

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03205

研究課題名(和文) 恒常的身体拡張を目的とした親和性向上技術と、遠隔操作および運動支援への応用

研究課題名(英文) Permanent body augmentation technologies and its application for teleoperation and motion support

研究代表者

長谷川 泰久 (Hasegawa, Yasuhisa)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70303675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、道具が身体の一部として認知される道具身体化の原理を、装着型運動支援機器やマスタースレーブシステムへ適応可能なレベルへ拡張し、運動機器の身体化を促進する脳・神経生理的親和性向上技術の研究開発を行い、物理的に限界にある機器の軽量化・小型化・応答性・配置を、認知・知覚の観点から進め、健常者および障がい者の恒常的身体拡張を実現する技術開発を行った。具体的には、感覚の代替技術、運動補正技術などについて、1) 外骨格型歩行支援ロボットの操作インタフェース、2) 移動ロボットの遠隔操作インタフェース、3) 外骨格型走行支援デバイスの開発を通じて研究を推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
人と機械の完全な融合を促進する脳・神経生理的親和性は装着型支援機器の実用性を大きく左右する基幹技術であり、医療・福祉・介護のみならず、建設現場や工場における重作業支援、トレーニング、スポーツ、アミューズメントなどその活用範囲は広く、今後の装着型支援機器の標準化技術となりえるものである。

研究成果の概要(英文)：In this project, technologies for permanent body augmentation have been explored from viewpoint of recognition and perception in order to mitigate limitations on system lightweighting and downsizing. This approach is based on the tool embodiment phenomena where a user could feel a tool as a part of one's body which never feel its size and weight. We are aiming to enhance and apply acquired knowledge and technologies for the physiological affinity to teleoperation system and wearable motion assistive device control in order to make them more useful.

研究分野：ロボット工学

キーワード：身体拡張 インタフェース 遠隔操作 運動支援 電気刺激

1. 研究開始当初の背景

近年、運動支援のための外骨格型支援機器を装着することで、対麻痺患者のような重度の身体障がい者が歩行可能となっている。対麻痺患者は、筋を動かすために必要な遠心性神経経路を失っているため、何らかの機器にて歩行意思を読み取り、歩行に必要な下肢等の関節に屈曲・伸展トルクを伝え、歩行動作を支援している。しかし、未だ大きく2つ課題が存在する。1つ目は、患者の下肢運動に対する自己主体感の欠如であり、重度の対麻痺患者は脚の遠心性・求心性神経経路も失っており、自分の脚の位置を把握する位置覚や足裏の接地を把握する触覚など体性感覚フィードバックが少なく、実際の脚の状態や運動を知覚することが困難である。患者は脚の状態が気になり、下を向いて目視により下肢を確認することになる。目視で下肢を確認しながらの歩行では、健常者のような自然な歩行は難しいことが容易に推測される。2つ目は、歩行時のバランス保持である。現在の歩行支援機器には、歩行時の安定性を向上させるような姿勢制御アルゴリズムは搭載されておらず、また、安定性向上のための制御によって、障がい者の運動主体感が低下することは望ましくない。そこで、これらの問題を解決するためには、患者が操作出来ない運動機能は運動支援機器が自動制御によって補い、また、運動の自己主体性を保つために必要な情報はユーザに提示しながら、あたかも自身で歩行しているように感じながら安定した歩行を実現する技術が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、道具が身体の一部として認知される道具身体化の原理を、装着型運動支援機器やマスタースレーブシステムへ適応可能なレベルへ拡張し、運動機器の身体化を促進する脳・神経生理的親和性向上技術の研究開発を行い、物理的に限界にある機器の軽量化・小型化・応答性・配置を認知・知覚の観点から進め、健常者および障がい者の恒常的身体拡張を実現する技術開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では上記の健常者および障害者の恒常的身体拡張を実現する技術開発を目指し、a) 電気刺激による身体位置覚(深部感覚)の代替技術、b) 視覚による力覚の代替技術、c) 自己主体感を損なわない運動補正技術、d) 支援機器の身体装着による運動への悪影響最小化技術、の観点から下記の3つの機器を用いて研究を進める。

1) 下肢麻痺患者の歩行再建を目指した外骨格型歩行支援ロボットの操作インタフェース

両下肢完全麻痺患者の歩行再建を目指した外骨格型歩行支援ロボットに対して、患者の歩行意思に応じて操作できる操作インタフェースを研究開発し、足先位置などの失われた深部感覚を指先への電気刺激でリアルタイムに提示する技術を実現する。また、患者の歩行を安定化するバランス補正を、患者に気づかれることなく行うシェアードコントロールについて研究を進め、患者が常に運動主体感を保持しながら歩行操作が可能なデバイスを実現する。これにより、上記の技術項目a)とc)について取り組む。

2) アームを持つ移動ロボットの遠隔操作インタフェースの研究開発

VRゲーム機器などに用いられているヘッドマウントディスプレイと非接触型の操作インタフェースを用い、アームを有する移動ロボットを操作するインタフェースを研究開発する。非接触型の操作インタフェースでは、ロボットアームが環境より受けた力を、操作者に直接力覚フィードバックすることはできない。そこで、視覚(オノマトペ)を用いることにより、過去に行った操作経験を操作者に想起させ、ロボットに作用している環境からの外力を仮想にフィードバックする技術の研究開発する。これにより、上記の技術課題b)の視覚による力覚代替技術について取り組む。

3) 走行時の運動負荷を低減する外骨格型走行支援デバイス

人の運動を直接支援する身体装着型支援機器は、その機器の持つ重さや体積によって、機器を装着する前に行っていた本来の運動が実現できなくなることがある。例えば、走行を支援する為に下肢に装着した支援機器では、その機器の持つ慣性によって運動負荷が増加するだけでなく、その機器の持つ体積によって、走行時の脚軌道が部分的に変わってしまう。よって、軽量・小型な装着型走行支援デバイスを模擬した部品を身体に装着して走行実験を行い、その運動への影響を評価する。

4. 研究成果

4.1 外骨格型歩行支援ロボットの操作インタフェース

両下肢完全麻痺患者の歩行再建を目指した外骨格型歩行支援ロボットに対して、患者の歩行意思に応じて操作できる操作インタフェースについて研究を進めて来ている。これまで図1に示すような刺激点を22点有するアレイ電極にて股関節角度を提示して来たが、直感的には足先位置を直接提示することが望ましい。しかし、足先の運動空間と歩行に必要な足先の位置分解能を考慮すると、22点の刺激点では全く電極数が足りない問題が生じる。しかし、アレイ電極を装着する拇指の指先の面積と指先の2点弁別距離を考慮すると、より電極の集密化や多極化は困難である。そこで、図2に示すように電気刺激のパターンをモジュール化し、同じ電極において提示する位置が、その刺激モジュールパターンによって異なる方法を提案した。予備実験において、人は、1秒間に2個の刺激モジュールと5個の刺激モジュールと連続の3パターンを

高い精度で弁別できることが明らかにした。よって、この3パターンのモジュールによって、限られた22点のアレイ電極により、足先の広い可動領域を十分な解像度で認識できることになり、患者を模擬した杖を有する2足歩行ロボットの歩行操作が可能であることを、実験によって確認した。この際、操作者は、ロボット直接見ることなく、ロボットの遊脚を、親指に装着したアレイ電極にて足先位置をリアルタイムに知覚しながら、図3に示す杖に搭載したインタフェースによって、示指によってリアルタイムに操作している(図4参照)。これにより、操作者は直接ロボットの脚を見ながら操作した時とほぼ同等の位置精度にて、足先位置を操作できることを確認した(図5参照)。

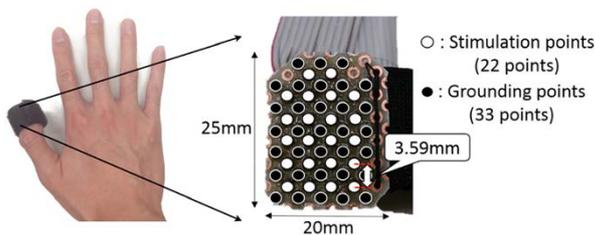


図1 アレイ電極と装着位置

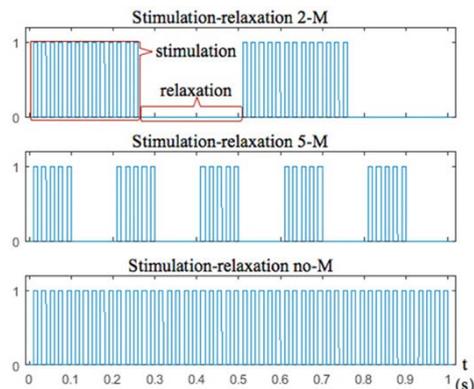


図2 電気刺激のモジュールパターン
(上からモジュール周期 2Hz, 5Hz, 連続)

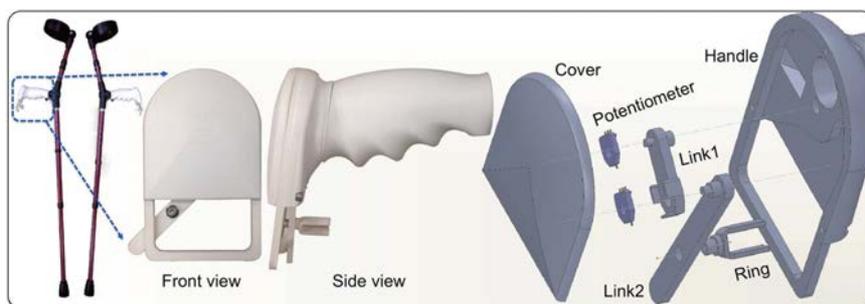


図3 示指による杖搭載型脚操作インタフェース

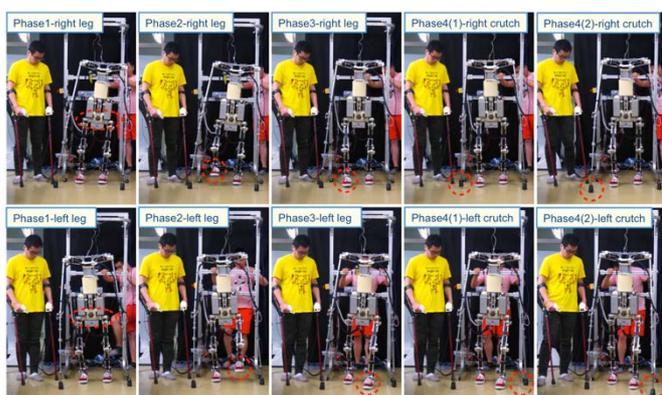


図4 歩行操作実験: 指によるロボット脚操作および指への足先位置フィードバック

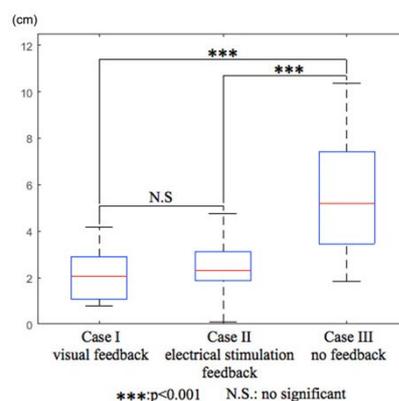


図5 脚先位置精度
(脚を目視、電気刺激、フィードバック無しの3条件の比較)

4.2 歩行安定化のためのシェアードコントロール

下肢麻痺患者の歩行を支援する外骨格型デバイスの運動支援タイミングと患者の歩行意思の同期は、一つの課題となる。そこで、本研究では、健常者が杖を使って歩行した際の各関節軌跡を計測し、主成分分析 (PCA) を用いて杖と脚動きの関係 (シナジー) を抽出し、患者が操作した杖の動きから提供する歩行運動をリアルタイムに再構成するアルゴリズムを提案した。また、歩行時の安定化を行う為、杖の初期運動から歩行周期と歩幅を予測し、予測された歩行周期と歩幅、非線形倒立振り子モデル(図6)を用いて ZMP 軌道を予測し、予め与えられた目標 ZMP へ追従するように股関節軌道を修正するアルゴリズムを実現した。

GAZEBO ソフトウェアを用いた計算機シミュレーションにて杖歩行を再現し、姿勢安定化制御にて、歩行中の ZMP 軌道のトラッキングエラーが 44%減少し、図 7 に示すように連続歩行が実現できることを確認しました。

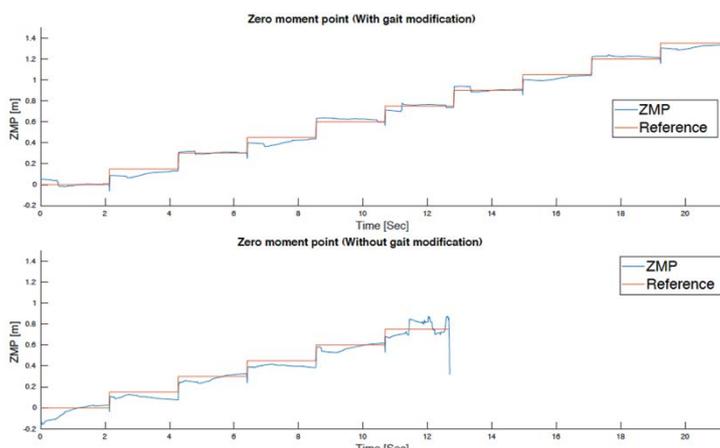
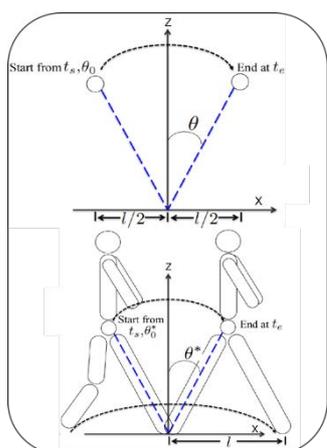


図 6 股関節角度の修正 図 7 歩行時の ZMP 軌道(シェアードコントロールの有無の比較)

4.3 遠隔操作インタフェースの研究開発

一般家庭や介護施設において高齢者や障がい者を介助する生活支援ロボットの利用が検討されている。その使用形態の 1 つとして、高齢者や被介助者によるロボットの遠隔操作が想定される。ロボットを遠隔操作する場合、操作者はカメラ等限られた感覚情報に基づいて適切な操作判断を行わなければならない。そこで、遠隔による手動操作とロボットによる自律動作の統合に加え、自律動作の介入量を操作者へ力覚として提示する Haptic Shared Control (HSC) を行うことにより、操作性および安全性を向上させることが可能となる。現在、力を直接操作者へ提示する HSC が研究されているが、身体拘束による操作負担や装置の複雑化や大型化といった問題があり、一般家庭への導入や高齢者・被介助者による使用を想定した身体拘束のない簡易な HSC が望まれる。本研究では、遠隔操作時において自動的に衝突回避を行う際、仮想的な接触状態を触覚オノマトペにより視覚提示することで仮想の力覚提示を行い、操作負担の少ない操作デバイスを用いた HSC システムを提案する。これにより、ロボットの遠隔操作における操作負担の低減および衝突回避動作における認知補助の両立を目指し、棚内の物体操作実験を通して提案手法の検証を行った。

a) 触覚オノマトペの視覚提示を用いた HSC

本研究では、身体拘束のない操作インターフェースである VR デバイスを用いて遠隔操作を行う。本提案手法では、まず、ロボット上の RGB-D センサを用いてロボットの頭部・手先・台座部に設定した基準点と障害物の相対距離に基づき、仮想的な斥力を生成する。次に、得られた仮想斥力をロボットの手先や台座位置に対するアドミッタンス制御への入力とすることで、自動的に回避動作を実現すると同時に、仮想斥力やロボットの速度といった仮想接触情報に基づいて仮想的な力覚を再現するオノマトペを選択・提示する。オノマトペは使用者に対して自身の経験に基づく体性感覚を適切な言葉によって想起させることが可能であると考えられる。本研究では、触覚オノマトペを VR デバイスの視野上に重畳することで疑似的な接触情報を提示する。

b) 評価実験

本提案手法の有効性を検証するため、触覚オノマトペの提示がある場合とない場合とで棚内における物体の操作実験を行った。図 8 に示すように、触覚オノマトペの提示がある場合においてタスク完了時間が短縮された。また、NASA TLX 法によりメンタルワークロードの主観評価を行ったところ、各尺度項目の重みづけ平均値が触覚オノマトペ提示において 40.09、提示なしにおいて 62.14 ($p = 0.035$) となっており、物体操作時のメンタルワークロードの低減が確認された。

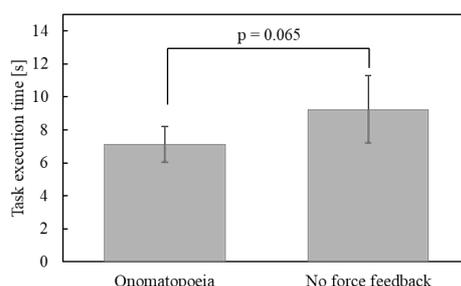


図 8 物体操作実験における作業時間

4.4 外骨格型走行支援デバイスの研究開発

走行時の立脚期に人の支持脚は「ばね」としての機能を有することが知られ、この機能に着目した装着型の走行支援装置がこれまでに研究されている。これらの支援アプローチは、大きく2つに分けられ、ばねを脚に対して直列または並列に取り付けるものが存在する。直列型のものでは、ばねが小型のものは僅かながら効果を上げているが、ばねが大型のものは走行時の安定性を損なってしまい効果を上げられてはいない。並列型の装置は、歩行やホッピングを対象としたものでは支援効果が報告され、支援機器が両脚の外側に位置するものと内側に位置するものがある。歩行や走行時の身体の重心移動は、身体中心を中心として左右に周期的振動しているため、体重を支える観点から支援機器は両脚の内側に装着することが望ましい。一方で、脚の自由な運動の観点からは、両脚の内側に支援機器を装着することは望ましくない。特に走行時には、遊脚期に脚が後ろから前方へ素早く移動する必要があるため、左右の足関節や膝関節が大変近くなる瞬間が存在する。そこで、膝関節内側に厚さの異なるブロック(図9)を装着して走行した際に、走行への影響を実験により評価した。歩行速度は2.5m/sとし、被験者7名にて、モーションキャプチャシステムにて運動を計測した。

実験の結果、図11に示すように、厚さ10mmまでは心拍への影響が無い反面、既に左右方向の着地位置に変化が現れ、厚さ20mmでは心拍にも悪影響が見られた。よって、走行支援機器を両脚内側に装着する場合には、片脚あたり厚さ10mmにすることが望ましく、少なくとも20mm以下でないと心拍へ悪影響を及ぼすことが判った。

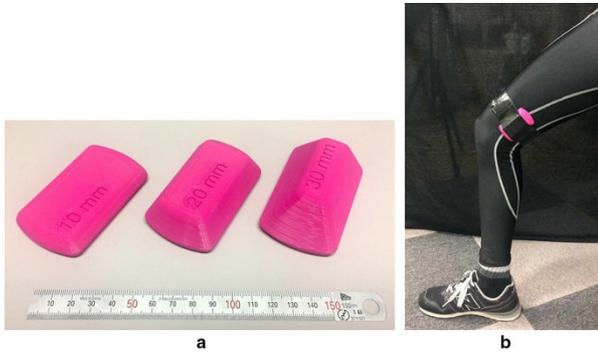


図9 ブロックとその装着部位(左から 10mm, 20mm 30mm)

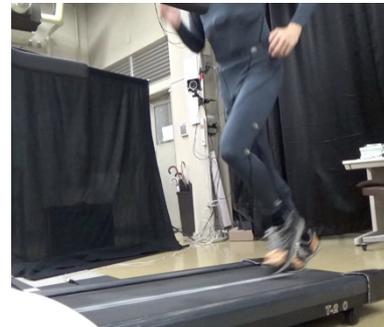


図10 走行実験

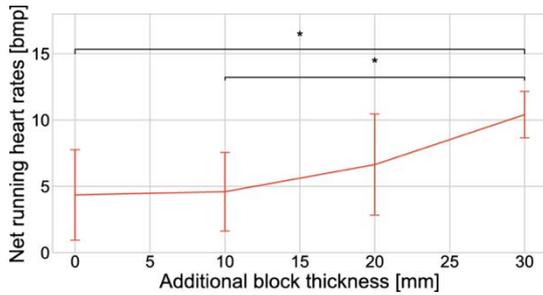


図11 ブロックの厚さと心拍数変化(n=7)

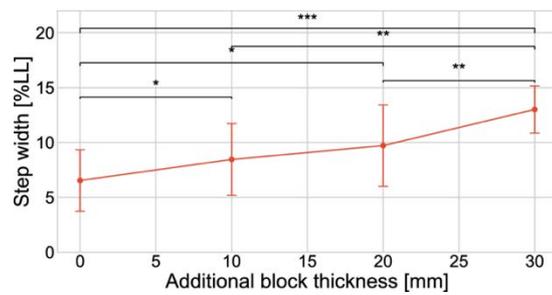


図12 ブロックの厚さと歩幅変化(左右方向, n=7)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Li Mengze, Yuan Zhaofan, Wang Xufeng, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 98
2. 論文標題 Electric stimulation and cooperative control for paraplegic patient wearing an exoskeleton	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 204 ~ 212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2017.09.009	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 Li Mengze, Yuan Zhaofan, Aoyama Tadayoshi, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 10
2. 論文標題 Precise Foot Positioning of Walking Robot for Paraplegic Patient Wearing Exoskeleton by Using Electrical Stimulation Feedback	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mechanisms and Robotics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4040354	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 Kubota Naoki, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 6
2. 論文標題 Medial part thickness of wearable device affecting running motion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-019-0136-z	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 Itadera Shunki, Dean-Leon Emmanuel, Nakanishi Jun, Hasegawa Yasuhisa, Cheng Gordon	4. 巻 4
2. 論文標題 Predictive Optimization of Assistive Force in Admittance Control-Based Physical Interaction for Robotic Gait Assistance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3609 ~ 3616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2928770	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 Zhu Yaonan, Aoyama Tadayoshi, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 5
2. 論文標題 Enhancing the Transparency by Onomatopoeia for Passivity-Based Time-Delayed Teleoperation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2981 ~ 2986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2972896	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 Li Mengze, Aoyama Tadayoshi, Hasegawa Yasuhisa	4. 巻 7
2. 論文標題 Gait modification for improving walking stability of exoskeleton assisted paraplegic patient	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-020-00169-y	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Mengze Li, Tadayoshi Aoyama, Yasuhisa Hasegawa
2. 発表標題 Electrical stimulation feedback for gait control of walking simulator
3. 学会等名 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mengze Li, Tadayoshi Aoyama, Yasuhisa Hasegawa
2. 発表標題 Electrical stimulation for compensation of impaired lower limb sensation
3. 学会等名 2017 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M Ando, J Chiba, S Itadera, J Nakanishi, T Aoyama, Y Hasegawa
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Haptic Visualization Interface for Robot Teleoperation Using Onomatopoeia in a Haptic Recognition Task
3. 学会等名 2018 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M Li, X Wang, T Aoyama, Y Hasegawa
2. 発表標題 Electric Stimulation based Weight Discrimination for Paraplegic Wearing Exoskeleton
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千葉丈太郎, 板寺駿輝, 中西淳, 青山忠義, 長谷川泰久
2. 発表標題 ロボットの遠隔操作におけるオノマトペを利用した力覚視覚化インターフェース, 千葉丈太郎
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 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 Force-sense visualization apparatus, robot, and force-sense visualization program	発明者 Hasegawa, Nakanishi, et al.	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、US Patent App. 16/425,039	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	高須 正規 (Takasu Masaki) (00503327)	岐阜大学・応用生物科学部・准教授 (13701)	