

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01347

研究課題名（和文）ロボットへ五指の物体操作技能教示を実現する機能的電気刺激を用いたバイラテラル制御

研究課題名（英文）Bilateral Control Using Functional Electrical Stimulation for Teaching Object Manipulation Skills to Robot with Five Fingers

研究代表者

境野 翔（Sakaino, Sho）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70610898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は機能的電気刺激を用いた五指の独立制御と力制御をも内包した物体操作技能の教示を目指した。まず、複数電極を用いることで示指の独立駆動を実現し、総指伸筋を用いて中指と環指を独立駆動できることを実証した。これをベースに複数電極を用いた刺激方法を二人の実験参加者に実装し、五指のバイラテラル制御をできることを実証した。また、太い物体から細い物体まで多様な物体の把持を実現できる交差型爪付きロボットハンドを開発した。これを装着したロボットに五指を用いた物体操作技能をバイラテラル制御を用いて教示した。その結果、豆腐を含む多様な食品を95%の確率で操作できる人間並の物体操作技能をロボットが獲得できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少子高齢化社会を迎える日本において肉体的労働の大幅なロボット化は急務である。そのためには人間が未知環境を操作する際に必須である力制御技能をロボットに獲得させることが必須である。これまで反力提示が可能な遠隔操作「バイラテラル制御」を用いることで人間の力制御技能データを抽出しロボットに再現できることはあらかじめになっていた。しかし、五指への力覚提示デバイスが製作困難であったため、五指の物体操作技能を教示できなかった。一方、本研究課題は人間の身体を覚提示デバイスとすることで、人間の五指を用いた物体操作技能を教示可能にした。ロボットが多様な物体の把持・操作が可能になったことを実験により実証した。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed at independent control of the five fingers using functional electrical stimulation. We also aimed to instruct object manipulation skills that also include force control. First, we realized independent drive of an index finger by using multiple electrodes, and demonstrated that the middle and ring fingers can be driven independently using the extensor digitorum muscle. Since it has been easy to drive thumbs and little fingers independently, these results allow all five fingers to be driven independently. Then, we implemented the stimulation method on two participants and demonstrated that bilateral control of the five fingers was possible.

After that, we developed a robot hand with crossed-hand structures with nails which can grasp variety of size of objects. By instructing force control skills using bilateral control, the robot acquired human-like object manipulation skills, and was able to manipulate a wide variety of objects with a success rate of 95%.

研究分野：制御およびシステム工学関連

キーワード：機能的電気刺激 制御 模倣学習

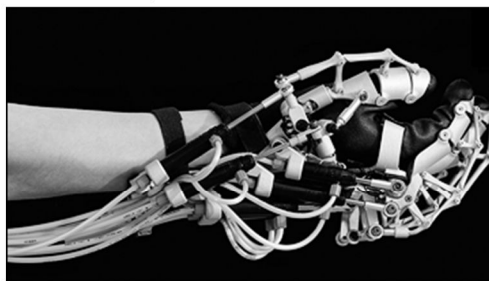
様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボットの制御では、世界を記号でモデル化し、数理を用いて行動規則を決定する。しかしそのため、未知形状物や柔軟物のように記号化困難な対象物の操作は困難を極める。例えば、農作業においては毎回微妙に形状・剛性が異なるため野菜を把持できない。工場や倉庫では少量多品種の商品に対して1品種ごとに専用のハンドが必要になる。以上の理由で未だに多くの定形作業が機械化できていない。一方、ヒトは記号化困難な実世界のインタラクションを「なんとなく」制御し、汎用的な物体操作ができる。記号論に基づいた制御体系とは全く異なる制御体系を有しているのだ。これは実世界での生命の淘汰の果に獲得した稀有な能力である。この能力をロボット制御に転用できればこれまでと一線を画するほどの大幅な肉体労働の代替が可能になるため、産業構造を変革しうるほどインパクトがある。

研究代表者はこれまで、ヒトがロボットを遠隔操作する際に反力呈示も行う「バイラテラル制御」を用いれば、ヒトの汎用的な物体操作能力をロボットへ教示できることを明らかにしている。反力呈示があることで、ヒトがロボット-環境間のダイナミクスを補償するスキルを発揮できるためだ。この際の位置と力の時系列データを収集してAIに学習させるだけで、記号化困難であった人間の暗黙知を模倣できる。

装着型ロボット



- ・大きな拘束感
- ・手指全関節の駆動はほぼ不可能

機能的電気刺激



- ・電流で反力呈示
- ・手指に装着物なし
- ・手指全関節駆動可

図1. 装着型ロボットと機能的電気刺激

しかし、理論的にはヒトの物体操作技能を模倣できることを解明したが、多数の関節を持つ手指に本手法を適用することは困難を極めた。これは図1左のように装着型ロボットは大型かつ高重量であり、手指全関節を駆動させることはほぼ不可能であるからだ。

よって、本研究の核心をなす問いは「五指の物体操作技能をロボットへ教示するバイラテラル制御とはどうあるべきか?」である。

2. 研究の目的

これまでに、研究代表者はヒトの筋を外部電流により駆動する機能的電気刺激を用いてヒトの身体を直接制御することでロボットを代替し、母指と示指を用いたバイラテラル制御を実現した。機能的電気刺激では図1右のように手指への装着物を必要とせず、原理的に手指全関節を駆動できる。すなわち手指を用いた物体操作技能を教示できるはずである。

しかし、実際に五指全てを駆動しようとすると、前腕部の筋群は複雑に入り組んでおり、特定の筋のみを駆動することは困難であった。これまで図1右のように多数電極を用いて動作に応じて入力電極を切り替えれば対応できることは報告されているが、これはリハビリを目的としたON/OFF制御であるためトルク制御が必要なバイラテラル制御は不可能であった。

よって、本研究課題では五指のトルク制御を実現し、バイラテラル制御を実現することで人間の五指を用いた技能動作を教示できるようにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 手指の多自由度制御技術の確立

機能的電気刺激を用いた手指の制御において、母指と小指は筋が他の指と分離されているため独立駆動しやすいが、示指、中指、環指は筋が近接しているため独立駆動が困難であった。よって、まずは手指を独立駆動させるための刺激方法を解明する。これは、試行錯誤的に最適な刺激箇所「モータポイント」を探すことになる。前腕の筋に関して適宜電圧を印加することで、最も反応の良い場所を探索するのである。次に、入力電圧から発生トルクまでの伝達関数を同定し、刺激方法の相違による発揮トルクや動特性の相違などを検討する。最後に得られたモデルをもとに制御系を開発し、高速かつ高精度のバイラテラル制御を手指で実現することを目指す。

(2) 手指の物体操作技能のロボットへの教示

次に、人間の物体操作技能をロボットに教示できることを実証する。そのためには、ロボットのハンド自体を改良したうえで手指を駆動する技能をロボットにバイラテラル制御を用いて教示する。教示した動作データをもとにニューラルネットワーク学習させることで、人間のように手指の巧みな技能動作を再現可能なロボットを実現する。この際、技能動作の再現に適したニューラルネットワークの構造などを従来手法などと比較検討したうえで決定する。

4. 研究成果

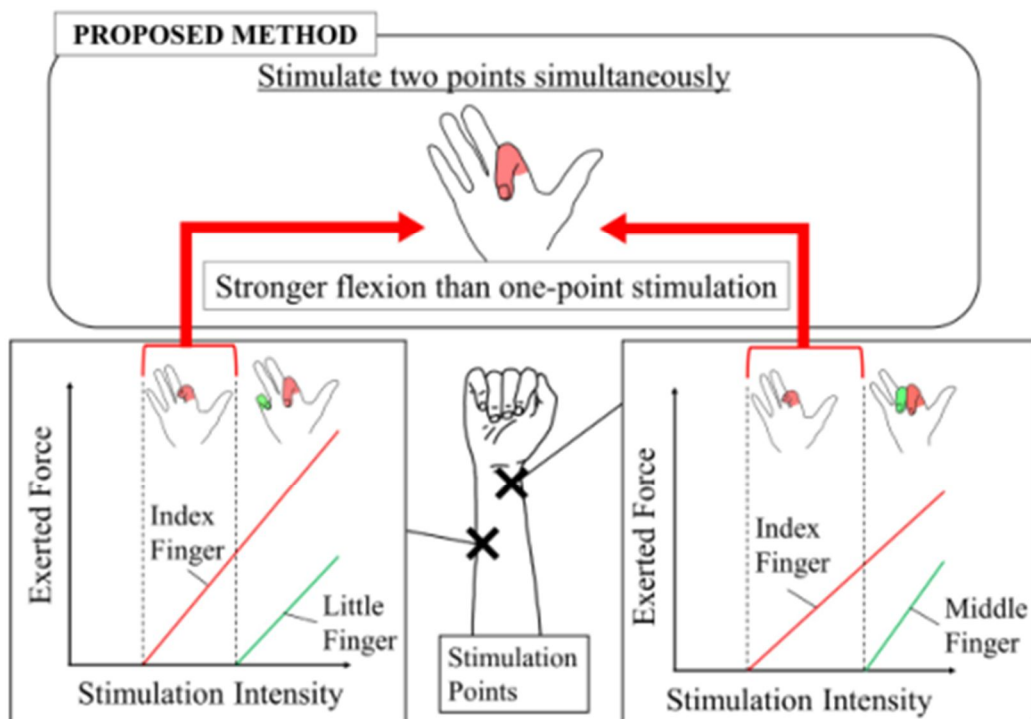


図2 示指の多点電極を用いた独立駆動

本研究ではまず、各指を独立に駆動できる選択性と指での発揮トルクを両立するための刺激方法を評価し、選択性と発揮トルクを両立するための条件をあきらかにした。図2に示すように、特に他の指との干渉の大きい示指について、複数の筋を同時に刺激する際の刺激電極間の位相差の影響を評価した。実験結果より、位相差を大きくすると選択性が向上し、位相差を小さくすると発揮トルクが向上することが統計的に示された。また、刺激中に各電極間を導通させる場

合と開放させる場合でも比較を行い、導通させた場合にのみ有意な発揮トルクの向上があることを明らかにした。さらに、図3に示すように、1点刺激から比べて多点刺激を用いると回内動作に対する高いロバスト性を得られることも確認した。

続いて、中指と環指を独立に駆動するための制御方法を開発した。中指と環指は屈筋を独立に刺激できるが、伸筋はどちらも共通した総指伸筋により構成される。よって、制御時には中指と環指の駆動トルクの干渉が発生する。そこで、本研究では屈筋と伸筋の差動トルクを用いて環指の駆動トルクを独立化した。これはすなわち、屈筋と伸筋を同時に刺激することを許容することを意味している。この差動トルクを用いて手指の位置追従実験を行った結果、制御時の二乗平均平方根誤差が中指で17%、環指で39%低減するという著しい結果を得た。よって、この刺激方法を用いて二人の実験参加者の中指と環指を同期するようにバイラテラル制御を実装した結果が図4、5である。この図からわかるように、中指と環指を独立して同期させることに成功した。その一方で、リーダの応答にフォロワの応答が完全追従しているわけではなく制御性能の向上が必要であることが確認された。そのためには、正確なシステムモデリングや疲労などに対応可能な制御系の開発などが必要である。

以上のように、これまでトルク制御可能であった母指、小指に加えて示指、中指、環指もトルク制御可能になり、五指を独立にトルク制御するという当初の目的は達成された。

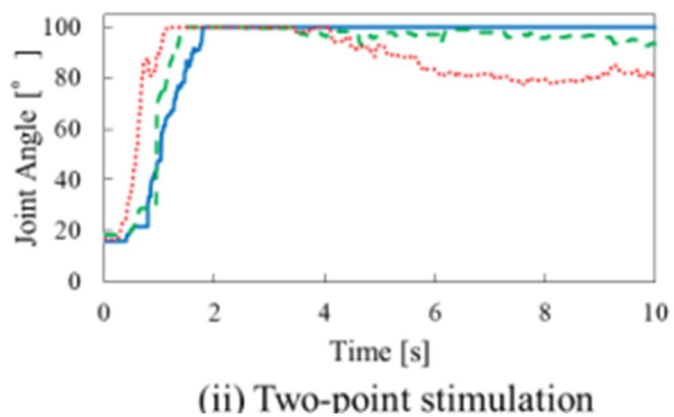
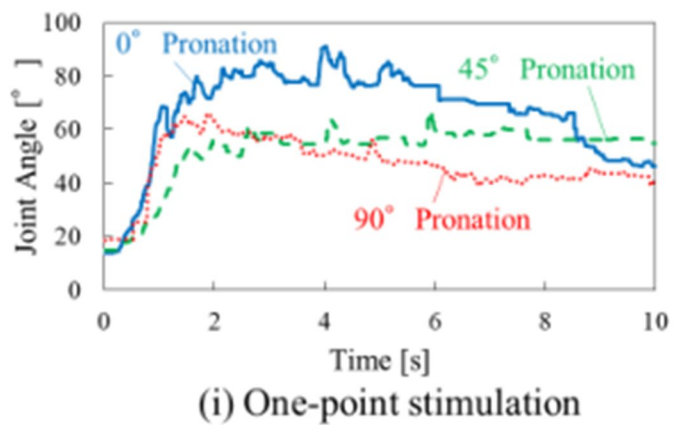


図3. 多点刺激の回内運動に対するロバスト性

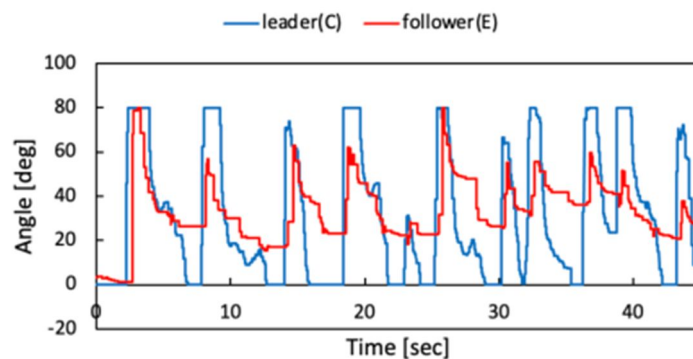


図4. 中指と環指のバイラテラル制御(中指応答)

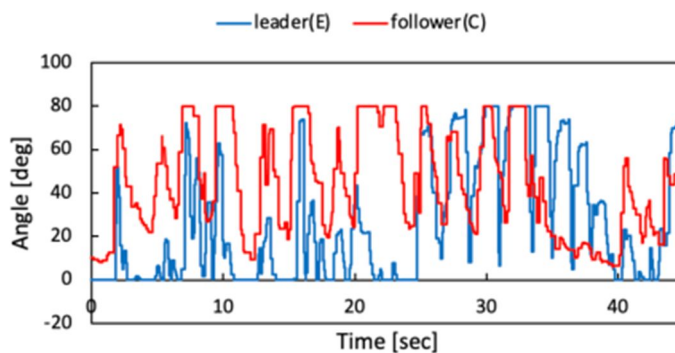


図5. 中指と環指のバイラテラル制御(環指応答)

よって、これをさらに発展させ、手指を用いた物体操作技能をロボットに教示した。ここでは図6に示す交差型爪付きハンドを作ることで、細いものから太いものまで把持可能にし、このハンドに対して力制御可能な模倣学習を用いて技能教示することで人間のような物体操作を実現した。表1にその結果を示す。ポテトチップスや豆腐などを含む把持が非常に困難な物体ですら100%の成功率で操作し、図6で開発したハンドと力を制御できる模倣学習を統合することの有効性を実証した。

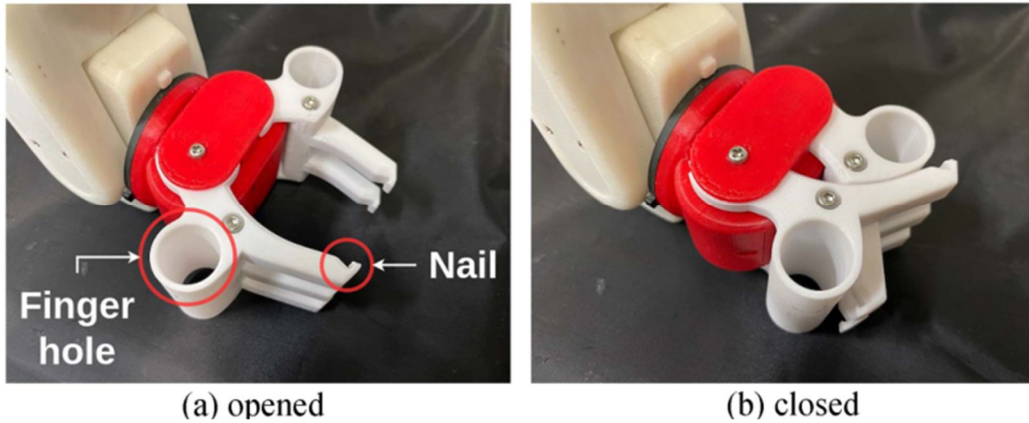


図6. 交差型爪付きハンド

表1. 物体操作成功率

このハンドを用いて、IEEE ICRA2024中に開催された唐揚げやイクラ丼を盛り付ける国際コンペティションである Food Topping Challenge に参加した結果、唐揚げ部門では準優勝、イクラ丼部門では優勝を飾り、その性能の高さを世界的に示すこととなった(図7)。

以上のように当初の目的である機能的

	Test object		Success rate	
	name	weight [g]	F2FL (proposed)	F2FL-w/o-Force
	pen	7.8	60	0
	block	50.9	100	80
	cutter	77.8	100	40
	cracker	3.4 ~ 3.5	100	0
	egg	49.1 ~ 54.4	100	0
	cloth	28.0	80	40
	baumkuchen	21.7 ~ 21.9	100	60
	rice ball	73.9 ~ 75.1	100	60
	roll cake	35.9 ~ 38.8	100	20
	tofu	60.0 ~ 70.0	100	100
	potato	93.7 ~ 131.1	100	40
	nuts	0.9 ~ 2.8	100	20
	potato chips	0.8 ~ 1.8	100	20
	pineapple	14.6 ~ 23.4	100	60
	blueberry	1.1 ~ 2.4	60	100
	mushroom	5.0 ~ 22.7	100	60
	mini tomato	11.1 ~ 22.3	100	60
	fried potato	2.7 ~ 22.9	100	80
	sushi	23.1 ~ 31.2	100	80
	shrimp	5.1 ~ 6.8	100	60
	Total		95	49

電気刺激を用いた五指のトルク制御に成功したばかりか、五指を用いた技能動作をロボットに教示することにも成功し、当初の予定を大幅に上回る成果を得たと認められる。



図7. イクラ丼の盛付

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 山根 広暉, 七種 勇樹, 境野 翔, 辻 俊明	4. 巻 41
2. 論文標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による三次元曲面拭き動作の学習	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 395 ~ 398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.41.395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山根 広暉, 境野 翔, 辻 俊明	4. 巻 -
2. 論文標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による複数物体の同時把持	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamane Koki, Saigusa Yuki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Soft and Rigid Object Grasping With Cross-Structure Hand Using Bilateral Control-Based Imitation Learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 1198 ~ 1205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2023.3335768	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akagawa Tetsuro, Sakaino Sho	4. 巻 12
2. 論文標題 Autoregressive Model Considering Low Frequency Errors in Command for Bilateral Control-Based Imitation Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 26 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22002155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuhiko Hamana, Minami Kawashima, Sho Sakaino, Toshiaki Tsuji	4. 巻 10
2. 論文標題 Selective Drive and Control of Index Finger Joint Using Multipoint Functional Electrical Stimulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 112444 ~ 112459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3215515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Saigusa Yuki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Imitation Learning for Nonprehensile Manipulation Through Self-Supervised Learning Considering Motion Speed	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 68291 ~ 68306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3185651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minami Kawashima, Tatsuhiko Hamana, Sho Sakaino, Toshiaki Tsuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Position Control of Two Finger Joints Using Functional Electrical Stimulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 REHAB WEEK 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Kazuki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 10
2. 論文標題 An Independently Learnable Hierarchical Model for Bilateral Control-Based Imitation Learning Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 32766 ~ 32781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3155255	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakaino Sho, Fujimoto Kazuki, Saigusa Yuki, Tsuji Toshiaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Imitation Learning for Variable Speed Contact Motion for Operation up to Control Bandwidth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society	6. 最初と最後の頁 116 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJIES.2022.3149333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Sho Sakaino, Nozomu Masuya, Hiroshi Sato, Koki Yamane, Takuya Kusume, Masashi Konosu, Naoto Imazu
2. 発表標題 Practical Implementations of Bilateral Control-Based Imitation Learning at iREX2023
3. 学会等名 the 10th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koki Inami, Koki Yamane, Sho Sakaino
2. 発表標題 Loss Function Considering Dead Zone for Neural Networks
3. 学会等名 the 18th IEEE International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koki Yamane, Sho Sakaino, Toshiaki Tsuji
2. 発表標題 Imitation Learning Inputting Image Feature to Each Layer of Neural Network
3. 学会等名 the 18th IEEE International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山根広暉, 境野翔, 辻俊明
2. 発表標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による複数物体の同時把持
3. 学会等名 第41回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 境野翔
2. 発表標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習の応用事例
3. 学会等名 2023年電気学会産業応用部門大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 榎屋望, 赤川徹朗, 山根広暉, 楠目琢也, 境野翔, 辻俊明
2. 発表標題 拘束条件を考慮したバイラテラル制御に基づく模倣学習
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楠目琢也, 榎屋望, 赤川徹朗, 山根広暉, 境野翔, 辻俊明
2. 発表標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による計量タスクの実現
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤川徹朗, 七種勇樹, 境野翔
2. 発表標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による斜面の拭き動作
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山根広暉, 七種勇樹, 境野翔, 辻俊明
2. 発表標題 バイラテラル制御に基づく模倣学習による三次元曲面拭き動作
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤川徹朗, 境野翔
2. 発表標題 画像認識とバイラテラル制御に基づくコンベアピッキングタスクの模倣学習
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sho Sakaino
2. 発表標題 Bilateral Control-Based Imitation Learning for Position/Force Hybrid Motion Generation
3. 学会等名 the 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sho Sakaino
2. 発表標題 Bilateral Control-Based Imitation Learning for Velocity-Controlled Robot
3. 学会等名 the 30th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜名 竜大
2. 発表標題 複数の刺激波形を用いた機能的電気刺激による手指関節の駆動
3. 学会等名 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 境野 翔
2. 発表標題 ハプティクスに基づく模倣学習によるロボットの汎用物体操作
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2024年5月に行われた食品盛り付けコンペティションであるFood Topping Challengeでは、唐揚げ部門では準優勝、イクラ丼部門では優勝した。いずれの部門においても上位チームは専用ロボットハンドを作り込んできたが、申請者のチームはどちらの部門も全く同一の汎用ロボットを使用し、専用ロボットハンドどころか治具すら使用しなかった。イクラ丼部門では人間のように道具(お玉)を使ってイクラ丼を盛り付け、2位より20%以上短いタクトタイムで優勝した。唐揚げ部門においても動作速度は1位であった。これは、位置制御と力制御の双方を十全に活用したことで、食品のような不定形物でも容易に操作できたからだ。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	原 正之 (Hara Masayuki) (00596497)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関