

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：33908

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17833

研究課題名（和文）文楽人形のカラクリとその序破急を用いた人型コミュニケーションロボットの設計と開発

研究課題名（英文）Interactive humanoid robot design using Bunraku puppet structure and Jo-ha-kyu Principle

研究代表者

董 然 (Dong, Ran)

中京大学・工学部・講師

研究者番号：80879891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、日本の伝統芸能「人形浄瑠璃文楽」の動作と感情表現をロボットに応用することを目的としている。モーションキャプチャを用いて人形の動作を解析し、感情表現技法を特定した。特に、伸縮や胸関節の動きが義太夫の声や三味線の音と同期し、序破急のメカニズムと関連していることを確認できた。文楽人形のカラクリをロボットに実装し、伸縮技法を表現できるロボットを開発した。さらに、ヒルベルト・ファン変換を用いた周波数領域でのモーション解析と深層学習を組み合わせた手法を提案し、ロボットに文楽人形の繊細な動きをモータ性能に合わせて実装できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、文楽人形のカラクリをロボットの構造に取り入れることで、初めて序破急メカニズムに合わせた伸縮技法を表現できるロボットの開発を試みた。得られた知見は、ロボットインタラクションデザインに日本の伝統芸能の視点から新たなフレームワークを提供できる。また、モーション生成における周波数空間と深層学習の融合は、ヒューマノイドの自立的なインタラクション生成に寄与し、今後、人間社会に導入されるAIアシスタントの普及に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）： This study aims to apply the movements and emotional expressions of the Japanese traditional puppet theater "Ningyo Joruri Bunraku" to robotics. Using motion capture, we analyzed the puppet's movements and identified techniques for emotional expression. Specifically, we confirmed that the puppet's stretching and chest joint movements synchronize with the voice of the Gidayu (narrative chanting) and the sound of the shamisen (three-stringed instrument), and are related to the mechanism of Jo-Ha-Kyu (a traditional Japanese concept of modulation). We implemented these Bunraku puppet mechanisms into a robot, developing a robot capable of expressing the stretching techniques. Furthermore, we proposed a method combining motion analysis in the frequency domain using the Hilbert-Huang Transform with deep learning, enabling the robot to perform the delicate movements of Bunraku puppets, optimized to the motor performance.

研究分野： 知能ロボティクス

キーワード： ロボティクス 周波数解析 深層学習 人形浄瑠璃 ヒューマンロイド インタラクションデザイン
伝統芸能 序破急

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人型ロボットが人間と交流する際、ロボットの間人らしさが増すと「不気味の谷」という現象が生じることがある。この現象は、ロボットなどの人工物が人間に似ているほど、見る人に不快感を与えることを指す[1]。この理論は、**Maya B. Mathur**らの心理学者によって実証されている[2]。

また、ユネスコの無形文化遺産である「人形浄瑠璃文楽」では、**3**人の人形遣いが独特なカラクリと操作技法を用いて一体の人形を操る。人形遣いは人形の所作を、義太夫と三味線の奏者による義太夫節に合わせて、序破急と呼ばれる日本伝統芸能のメカニズムを用いて感情表現を行う[3]。この技法は、人形が不気味の谷現象を乗り越える助けとなる可能性があるとされている[1]。さらに、この技法は人形のカラクリと深く関連しており、ロボットのインタラクションデザインにおいて新たな可能性を開くと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、日本独特の「文楽」の三要素である「文楽カラクリ」、「文楽人形の感情表現の匠」、「序破急メカニズム」を基に、柔軟な新型ロボットの骨格設計と、それに合わせた人工感情表現の構築を行う。これにより、不気味の谷現象を克服した人型 **AI** アシスタントのインタラクションデザイン法を確立することを目指す。本研究の目的は以下の二点である：

人形浄瑠璃の感情表現を「文楽カラクリ」、「文楽人形の感情表現の匠」、および「序破急メカニズム」を通じて物理的・数学的に解明する。

文楽人形のカラクリを取り入れた人型ロボットを開発し、これを用いた感情表現インタラクションのデザイン手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 周波数領域における感情表現メカニズム解析・抽出

人形浄瑠璃の基本所作には、<型>と呼ばれる美しいモーションプリミティブがあり、義太夫節に合わせて演じられる。本研究では、キャプチャされた義太夫と三味線の音、およびそれに合わせた細かい感情表現(伸縮と「円」の動き)を対象に、ヒルベルト・ファン変換[4]を用いて周波数領域でそれらのモーションプリミティブの解析を行う。これにより、序破急メカニズムおよび文楽人形所作の匠を深層学習で編集可能な非線形モードに分解する。

(2) 深層学習を用いた次元削減された人形所作空間(モーションマニフォールド)の抽出とモーション生成

浄瑠璃人形の動きは、各々が立体的で美しいアークを描きながら、速度を義太夫の語りに合わせて変化させる。この技法は序破急に基づいており[3]、世界中のどの舞台表現の動きにも見られない繊細な制御が行われている。序破急とは、時系列での音声の大きさ、動きの速さやテンポの変化などの刺激を指す[3]が、本研究では動きと音声のテンポに焦点を当てる。この技法は文楽人形のカラクリ構造と深く関連しており、このエッセンスを抽出するために、解析された周波数成分を用いて文楽人形の感情表現の所作空間を抽出する。

本研究では、畳み込みネットワークオートエンコーダ[5]を活用し、文楽人形の感情表現モーションを時間窓で捉え、周波数領域に分解して解空間を求める手法を提案する。

(3) 文楽人形のカラクリを取り入れたロボットの実装

訓練されたニューラルネットワークをロボットに適用するには、文楽のカラクリ構造を有し、感情表現の技を具現化できるロボットの構造が必要である。このためには、人形の感情表現に適した伸縮性のある骨格や、円形(8の字形)の動きを可能にする胸関節の構造が求められる。本研究では、ロボットの制御条件に文楽人形のメカニズムを取り入れ、そのカラクリを活かした構造で感情表現の所作を実装する。

4. 研究成果

(1) ヒルベルト・ファン変換を用いた感情表現メカニズム解析

まず、文楽人形の動作解析を行った結果、人形の伸縮運動や胸関節の動きが義太夫の声や三味線の音に同期していることが明らかになった。また、ヒルベルト・ファン変換を用いて文楽人形の「ホド」「ズ」という独特のリズムを解析し、このリズムが序破急の表現方法と関連している

【1 研究目的，研究方法など(つづき)】

ことを確認した。

図1は，序破急に基づいた感情表現メカニズム解析の結果を示している．図(a)は音声のテンポ変化を示し，図(b)は人形のモーションのヒルベルト・ファン変換解析を示している．この結果から，音のテンポが速くなると同時にモーションスペクトルの周波数も大きくなることを確認できる．これは，人形モーションの速さが音のテンポの変化に合っていることを意味しており，本研究で数値的に確認できた．

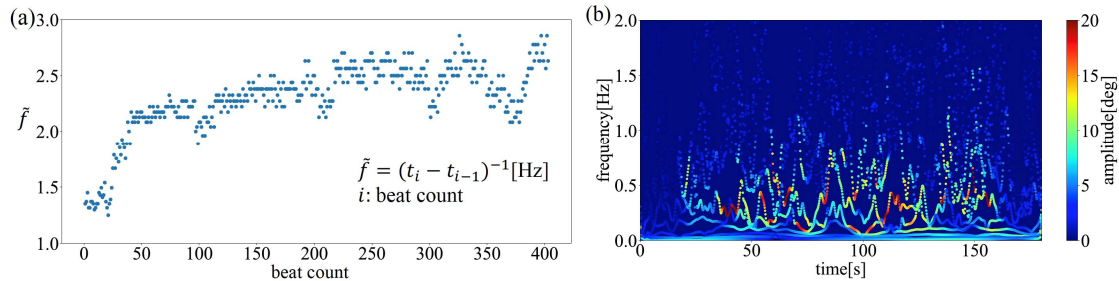


図1 序破急に基づいた感情表現メカニズム解析

(a) 義太夫と三味線の音のテンポ (b)人形モーションのヒルベルト・ファン変換解析

次に，この序破急のインタラクションメカニズムを基にして，CGキャラクターアニメーションのモーションデザインを行い，その有用性も検証した．

(2) 深層学習を用いた周波数領域でのモーション生成手法の開発

深層学習に基づいたモーション生成手法が，近年のモーション生成の主流となっている[5]．本研究は，ヒルベルト・ファン変換を用いた周波数領域でのモーション解析の結果を基に，深層学習と組み合わせた特徴認識および生成手法を提案した．特に，抽出した非線形の周波数成分をニューラルネットワークに学習させることで，認識の精度向上および新しい生成タスク(周波数領域での非線形スタイル移転・編集)の有効性を確認できた．

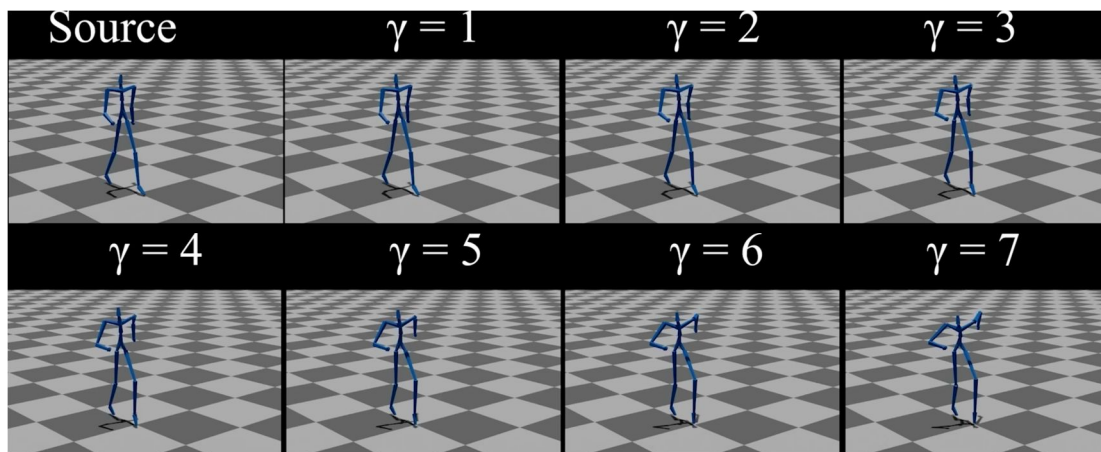


図2 深層学習を用いた周波数領域でのモーション生成

図2は，深層学習を用いた周波数領域での生成結果を示している．ニューラルネットワークを用いて周波数領域でのモーション分解を学習し，GANなどの生成ネットワークと結合させて訓練することにより，周波数領域での編集が可能となった．この手法を用いることで，序破急メカニズムに基づいた人形遣いの細かい感情表現の学習，編集および生成が可能となったと考えられる．

(3) 人形カラクリを取り入れたロボット開発およびモーション実装手法の確立

本研究は，周波数領域での解析結果および提案した手法を基に，ロボットへの文楽人形モーションの実装を試み，周波数領域でのロボットモーションキャプチャ実装手法を確立させた．図3は，モーションキャプチャデータをロボットに実装した結果を示している．ロボットはモータによって構成されているため，モーションキャプチャデータにはロボットに表現できない成分が多く含まれている．本研究は，周波数領域での編集を行い，ロボットのモータに合わせた実装手法を提案した．この手法により，文楽人形の繊細な動きをロボットで再現することが可能となった．

次に，文楽人形のカラクリを取り入れたロボットの設計も行い，胴体の伸縮や胸関節を導入することで，伸縮技法が可能なロボットを作成した．図4は，本研究での周波数解析から得られた結果に基づいて人形のカラクリを取り入れたロボットを示している．図4が示す通り，人形の

【1 研究目的, 研究方法など(つづき)】

胸の伸縮および高い自由度を持たせることにより, 伸縮などの誇張表現が可能となった.

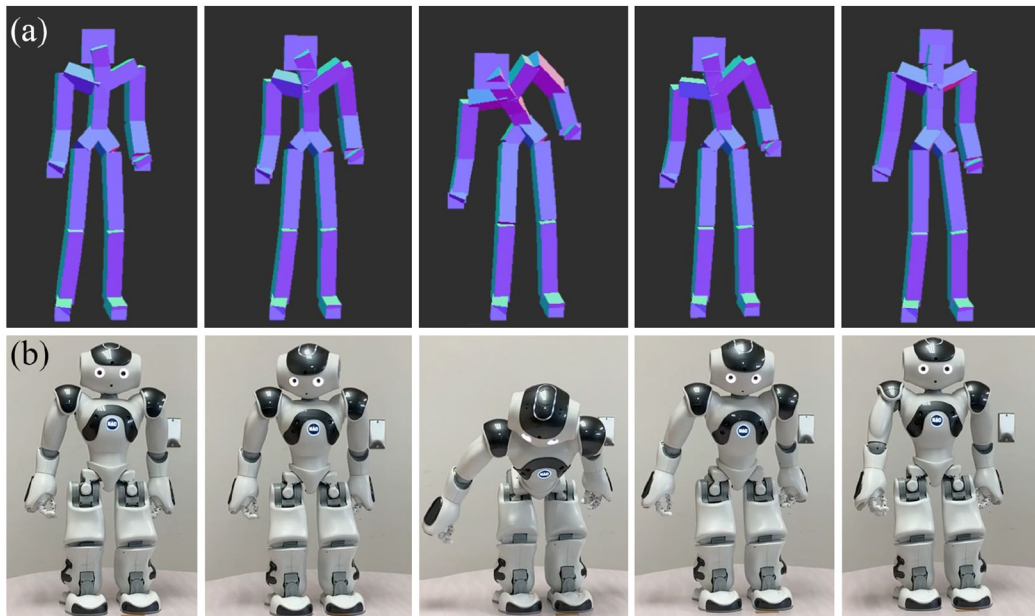


図3 モーションキャプチャデータをロボットへの実装.
(a)モーションデータ(b)実装後のロボットモーション

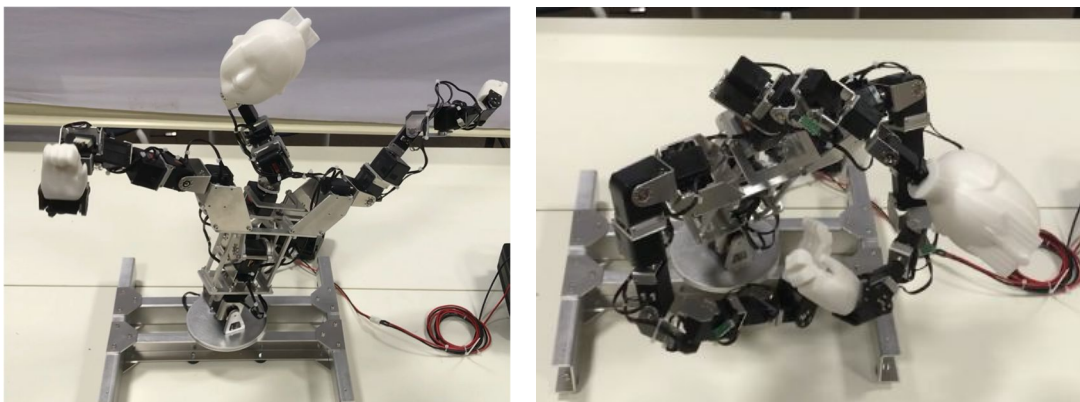


図4 人形カラクリの伸縮構造と柔軟な自由度を取り入れたロボット

また, これらの研究成果を他分野と連携して社会実装に向けて, 電磁界における非線形周波数解析, CG レンダリング, エンターテイメントにおけるインタラクションの心理的な調査などの研究も行った.

<引用文献>

- [1] Mori, Masahiro, Karl F. MacDorman, and Norri Kageki. "The uncanny valley [from the field]." IEEE Robotics and Automation Magazine, 19.2, (2012): 98-100.
- [2] Mathur, Maya B., and David B. Reichling. "Navigating a social world with robot partners: A quantitative cartography of the Uncanny Valley." Cognition 146 (2016): 22-32.
- [3] 丹波明. 「序破急」という美学: 現代によみがえる日本音楽の思考型. (2004).
- [4] Huang, Norden Eh. Hilbert-Huang transform and its applications. Vol. 16. World Scientific, 2014.
- [5] Holden, Daniel, Jun Saito, and Taku Komura. "A deep learning framework for character motion synthesis and editing." ACM Transactions on Graphics (TOG) 35.4 (2016): 1-11.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Dong Ran、Ikuno Soichiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Biomechanical Analysis of Golf Swing Motion Using Hilbert-Huang Transform	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6698 ~ 6698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23156698	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 Ni Shaowen、Dong Ran、Ueichi Hideo	4. 巻 47
2. 論文標題 The influence of online multiplayer games on social capital and interdependent well-being in Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Entertainment Computing	6. 最初と最後の頁 100587 ~ 100587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.entcom.2023.100587	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 Huang Xuan、Dong Ran、Wu Bo、Sato Kiminori、Ikuno Soichiro、Wang Zijun、Nishimura Shoji	4. 巻 20
2. 論文標題 A real-time recognition gait framework for personal authentication via image-based neural network: accelerated by feature reduction in time and frequency domains	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Real-Time Image Processing	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11554-023-01349-w	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 Dong Ran、Ikuno Soichiro、Yang Xi	4. 巻 26
2. 論文標題 Learning multivariate empirical mode decomposition for spectral motion editing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIGGRAPH Asia 2023 Technical Communications	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3610543.3626174	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 該当する

1. 著者名 Dong Ran, Cai Dongsheng, Hayano Shingo, Nakagawa Shinobu, Ikuno Soichiro	4. 巻 55
2. 論文標題 Investigating the Effect of Jo-Ha-Kyu on Music Tempos and Kinematics across Cultures: Animation Design for 3D Characters Using Japanese Bunraku Theater	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Leonardo	6. 最初と最後の頁 468 ~ 474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/leon_a_02250	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 Dong Ran, Ni Shaowen, Wu Bo, Hayano Shingo, Cai Dongsheng, Ikuno Soichiro	4. 巻 22442370
2. 論文標題 Analyzing Jo-Ha-Kyu Mechanism in Japanese Traditional Performing Art Ningyo Joruri	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 In proceedings of IEEE DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech 2022	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DASC/PiCom/CBDCCom/Cy55231.2022.9927889	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 Wu Bo, Zhu Yishui, Dong Ran, Sato Kiminori, Ikuno Soichiro, Nishimura Shoji, Jin Qun	4. 巻 5
2. 論文標題 Pre-braking behaviors analysis based on Hilbert?Huang transform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction	6. 最初と最後の頁 157 ~ 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42486-022-00123-4	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 該当する

1. 著者名 Wu Bo, Wu Yuan, Dong Ran, Sato Kiminori, Ikuno Soichiro, Nishimura Shoji, Jin Qun	4. 巻 13
2. 論文標題 Behavioral Analysis of Mowing Workers Based on Hilbert-Huang Transform: An Auxiliary Movement Analysis of Manual Mowing on the Slopes of Terraced Rice Fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Agriculture	6. 最初と最後の頁 489 ~ 489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/agriculture13020489	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 早野 慎吾、董 然	4. 巻 94
2. 論文標題 人形浄瑠璃の円の動きによる感情表現 モーションキャプチャを用いた分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 都留文科大学研究紀要 = 都留文科大学研究紀要	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34356/00000742	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 Dong Ran, Lin Yangfei, Chang Qiong, Zhong Junpei, Cai Dongsheng, Ikuno Soichiro	4. 巻 ACM ICEA '21
2. 論文標題 Motion Feature Extraction and Stylization for Character Animation using Hilbert-Huang Transform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2021 ACM International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications	6. 最初と最後の頁 16~21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3491396.3506524	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 該当する

1. 著者名 Dong Ran, He Yuying, Cai Dongsheng, Yamaguchi Jinichi, Kondo Hayato, Nakagawa Shinobu, Ikuno Soichiro, Hayano Shingo	4. 巻 SIGGRAPH '21
2. 論文標題 Interacting with Humanoid Robots: Affective Robot Motion Design with 3D Squash and Stretch Using Japanese Jo-ha-kyu Principles in Bunraku	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM SIGGRAPH 2021 Talks	6. 最初と最後の頁 1~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3450623.3464669	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 KONDO Hayato, YAMAGUCHI Jin'ichi, DONG Ran, HE Yuying, CAI DongSheng, NAKAGAWA Shinobu	4. 巻 2021
2. 論文標題 Development of a humanoid robot with mechanisms to realize exaggerated motions abstracted from a Japanese Bunraku puppet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)	6. 最初と最後の頁 1P3~E07
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmermd.2021.1P3-E07	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 奥村 颯次郎, 董 然, 宮崎 慎
2. 発表標題 生体情報の周波数成分を利用したVRラバーハンド錯覚の検出
3. 学会等名 NICOGRAPH 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保 翔太郎, 董 然, 生野 壮一郎
2. 発表標題 モーションデータを用いたEMDによる人型ロボットの動作学習最適化
3. 学会等名 日本応用数理学会 2022年度年会 (JSIAM2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 勇大, 董 然, 生野 壮一郎
2. 発表標題 ヒルベルト-ファン変換を適用したゴルフスイングの解析
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ran Dong
2. 発表標題 Nonlinear Motion Analysis, Learning and Synthesis in the Frequency-Domain using Hilbert-Huang Transform
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Intelligence Design (ISID 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 董 然、蔡 嘉霖、蔡 東生、山口 仁一、近藤 逸人、中川 志信、生野 壮一郎
2. 発表標題 文楽人形の誇張表現機構を持つ人間型ロボットに基づいた感情表現モーションデザイン
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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		
中国	Jilin University	The Hong Kong Polytechnic University	Chang'an University