把持力の最大値と最小値をエラーバーで表した。

二種の立方体の把持力の比較より、表面の凹凸による差異は僅かであったことから、柔軟膜が表面形状に食い込むことによる把持力の向上は微小であるといえる。この現象には、柔軟膜に用いた HNBR の硬度が 55 H_A であることも関連していると予想される。

一方、ボビンに対する把持力は、改質 MR 流体が低粘度の状態であっても、高粘度の状態での立方体に対する把持力よりも大きい。これは、柔軟膜がボビンを包み込むこと



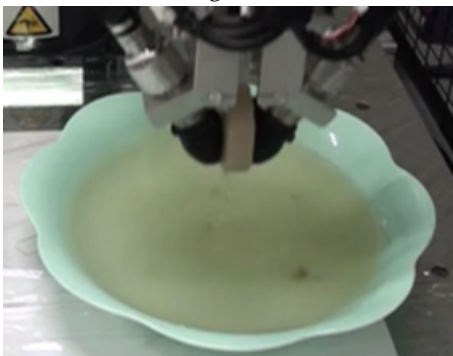
(a) Quail egg.



(b) Cookie.

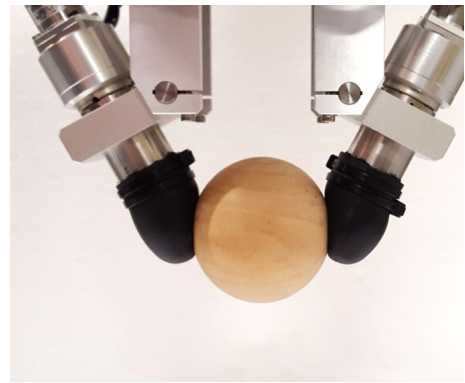


(c) Light bulb.



(d) Simmered Japanese radish.

Fig. 7. Grasp of various objects.



(a) Diameter part of sphere.



(b) Upper part of sphere.

Fig. 8. Grasp of wood sphere.



(a) High viscosity state.



(b) Low viscosity state.

Fig. 9. Experiment of grasping against rotational torque using a cucumber.

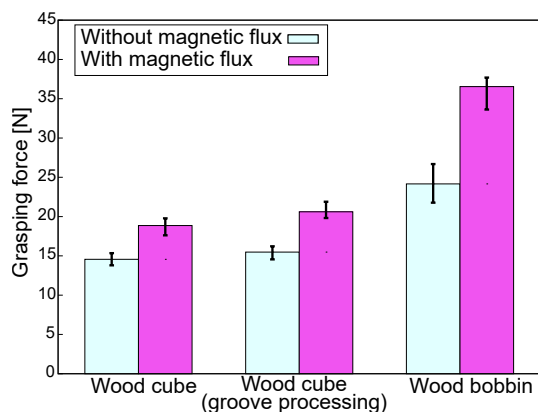


Fig. 10. Changes of gripping force due to the viscosity change of the reformed MR fluid and the shape of the target.

で発生する形態拘束によって把持力が向上したためであると推測される。

以上の実験結果より、開発したパラレルグリッパは、指先で包み込むことができる小さな対象物に対して、より優れた把持性能を発揮することがわかる。

7. まとめ

ネオジム磁石の回転機構の採用により、高い磁束密度と小型化を両立した「MR 指」を開発した。本開発のために、MR 指内の磁束密度の変化のシミュレーションや柔軟膜の素材選定のための実験を行った。開発した MR 指は、その内部の一对のヨークで挟まれた磁石をサーボモータで回転させることで、MR 流体に印加される平均磁束密度を約 0.04 T から約 0.24 T まで、すなわち改質 MR 流体の最低粘度から最高粘度までの変化を 0.1 s 以内に達成することができる。さらに、二本の MR 指を対向させて平行チャックに組み込み、小さな対象物を把持できるユニバーサルグリッパを構成した。

また、数種類の把持実験を実施し、従来の MR 流体パラレルグリッパが不得手とする小物体把持を含めた種々の形状の対象物や、液体に沈んだ対象物の把持が可能であることを確認した。さらに、フォースゲージを用いた把持力測定実験により、開発したパラレルグリッパは、包み込んで把持できる小物体に対して、より優れた把持性能を有することが確認された。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご協力頂いた、マグネティックソリューションズ、前田機工（株）、イナバゴム（株）、

オリンパス（株）に深謝する。

参考文献

- [1] H. Choi, M. Koç, "Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp.1350-1361, 2006.
- [2] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, G. M. Whitesides, "Soft robotics for chemists," *Angewandte Chemie Int. Edition*, vol. 50, pp.1890-1895, 2011.
- [3] R. Deimel, O. Brock, "A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping," *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 35, issue 1-3, pp161-185, 2015.
- [4] 高橋, 菊池, 鈴木, 青柳, "タコの吸盤を模倣した真空吸着グリッパの開発", *精密工学会誌*, Vol. 79, No. 10, pp.970-971, 2013.
- [5] J. R. Amend Jr, E. Brown, N. Rodenberg, H. M. Jaeger, H. Lipson, "A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material," *IEEE trans on Robotics*, Vol. 28, pp.341-350, 2012.
- [6] T. Nishida, D. Shigehisa, N. Kawashima, K. Tadakuma, "Development of universal jamming gripper with a force feedback mechanism," *Joint 7th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th Int. Symp. on Advanced Intelligent Systems*, pp.242-246, 2014.
- [7] 水島, 奥, 鈴木, 辻, 渡辺, "剛性可変な皮膚と関節を有するロボットハンドの開発", *日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会*, 1P2-B09, 2017.
- [8] R. Murayama, T. Watanabe, M. Uchida, "Delicate Grasping by Robotic Gripper with Incompressible Fluid-based Deformable Fingertips," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, pp. 5469-5474, 2013.
- [9] A. Petterson, S. Davis, J. O. Gray, T. J. Dodd, T. Ohlsson, "Design of a magnetorheological robot gripper for handling of food products with varying shapes," *Journal of Food Engineering*, vol. 98, pp. 332-228, 2010.
- [10] T. Nishida, Y. Okatani, K. Tadakuma, "Development of Universal Robot Gripper Using MR Fluid," *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol.13, No.04, 1650017, 2016.
- [11] 津上, 西田, "改質 MR 流体を用いるパラレルグリッパの開発", *日本ロボット学会学術講演会*, RSJ2016AC3A-03, Sep., 2016.
- [12] L. U. Odhner, R. R. Ma, and A. M. Dollar, "Precision Grasping and Manipulation of Small Objects from Flat Surfaces using Underactuated Fingers," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2830-2835, 2012.
- [13] 馬場, 辻, P. Yoonseok, 倉爪, 諸岡, 長谷川, 原田, "爪を有する多指ハンドの把持計画", *日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会*, 3P2-R01, 2014.