

令和 6 年 9 月 25 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01280

研究課題名（和文）人の技能動作に干渉しない運動解析基盤の構築

研究課題名（英文）Construction of a motion analysis system with less interference with skillful movements

研究代表者

辻 俊明（Tsuji, Toshiaki）

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60434031

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）：人の技能運動の解析と模倣を行うための新しい運動解析技術を開発した。従来は人の技能動作への力学的干渉が課題であった。それに対して本研究では、(1)小型力覚センサの開発、(2)運動解析技術に基づく分節化手法の確立、(3)模倣学習に基づく技能動作の実現、を行った。小型で高性能な力覚センサを開発し、力と位置情報から技能動作を分節化する手法を確立した。また、力センサの周波数情報を用いた模倣学習により、高い再現性が得られることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の運動解析システムが持つ力学的な干渉の問題を克服し、人の繊細な技能運動を正確に解析・再現できる新しいシステムを提案した。小型で高性能な力覚センサと、力・位置情報から動作を分節化する手法、力センサの周波数情報を活用した模倣学習技術によって、これまで困難であった繊細な力加減を伴う高度な技能動作の解析と再現が可能になった。人の技能の解析はロボット工学のみならず認知科学や理学療法学、スポーツ工学等に応用しうる技術であり、学術的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：We developed a new motion analysis technique to capture the nuances of human skilled movements without mechanical interference. Key achievements include: (1) A compact, high-performance force sensor comparable to commercial sensors. (2) A segmentation algorithm using time derivatives of force/torque signals, effectively segmenting skilled motions. (3) Imitation learning utilizing frequency information from force sensor responses, enabling accurate force detection and real-time force control during skilled tasks.

研究分野：ロボット工学

キーワード：運動解析 模倣学習 自動化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2010年代に機械学習技術が広く浸透したのに伴い、ロボティクス分野でも人に学んで技能運動を実現する模倣学習の研究が活発である。一方、認知科学や療法学、スポーツ科学の分野ではモーションキャプチャの浸透により人の運動の解析技術が日進月歩の発展を見せている。これらはいずれも人の動作の記録装置が必要であるが、その技術はロボットのような力学デバイスを介するものとモーションキャプチャのように外界センサにより観測するものに二分される。

モーションキャプチャを利用した運動解析システムは、道具を介した力加減を取得できないため、歩行時や作業中の姿勢の運動学的解析に用途が限定される。一方、ロボットを介した運動解析はロボットの質量、摩擦、剛性等に依存する身体的制約を人が受けながら実施することになり、ロボットの身体性が技能運動に干渉せざるを得ない。そのため運動解析技術は細やかな力加減の調整が必要な技能運動を解析できない状況にある。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本事業では模倣学習分野の核心をなす問いとして、運動解析システムの力学的干渉によって損なわれていた人の技能運動の繊細な特徴量を取得したらどこまでロボットの能力が向上できるかを検証した。そのために技能動作への干渉を極限まで抑制した運動解析システムを開発し、繊細な力加減の技能運動をロボットで再現することを目指した。

主な研究項目は以下の3点である。(1) 技能運動に干渉しないよう運動解析システムに力覚検知メカニズムを実装するための力覚センサの小型化、(2) 観測型運動解析システムから技能動作の特徴量を抽出する分節化技術の確立、(3) 技能動作の再現性を検証するための模倣学習技術の確立。

### 3. 研究の方法

#### (1) 小型力覚センサの開発

運動解析装置の基礎となる力覚センサを小型化することで技能動作への干渉を低減することを試みた。微細な力から大きな力まで計測できるハイダイナミックレンジ力覚センサの従来技術では起歪体を2つ重ねるため、サイズが大きくなることが課題であった。それに対して、感度の異なる2種類の歪ゲージを採用することで小型化が実現されることを1軸、6軸の両方で実証した。

(雑誌論文[9][10])

そして、起歪体の構造を簡易化することによって安価かつ小型の力覚センサを構築する技術を実現した。そしてこれらのセンサが商用センサに準じる性能を持ちうるかを検証した。

(雑誌論文[1][3])

併せて更なるセンサデバイスの小型化の位置アプローチとして、筋音計測に基づく運動解析の可能性を検討した。運動解析で人の筋肉の活動を取得する必要がある場合には表面筋電位の計測技術がしばしば利用されるが、プローブの貼付が現場における利用度を制約することから筋電位計測よりも利便性が向上する可能性がある。

(雑誌論文[6])

#### (2) 運動解析技術に基づく分節化

観測型の運動解析装置を用いて人の技能運動を記録、特徴量抽出する技術を開発した。位置を計測する運動解析装置に力を計測するメカニズムを追加し、位置のみでなく力の情報を併合して技能動作を分節化する手法を提案した。

まず、力と位置の複合情報によって教師あり分節技術の性能が向上することを示し、その技術を応用して教師なし分節化技術へと発展させた。分節のラベルを与えることで分節性能は向上するが、実演教示のデータからプログラマが介入せずに模倣学習できるようになることが望ましい。そこで、BOCPDと呼ばれる信号処理技術に力と力の微分情報を与えることで教師なし分節の信頼性向上を狙った。教師なし分節の従来法として広く用いられているZVCという手法との比較によりその性能を実証した。

(雑誌論文[2][4])

#### (3) 模倣学習に基づく技能動作の実現

得られた特徴量をもとに技能動作を再生する模倣学習技術を開発した。

(雑誌論文[5][7][8])

接触状態の変化や環境の変動を検知し、動作生成に利用することでより難易度の高いコンタクトリッチタスクが遂行可能になるが、そのためには接触の特徴量の取得が有効である。しかし

力の特徴量は多くの場合ノイズに対して小さく、かつ個体差や試行毎の差が大きい。周波数変換はノイズと特徴量の分離に有効であることが、対数変換はスケールの異なる特徴量の抽出に有効であることがそれぞれ知られている。この知見に基づき、周波数変換と対数変換の組み合わせであるメル周波数スペクトラムを力の時間応答から導出し、周波数情報に基づく回帰分析によってタスクに必要な特徴量の高い精度での導出を実現した。

文献[5]では特に高い時定数での推定が難しい研磨の研削負荷の推定に上記の技術を応用した。研磨作業のような工具の振動を伴う加工作業では、振動周波数が接触力と強い相関を持つ。この特性に着目し、力覚センサの応答値の周波数情報に基づく接触力検出手法を提案した。接触力検出モデルには、接触力と周波数情報の非線形関係、接触力のタスクの状態に応じた時間変化を考慮し、1D-CNNを用いたNNベースのモデルを採用した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 小型力覚センサの開発

開発した小型力覚センサを図1に示す。直方体の起歪体の側面に2つの穴をあける簡易な加工で起歪体が構築可能であることを実証した。また、起歪体が外力に対して最も大きく歪む箇所を特定し、歪ゲージをその特定の箇所に貼付することで高い感度を維持できることを実証した。図2にその性能評価試験の結果を示す。商用センサに準じる非線形誤差とヒステリシス誤差を持つことが実験的に示された。

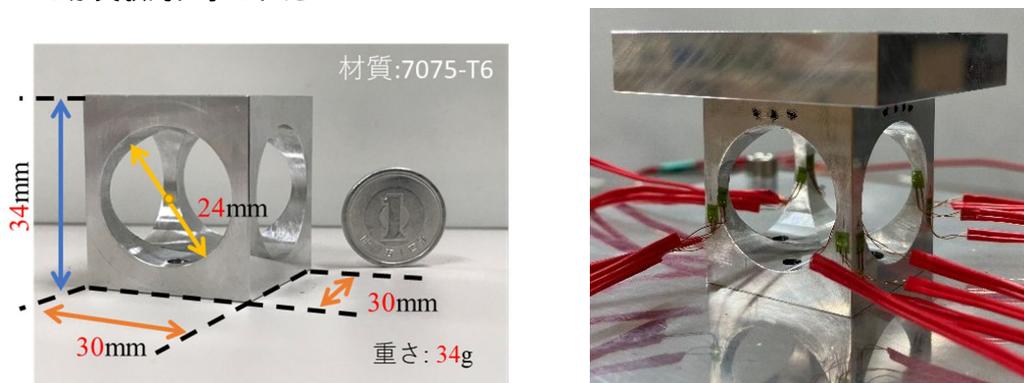


図1 小型化された6軸力覚センサ

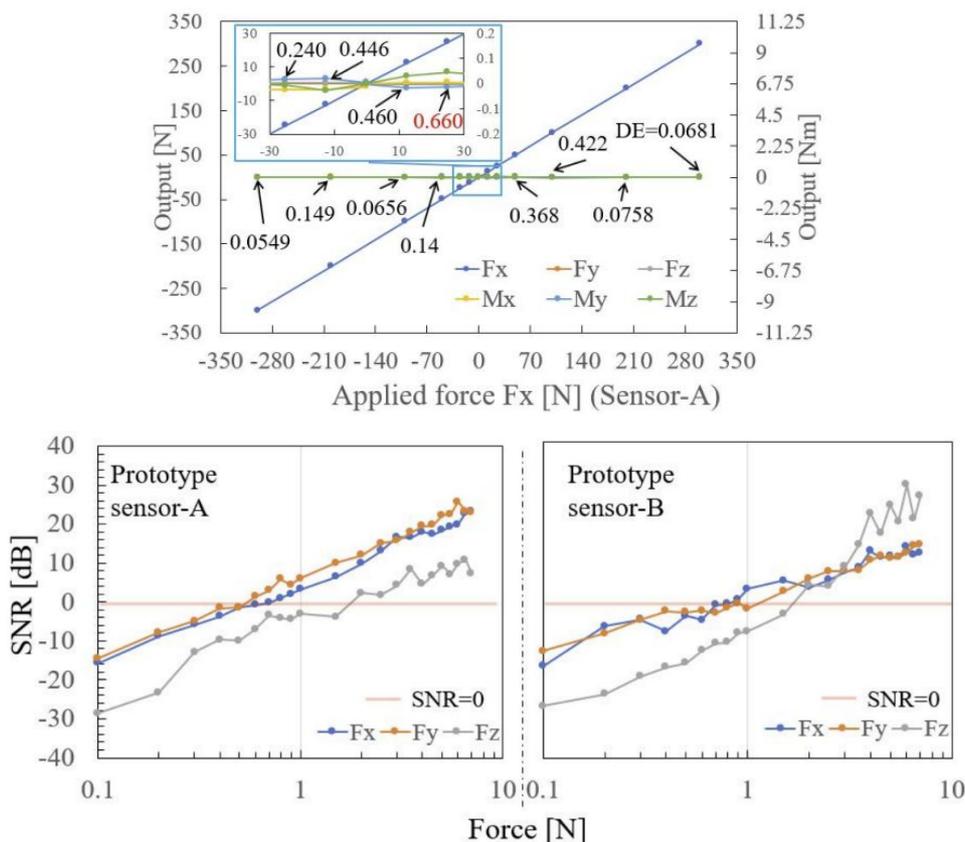


図2 力覚センサの性能評価試験の結果

## (2) 運動解析技術に基づく分節化

時間微分処理を用いた特徴量抽出を行い，実演作業中に取得した6軸の力/トルク信号の時間微分値に基づいて，分割点を検出するアルゴリズムを開発した．提案手法の有効性を，ペグインホールタスク・文具の蓋装着タスク・栓抜きタスクで評価した実験を行い，その結果から力とトルクの時間微分値を用いた動作分割が有効であることを実証した．

図3は観測型の運動解析システムを用いて各タスクの運動解析を行っている様子を示している．図4にペグインホールタスクにおける真陽性(TP)，偽陽性(FP)とF1-scoreを示す．運動の分節に広く用いられるZVCや従来法であるBOCPDの様々な候補と比較して提案法が低い偽陽性と高いF1-scoreを示すことが実証された．また，図に示される他のタスクのF1-scoreから他のタスクにおいても同様の結果が得られることが確認された．

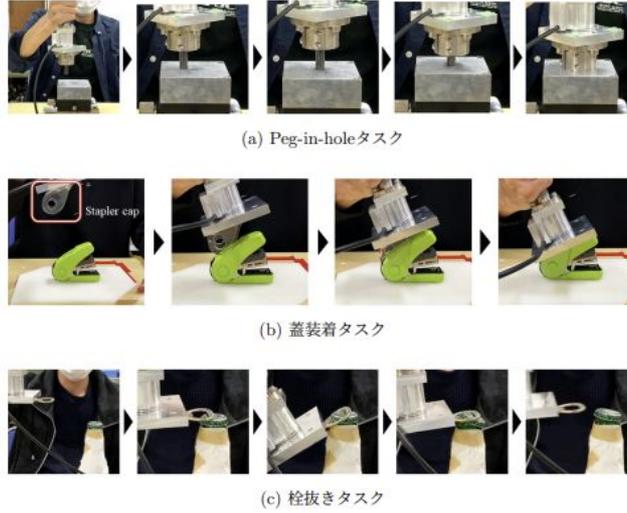


図3 各タスクでの運動解析の様子

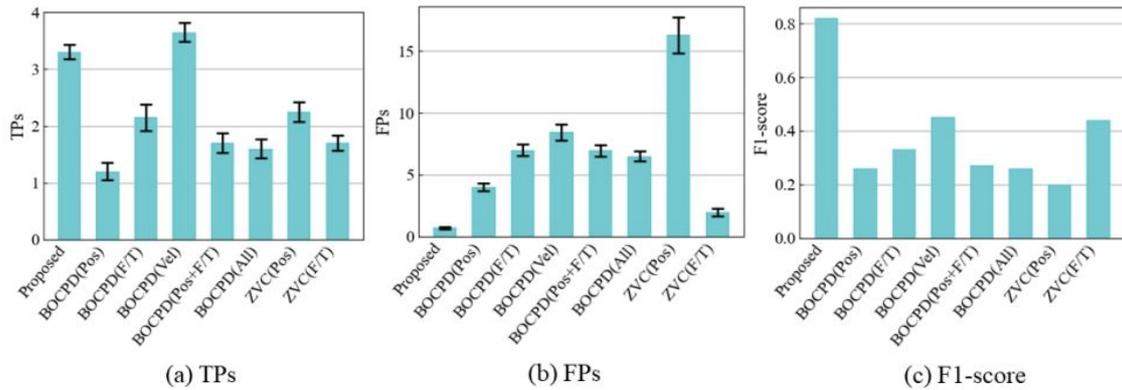


図4 Peg-in-hole タスクの分節化性能

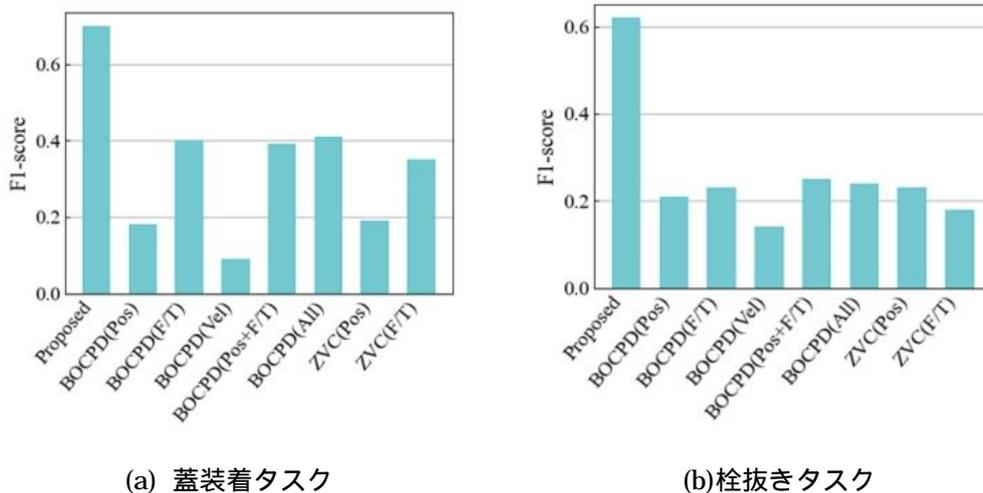


図5 複数タスクにおけるF1スコアの比較

### (3) 模倣学習に基づく技能動作の実現

図 6 に示す研磨装置でマニピュレータの先に取り付けたグラインダで研磨するタスクで検証を行った。図 7 は研磨中の力センサの応答値(a)，その値にローパスフィルタを実装した値(b)，力センサの応答値のメルスペクトラムを導出した結果(c)をそれぞれ示している。左は 1N, 右は 4N の負荷を加えた時の結果であるが，特に小さい力での計測時にはグラインダの振動によるノイズが大幅に性能を劣化させる。それに対してメルスペクトラムの結果は研削負荷の変動に依存したグラインダの回転数の変動を正確に抽出していることを示している。

実験による性能の検証を行った結果を表 1 に示す。研削負荷と回転数の相関を時間遅れニューラルネットワークで推定することによってオフセットのような力覚センサ特有の誤差の影響が低減し，接触力をより正確に検出できることが示された。周波数情報を NN モデルの入力に用いる場合，検出値と実際の応答値の間の時間遅れが問題となる。この問題に対しては，力応答の変化量を用いて補償することが可能である。提案する接触力検出手法を用いた力制御では，力応答値からオフセットを実時間で除去し，正確な力制御となることが示された。

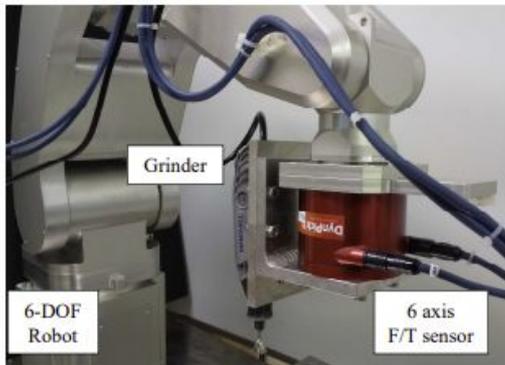


図 6 研磨装置

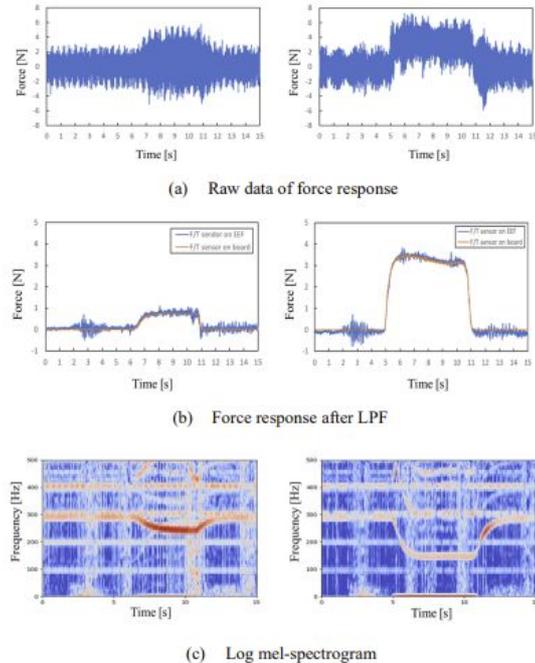


図 7 研磨の力計測とメルスペクトラム

表 1 研磨の力計測の誤差

	LPF(5Hz)	FNN	CNN	CNN+MS
オフセットなし		0.107	0.081	
オフセットあり	1.91	1.57	1.56	0.286

### (4) まとめ

既存の運動解析システムが持つ力学的な干渉の問題を克服し，人の繊細な技能運動を正確に解析・再現できる新しいシステムを提案した。小型で高性能な力覚センサと，力・位置情報から動作を分節化する手法，力センサの周波数情報を活用した模倣学習技術によって，これまで困難であった繊細な力加減を伴う高度な技能動作の解析と再現が可能になった。人の技能の解析はロボット工学のみならず認知科学や理学療法学，スポーツ工学等に応用しうる技術であり，学術的意義が大きい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 T. Kawahara and T. Tsuji	4. 巻 9
2. 論文標題 Development of an easy-to-cut six-axis force sensor	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 563 ~ 570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2023.3335774	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 K. Sugawara, S. Sakaino, and T. Tsuji	4. 巻 8
2. 論文標題 Unsupervised human motion segmentation based on characteristic force signals of contact events	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6203 ~ 6210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2023.3303828	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 T. Kawahara and T. Tsuji	4. 巻 35
2. 論文標題 Development of High Dynamic Range Six-Axis Force Sensor with Simple Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 771 ~ 779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p0771	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 Y. Kato, S. Sakaino, and T. Tsuji	4. 巻 12
2. 論文標題 Motion Planning for Cutting Flexible Objects Based on Contact State Recognition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 786 ~ 792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.22004392	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 Nogi Yuya, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Contact Force Detection of Grinding Process Using Frequency Information and Differential Feature on Force Signal	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.2022.3226260	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 Hondo Nobuhiro, Tsuji Toshiaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Torque Estimation of Knee Flexion and Extension Movements From a Mechanomyogram of the Femoral Muscle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	6. 最初と最後の頁 1120 ~ 1126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSRE.2022.3169225	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 Nogi Yuya, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Force Control of Grinding Process Based on Frequency Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3250 ~ 3256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3146578	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 Horikoshi Tomoki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 7
2. 論文標題 High Dynamic Range Force Sensing of a Robot Hand Combining Signals on Tip and Wrist	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3210 ~ 3217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3146512	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 Tamura Ryuya, Horikoshi Tomoki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki	4. 巻 6
2. 論文標題 High Dynamic Range 6-Axis Force Sensor Employing a Semiconductor-Metallic Foil Strain Gauge Combination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6243 ~ 6249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3093008	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 R. Tamura, S. Sakaino, and T. Tsuji	4. 巻 5
2. 論文標題 High Dynamic Range Uniaxial Force/Torque Sensor Using Metal Foil and Semiconductor Strain Gauge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 506 ~ 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejia.20007411	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 T. Kawahara and T. Tsuji
2. 発表標題 Development of an easy-to-cut six-axis force sensor
3. 学会等名 ICRA2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Sugawara, S. Sakaino, and T. Tsuji
2. 発表標題 Unsupervised human motion segmentation based on characteristic force signals of contact events
3. 学会等名 ICRA2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Horikoshi, S. Sakaino, and T. Tsuji
2. 発表標題 High Dynamic Range Force Sensing of a Robot Hand Combining Signals on Tip and Wrist
3. 学会等名 ICRA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nogi, S. Sakaino, and T. Tsuji
2. 発表標題 Force Control of Grinding Process Based on Frequency Analysis
3. 学会等名 ICRA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsuji Toshiaki, Kusakabe Tsukasa
2. 発表標題 Probabilistic Approach to Online Stiffness Estimation for Robotic Tasks
3. 学会等名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tamura Ryuya, Horikoshi Tomoki, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki
2. 発表標題 High Dynamic Range 6-Axis Force Sensor Employing a Semiconductor-Metallic Foil Strain Gauge Combination
3. 学会等名 IROS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koyo Sato, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki
2. 発表標題 A Force Recognition System for Distinguishing Click Responses of Various Objects
3. 学会等名 IROS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsukasa Kusakabe, Sakaino Sho, Tsuji Toshiaki
2. 発表標題 A Design Method for Non-Diagonal Stiffness Matrix in Admittance Control
3. 学会等名 ICCAS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

提案技術を国際ロボット展で展示し新聞、雑誌等にその内容が掲載された。

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	本道 伸弘  (Hondo Nobuhiro)  (10867344)	人間総合科学大学・保健医療学部・助教    (32419)	

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
---------	---------