1 次元柔剛切替メカニズムを活用した耐火性トーラスグリッパ機構

Fire-Resistant Torus Gripper using One-Dimensional Variable Stiffness Mechanism

○学　清水　杜織[1]　学　林　聡輔[1]　学　藤本　敏彰[1]
学　向出　陸央[1]　学　猪股　翔平[1]　学　緑川　俊貴[1]
学　鉄井　光[1]　学　髙根　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)

Tori SHIMIZU[1], shimizu.tori@rm.is.tohoku.ac.jp
Sosuke HAYASHI[1], Toshiaki FUJIMOTO[1], Rio MUKAIDE[1], Shouhei INOMATA[1], Toshiki MIDORIKAWA[1], Hikaru TETSUI[1], Eri TAKANE[1], Masahiro WATANABE[1], Kenjiro TADAKUMA[1], Masashi KONYO[1], and Satoshi TADOKORO[1]
([1]Tohoku University)

Able to grasp objects of any shape and size, universal grippers using variable stiffness phenomenon such as granular jamming have been developed for disaster robotics application. However, as their contact interface is mainly composed of unrigid and burnable silicone rubber, conventional soft grippers are not applicable to objects with sharp sections such as broken valves and glass fragments, especially on fire. In this research, the authors proposed a new method of variable stiffness mechanism using a string of beads that can be composed of cut-resistant and incombustible metals, arrange the mechanism to form a torus gripper, and conducted experiments to show its effectiveness.

Key Words: Mechanism, One-dimensional Variable Stiffness Mechanism, Fire-Resistant Gripper, Variable Stiffness

1.　緒言

1.1 背景：袋状グリッパ

災害対応および復旧従事者の安全確保を目的として，遠隔操作により危険な作業を代行するロボットが求められている．特に，その主要なエンドエフェクタであるグリッパは，図２のようなバルブ開閉や配電盤操作，瓦礫把持・運搬など直接的に現場環境と接触する作業にて多用され，その機能や性能により各作業が遠隔で実現可能かを決定する重要な要素となる．

産業用ロボットとは異なり電源・寸法・重量の制約が厳しい災害対応ロボットは，把持対象に応じて手先を逐次交換するペイロード的余裕に乏しい．そこで当研究チームでは，任意の形状・サイズの物体を把持可能な膜袋型グリッパ「Omni-Gripper」を研究開発してきた[4]．これは，図３左に示すように，柔軟状態で対象物に押し付けてその形状になじませ，粉体間の空気を抜くことで硬い状態に変化させ（グラニューラージャミング転移現象）包み込みを維持することで把持を実現するソフトグリッパである．従来方式[1]~[3]では粉体を膜内全体に封入するため内圧が高く対象物を押し出してしまう課題が生じたのに対し，3 層構造の中央層にのみ粉体を封入したことで低押し付け力と大変形性を実現した画期的なものである．

このような構造の剛性を任意に変化させる可変剛性・柔剛切替機能を活用したグリッパは，複雑形状や脆弱物体も破損させずに把持できる利点を有し，無論産業分野においても多品種少量生産の現場での部品組立や物品搬送に有用である．

Fig. 1 Fire-Resistant Torus Gripper

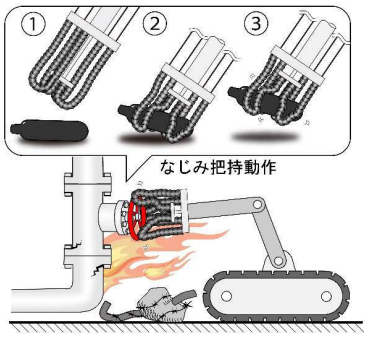

Fig. 2 Basic concept of Fire-Resistant Torus Gripper

1.2 極限化過程①：耐切創性化

一方で，従来の袋型グリッパは，図３右に示すように，把持対象物の鋭利部との接触により柔軟膜が破れると，環境を流出した粉体で汚染するだけでなく，粉体封入空間の気密が損なわれることで負圧を生成できずに機能を喪失するという課題を有していた．そのため，災害時の現場で，破損したバルブや瓦礫中のガラス破片，鉄筋の露出した鉄筋コンクリートなどを把持対象に選択できない重大な欠点があった．

そこで本研究チームでは，図４に示すように，ゴム膜を伸縮性の防刃生地で保護することで，柔軟性を保ちつつ高い耐切創性を備える袋型ハンドを実現し，有効性を検証してきた[18]．

1.3 極限化過程②：耐火性化

さて，耐切創性化を付与した袋型ハンドによっても，プラント爆発後の火災現場など超高温環境中の灼熱の瓦礫をつかむことは極めて重大な難題である．機構の主要素である柔軟膜や防刃生地が高温環境で変形・燃焼してしまい，また耐火性の高い金属への置換も困難であると考えられるためである．

そこで本研究では，研究チームにて新規に考案した可変剛性機構である数珠状の 1 次元柔剛切替メカニズムから構成される耐切創性グリッパ[17]の原理を基に材料を選定し，耐火性化と両立したグリッパを構築する．そして，図１に示す原理実証機の具現化と実機実験を通じてその有効性を検証する．

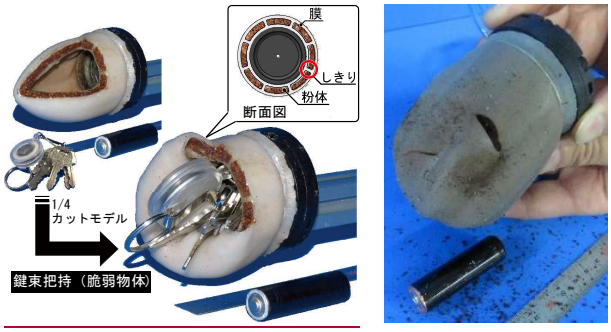

Fig. 3 “Omni-Gripper” and its disfunction due to tear

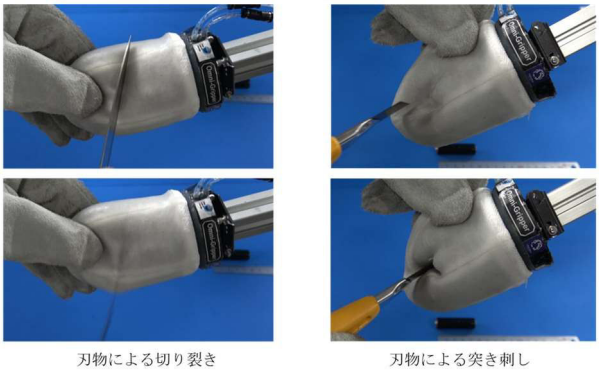

Fig. 4 Cut-resistant Omni-Gripper

2. 基本原理

2.1 従来の柔剛切替メカニズムの課題

従来の袋型グリッパ機構は，図５(a)のように粉体を袋状膜の閉空間の内部に封入し，そこから媒体流体である空気を抜くことで粉体同士が接触して剛性が高まるグラニューラージャミング転移現象を利用したものが主であった[1]~[5]．しかし，図６に示すように，細長い比率の袋に搭載した際には，高剛性モードにおいても根元部において座屈が生じやすいという問題があった[5]~[8]．また，図５(b)のように面状の構造体を複数重ねてレイヤージャミング転移現象と同様の剛性変化を発生させる構造についても提案がなされている．一方で，低剛性モードにおける湾曲可能な曲率半径の小ささ，ひいては可動範囲が非常に限定される問題があった[10][11]．

2.2 １次元柔剛切替メカニズムの原理と具現化

そこで当研究チームでは，図５に示す点（粉体）・面（板）を要素とするジャミング転移現象の持つ問題点を解決する，線（ワイヤ）を要素とする１次元柔剛切替メカニズムを考案した．本構造は，数珠状の貫通穴付きユニット複数と，それらの穴を貫通する中央線状物とから構成される[14]．この中央線に張力を与えることで，数珠同士が高い摩擦力で接触して剛性を向上させる．図７(a)に示す単純球形の数珠では経路長を最小にしようとする復元力が生じて姿勢を損なうため，図７(b)のように機構の姿勢に依らず中央線の経路長が変化しない凹凸構造を与えた．手術用の姿勢固定器具[15]，巻き取り可能なアーム[16]として研究されてきた本構造を剛性切替に用いる．

図８の試作実機は 3D プリント樹脂とステンレスワイヤから成るが，材料の強度次第で印加可能な引張力を向上でき，高剛性モードでの剛性の向上が見込める．柔軟膜を持たない構造のため，本質的に切創によって破ける現象が生じない点において，原理レベルで高い耐切創性を実現したと言える．

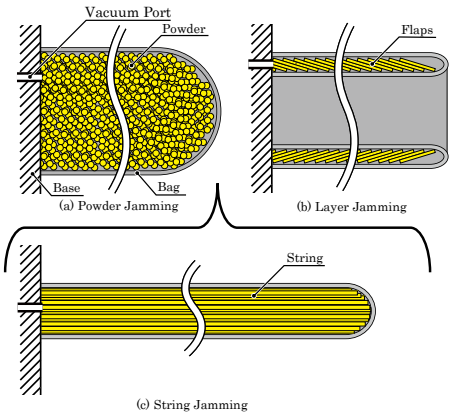

Fig. 5 Examples of variable stiffness jamming phenomenon

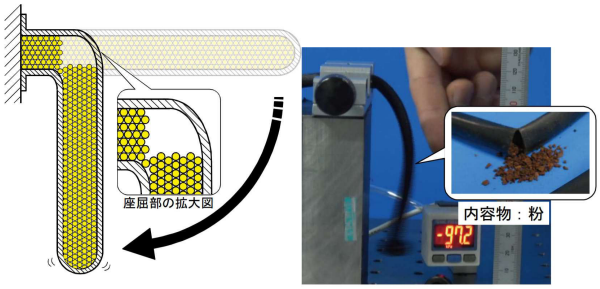

Fig. 6 Buckling of granular jamming

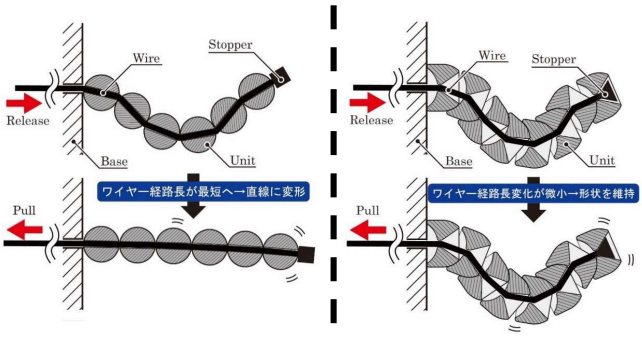

Fig. 7 Principle diagram of proposed
One-Dimensional Variable Stiffness Mechanism

Fig. 8 Proof-of-principle model of
One-Dimensional Variable Stiffness Mechanism

3.　トーラスグリッパ機構の具現化

3.1 1次元柔剛切替を活用したトーラスグリッパ機構の考案

当研究チームでは，1次元柔剛切替メカニズムを指状に円周へ離散的に配置してトーラス形状を構築することで鋭利物を把持可能な耐切創性グリッパを考案してきた[17]．本研究ではこれを再構成し，耐火性獲得へ向け構造の最適化を進める．

図９に小型試作版の実機を示す．なじみ方向を半径方向へ制限するために湾曲自由度を１に拘束した１次元柔剛切替メカニズムを適用し，根本から半分程度までは剛体のパイプで構成した．その柔剛切替動作は，各ワイヤを姿勢に依らず等しい大きさの力で引くことが可能なイコライザをエアシリンダで駆動することによって実現する．

また，把持物を解放する際，トーラスの凹んだ状態が継続されると次の物体の把持に支障を生じることから，弾性要素として定圧力を加えた２つ目のエアシリンダを１次元柔剛切替メカニズムの先端締結部に接続し，復元力を与えた．さらに前報からの差分として，1次元柔剛切替メカニズムの基部に自由回転軸を設けてねじりばねを加え，半径方向への開閉を可能とした．これらによって，エアシリンダに復元と逆向きの加圧を行うことで，開閉による掴み動作と巻き込み動作が生じ，対象物へ能動的になじむ力を発生させるため配置円直径に依らず大小より広い範囲の大きさの物体の把持が可能となった．

考案したグリッパの基本的な把持性能を検証するため，小型試作版による予備実験を行った．具体的には，把持部分の大きなボトル類・テープや箱など扁平部を有する物体・はさみなど鋭利部を有する対象物の把持，バルブやバイスなどの操作である．図１０にナイフの鋭利部を把持する様子を示す．対象物に押し付けられたのち掴むことで，対象物形状になじむ様子が確認できる．把持時に刃先部を直接掴んでの把持が可能であり，鋭利対象物への有効性が示された．

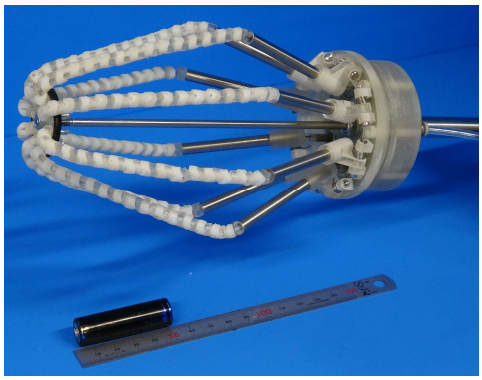

Fig. 9 Proof-of-principle model of One-Dimensional Torus Gripper

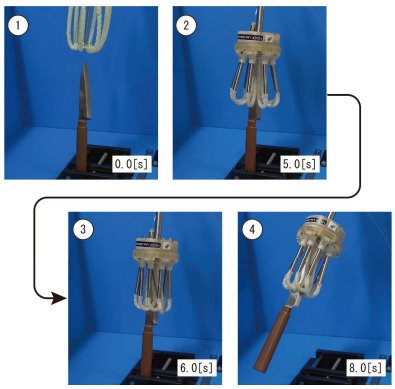

Fig. 10 Grasping test of Torus Gripper

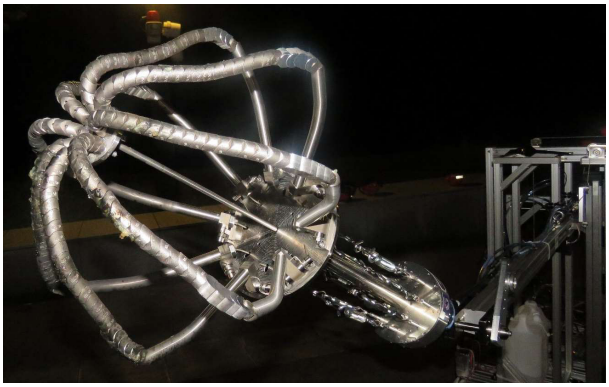

Fig. 11 Proof-of-principle model of Fire-Resistant Torus Gripper

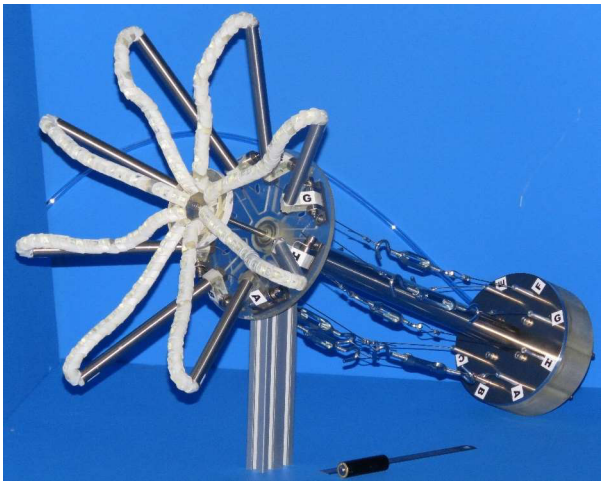

Fig. 12 Open-finger state of Fire-Resistant Torus Gripper

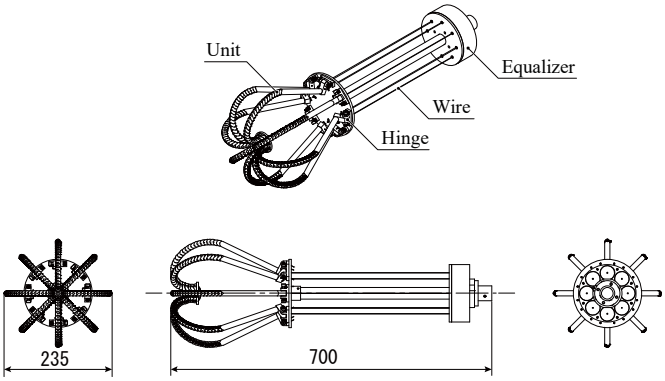

Fig. 13 Design diagram of Fire-Resistant Torus Gripper

3.2 1次元柔剛切替トーラスグリッパ機構の耐火性化

図１１・１２に，図９のグリッパの構成を踏襲し耐火性化・大型化を施した耐火性トーラスグリッパ機構「Armadillo Gripper」の原理実証機を，また図１３にその図面を示す．主な構造材はアルミ合金とステンレスから成り，数珠には耐火性を有し高強度・軽量なチタン合金を，中央線には耐熱性に優れ高引張強度を有するタングステンワイヤを使用した．

なお，イコライザのシールに利用するＯリングが耐熱性の低いゴム製のままであるため，これを熱源体である把持対象物から隔離するためにイコライザと手先を独立させ，それぞれから伸びるワイヤをターンバックルでつなぐ構成としている．さらに，必要に応じてイコライザを冷却できるよう，そのホルダ内に空洞を設けて冷却水の循環を可能とした．

4.　実機実験

具現化した原理実証機を，図１４のような操作者保護用の風防を備えた手押台車に乗せて把持実験を行った，これを人間が操作して，有刺鉄線を巻いて燃料を塗布し炎上させた約 2 [kg]のコンクリート瓦礫を火中で把持し，外部の消火設備（バケツ）へ運搬した様子を図１５に示す．手先を拡大撮影した図１６で見られるように，鋭利部によって破損したり，灼熱環境によって機能を喪失したりすることなく物体のハンドリングが可能な耐切創性・耐火性グリッパ機構の有効性が確認できた．また，把持対象物を大変形あるいは破壊しないソフトグリッパ機構としての性質も維持していることが示された．

なお，台車およびアーム接合部の自重/トルク補償機構については詳細を後報にて報告する予定である．

5.　実応用に向けて

本研究で実証した耐火性グリッパを用いることで，従来不可能であった高温・鋭利・不定形・脆弱軟弱な物体を把持することが可能となる．このことは，放水銃をロボットハンドの中央に設けることで，瓦礫や扉・蓋をこじ開け，その先の火元へ直接消火剤を噴霧し迅速かつ確実に消火を行う新たな消防機器への応用も可能であることを意味する．

一般に，耐切創性ならびに耐火性の向上には本研究のように構造材を金属で構成する必要があり，グリッパの高重量化が問題となる．特に消防ロボットや災害対応ロボットに搭載する場合，瓦礫を踏み抜いたり不安定な足場で姿勢を崩したりする原因となることを避けるべく，電源自重とトルクを補償するのみでなく，機構自体の軽量化も必須となる．

6.　結言

本研究では，数珠と中央線からなる 1 次元柔剛切替メカニズムを活用した，従来の柔剛切替方式によるソフトグリッパにとって極めて困難であった灼熱環境下で高温かつ複雑・鋭利・脆弱物体の損傷を抑えた状態での把持を可能とする耐火性トーラスグリッパ機構を考案し，その原理実証機の具現化と把持動作実験を通じて考案原理の有効性を示した．

今後は，火災現場に限らず，鉄鋼業をはじめとする高温物体を扱う産業分野や，放射線により劣化しやすいゴム素材の利用が困難な原子力発電所内での点検・廃炉作業など適用の現場を広く見据えて実用化に向けた洗練を行う．

Fig. 14 Fire-Resistant Torus Gripper on handcart with weight and torque compensation mechanism

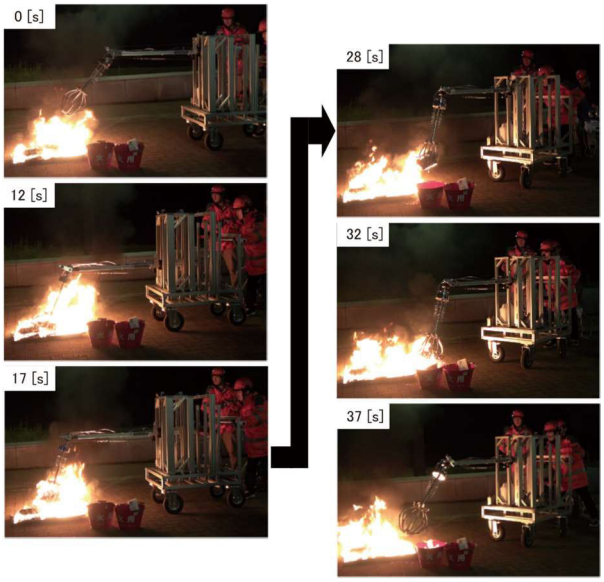

Fig. 15 On-fire grasping test of Fire-Resistant Torus Gripper

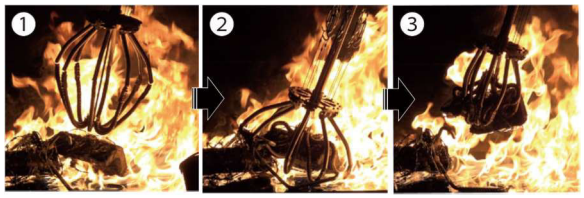

Fig. 16 Magnified view of the on-fire grasping test

謝辞

本研究は，総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発プログラム（ImPACT）により，科学技術振興機構を通して委託されたものです．ここに謝意を示します．

参考文献

[1] 日本ロボット工学会編, “ロボット工学ハンドブック”, pp.351-352, ISBN 4-339-04576-4, コロナ社.
[2] 広瀬茂男, “生物機械工学”, 191/199, 工業調査会, 1987.
[3] S. Hirose and Y. Umetani, “The Development of Soft Grippr for the Versatile Robot Hand, Mechanism and machine theory”, 13-3, 351/359, 1978.
[4] 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 勅使河原誠一, 溝口義智, 長谷川浩章, 寺田一貴, 高山俊男, 小俣透, 明愛国, 下条誠, “全方向包括式なじみグリッパ　-基本概念の提案と機械モデルの第一次試作”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 11-01, 2008.
[5] G. Banconand B. Huber, “Depression and Grippers with Their Possible Applications”, 12th ISIR, Paris, pp.321-329, 1982.
[6] Brown, Eric, et al. “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, Proceedings of the National Academy of Sciences 107.44, 18809-18814, 2010.
[7] Cheng, N., Lobovsky, M., Keating, S., Setapen, A., Gero, K., Hosoi, A., and Iagnemma, K., “Design and Analysis of a Robust, Low-cost, Highly Articulated Manipulator Enabled by Jamming of Granular Media”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012.
[8] Allen Jiang, Prokar Dasgupta, Kaspar Althoefer and Thrishantha Nanayakkara, “Robotic Granular Jamming: A New Variable Stiffness Mechanism”, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.4, pp.333-338, 2014.
[9] 欧陽亦璟, “指先軸回転と剛性可変機能を備えた 3 本指ロボットの開発”, 大阪大学大学院　工学研究科機械工学専攻　金子・東森研究室　修士論文発表会, 2012/2/21.
[10] Kim, Y., Cheng, S., Kim, S., and Iagnemma, K., “Design of a Tubular Snake-like Manipulator with Stiffening Capability by Layer Jamming”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robots and Systems, 2012.
[11] Kim, Y., Cheng, S., Kim, S., and Iagnemma, K., “A Novel Layer Jamming Mechanism with Tunable Stiffness Capability for Minimally Invasive Surgery”, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 29, No. 1, pp. 1031-1042, August 2013.
[12] 多田隈 建二郎, 田中 大貴, 寺田 一貴, 大石 千種, 長谷川 浩章, 勅使河原 誠一, 明 愛国, 下条 誠, 高山 俊男, 小俣 透, 東森 充, 金子 真, “Hot-Ice 現象を活用した全方向包み込み式なじみグリッパ機構”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A2-D08, 2010.
[13] 藤本敏彰, 清水杜織, 藤田政宏, 髙根英里, 小松洋音, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “浮遊式変位・力変換メカニズム -平衡点の移動を活用した増力機構-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2P1-G14, 2018.
[14] 藤本 敏彰, 清水 杜織, 西村 礼貴, 野村 陽人, 鉄井 光, 藤田 政宏, 高根 英里, 小松 洋音, 多田隈建二郎, 昆陽 雅司, 田所 諭, “一次元ジャミング転移機構の原理考案と具現化”, SICE 東北支部第 312 回研究集会, 2017/11/24.
[15] Paul Scirica, Cathy Aranyi, “Surgical Instrument”, Appl. No.: 09/597640, Jun. 20, 2000.
[16] 渡邊悠太, カニエテルイス, 高橋隆行, “原子炉内部調査用ロボットの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2P1-R08, 2017.
[17] 藤本敏彰, 清水杜織, 藤田政宏, 髙根英里, 林聡輔, 渡辺将広, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “1 次元柔剛切替メカニズムを活用したトーラスグリッパ機構　-線状ジャミング転移機構を基軸とした構造例-”, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 3K1-01, 2018.
[18] 国際レスキューシステム研究機構　科学技術振興機構（JST）プレスリリース, “刃物のようにとがった物体でもつかめる柔軟ロボットハンドを開発　～瓦礫でも壊れない高い耐切創性・耐久性を実現～”, https://www.jst.go.jp/pr/announce/20180614/index.html, 2018/6/14.
[19] 国際レスキューシステム研究機構　科学技術振興機構（JST）プレスリリース, “炎の中のとがった物体でもつかめる数珠状の柔軟堅牢ロボットハンドを開発（世界初）　－灼熱の瓦礫も除去可能な高い耐火性・耐切創性を実現－”, https://www.jst.go.jp/pr/announce/20181025-2/index.html, 2018/10/25.