

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01292

研究課題名（和文）人体モデルを用いた筋活性度推定と力覚介入によるオンライン運動感覚伝送

研究課題名（英文）Online motor sensation communication based on the motor command estimation and force/haptic feedback using a digital human model

研究代表者

栗田 雄一（kurita, yuichi）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：80403591

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、視覚と運動感覚による感覚間相互作用を用いて階段昇降動作の運動イメージを提示するシステムの開発を行った。仮想空間における足と視点の移動量操作を行うことにより、定位置での足踏み動作に対しても疑似的に階段を昇降している感覚を与えることが可能になった。本研究で構築した運動イメージ提示システムがTKA術後早期の患者のパフォーマンスにどのような効果があるのかを検証する実験を行った結果、昇段時の運動躊躇時間と降段時の躍度指数、降段時の最大角速度が、有意に低い値を示すことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、人体モデルを用いた筋活性度推定に基づく介入と伝送技術に基づき、視覚と運動感覚による感覚間相互作用を用いて階段昇降動作の運動イメージを提示するシステムの開発を行い、実運動が困難な患者に対しても容易に運動イメージの介入をトレーニングとして取り入れること、理想的な動作の理解や模倣を行うことで運動パフォーマンスに望ましい変化を与えることができることを示した。この結果は、リハビリテーションや運動トレーニングに幅広く活用可能な知見を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a system to present a motor image of stair climbing motion using interactions between senses by visual and motor senses. By manipulating the amount of movement of the foot and the viewpoint in the virtual space, it became possible to provide the sensation of ascending or descending stairs pseudoactively, even when the foot is in a fixed position. The results of an experiment conducted to verify the effect of the motor image presentation system constructed in this study on the performance of patients in the early postoperative period after TKA surgery demonstrated that the motor hesitation time during ascent, the jerk index, and the maximum angular velocity exhibited significantly lower values.

研究分野：人間機械システム、ロボティクス、人間拡張

キーワード：運動感覚 人体モデル 力覚 感覚伝送

### 1. 研究開始当初の背景

視覚や聴覚に関する情報伝達技術は完成度が高まっている一方で、身体運動に伴う感覚を伝送する技術は未熟な点も多い。たとえば、同じ階段をのぼったとしても、健康若年者と、子供や筋力の落ちた高齢者では、その感覚は大きく異なる。階段昇降感を提示するために、階段画像を見せるだけでは不十分なのはもちろん、階段を送り付けたとしても、同じ運動感覚を提示したことにはならない。子供やお年寄り、障害のある方にとって安全かつ使いやすい製品設計や、リハビリ、トレーニングにおける体の動かし方の感覚を伝える上で、質の高い運動感覚伝達手法が必要とされている。ここで運動感覚(kinesthesia)とは、身体の位置と動きに関する意識的な気付きであり、運動感覚には末梢受容器からの求心性入力(末梢感覚)と中枢からの遠心性入力(運動指令)が重要な役割を果たしている。とくに、1. 関節位置や体感の動きなどの感覚、2. 努力感、筋張力、重量、ステイフネスなどの筋力に関連した情報、3. 筋収縮のタイミングに関する情報、4. 姿勢および身体図式の大きさの感覚、の4つが関与するとされる。位置や力の感覚は、運動アシスト機器や力覚提示機器を使えば提示できるが、同じ姿勢や動き、外力を与えても、ユーザの筋骨格系に違いがあれば、異なる運動感覚が生起される。つまり運動感覚は、筋骨格系の個人差の影響を強く受ける。

ここで CPSP (Chronic Post Surgical Pain) と呼ばれる手術後 3 ヶ月以上痛みが持続する慢性痛は、変形性膝関節症の治療法の一つである人工膝関節全置換術(Total Knee Arthroplasty, 以下、TKA)を受けた患者の約 20 %に発生すると報告されている。CPSP による運動への恐怖感は過剰な回避行動を引き起こしてしまうため、恐怖感を払拭したりリハビリトレーニングが必要となる。中でも、降段動作は TKA 術後患者にとって最も困難度が高い動作と報告されており、運動イメージによる平地での降段練習が、転落の恐怖を払拭したりリハビリトレーニングとして期待できる。運動イメージの提示を用いたりリハビリトレーニングの例として、TKA 術後患者に運動イメージの介入による関節可動域の拡大や大腿四頭筋の強力向上、VR (仮想空間) ベースの脳卒中患者への上肢トレーニングによる上肢機能と筋力向上が可能であることが報告されている。

### 2. 研究の目的

これまでに、VR ベースの上肢トレーニングを脳卒中患者へに導入し麻痺した上肢機能回復と筋力向上を確認した研究や、高齢者への VR 座位の体幹バランストレーニングを導入し、歩行能力向上を報告した研究が行われている。これらの研究は、リハビリトレーニングにおける VR システムによる視覚提示の有用性を示している。そこで本研究は、運動感覚を伝達するために視覚情報を活用すること、さらに筋骨格モデルに基づき力覚介入量を計算することで、視覚と力覚の同時介入を用いた感覚提示が、イメージトレーニングの支援につながることを検証することを目的とする。

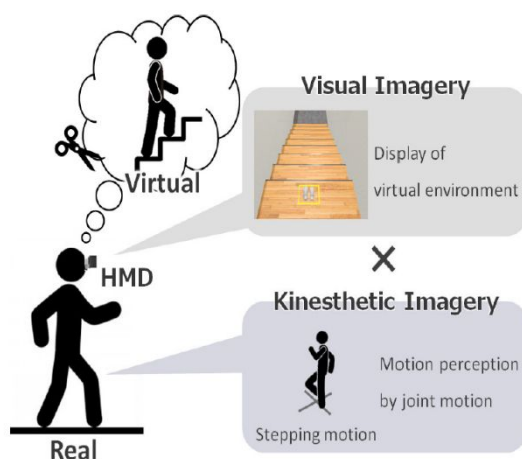


図 1 平坦を歩行しているユーザに階段を昇降している感覚を誘起させるシステム

### 3. 研究の方法

本研究では、視覚と運動感覚による感覚間相互作用によって階段昇降感覚を誘起させるシステムの開発を行った。また構築した運動イメージ提示システムによるリハビリへの有効性を検証した。本研究では、平坦を歩行しているユーザに階段を昇降している感覚を誘起させるシステムの開発を行った。構築したシステムの概要図を図 1 に示す。VR による視覚情報の提示と足踏み動作による下肢の運動感覚によって、階段昇降感覚の知覚効果を向上させる。また、構築した運動イメージを介入することで、どのような身体的・精神的効果を及ぼすか調査を行った。実

験を実施するにあたって、歩行動作が困難な術後早期の患者に対しても容易に運動イメージの提示を可能にする必要がある。そこで、RDWの基本的な考え方を利用して移動量操作を行うことで、平坦な床面上での足踏み動作を行いながら、疑似的に階段を昇り降りしている感覚を与えることができると考えた。そうすることで、足踏み動作に対しても知覚されることなく錯覚的に階段を昇降する運動イメージの提示が可能になる。こうした構築を行った階段昇降時の運動イメージ提示システムを術後早期のリハビリトレーニングとして取り入れることで、実階段での昇降動作にどのような影響を及ぼすのかを臨床介入実験により検証を行った。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 階段昇降運動イメージ誘起システム

ここでは階段昇降動作における視覚的運動イメージの提示手法とシステムの構成、動作アルゴリズムについて説明する。実運動が困難であるような術後早期の患者を対象としているため、定位置での足踏み動作に対しても運動イメージを誘起することができるシステムの開発を行った。足踏み動作に対して階段昇降感覚を誘起するための手法として、複数の感覚の同時提示による多感覚間相互作用という錯覚を用いた。動作知覚において視覚情報が他の感覚よりも優位であるという知見と動作知覚において運動感覚の影響がおおきいことに基づき、視覚と運動感覚の2つの感覚情報提示によるシステムの構築を行った。主な全体のシステム構成を図2に示す。これらの感覚提示によって階段昇降時の感覚を誘起させた。HMDに表示する仮想空間はゲーム開発エンジンUnityによって開発を行った。VIVE Tracker (HTC社製) を足首付近に装着することで足の座標と角度情報を取得する。これによって、ユーザの足の動作を仮想空間の足の動作に反映することができる。

図3に実空間での動作と仮想空間での動作の対応を示す。昇段動作時の視点と足の動作を計測したうえで、仮想空間上では身体を上昇させるように映像を提示する。また足が仮想階段と接触したかどうかの情報をもとにy軸方向の移動量を操作した。x軸方向の移動量操作は実空間の足のy座標が仮想階段の高さ $h$  [mm]を超えたときをトリガーとして、移動の操作を行った。

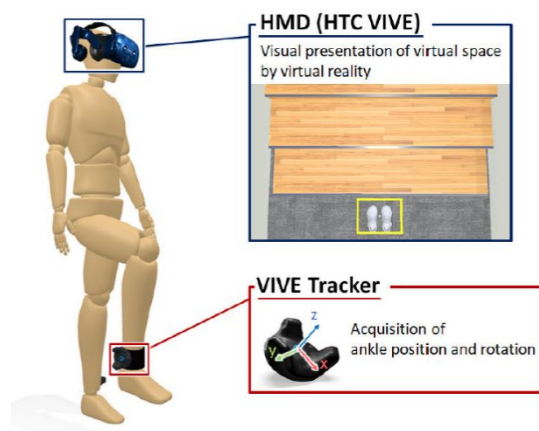


図2 視覚と運動感覚の2つの感覚情報提示によるシステム

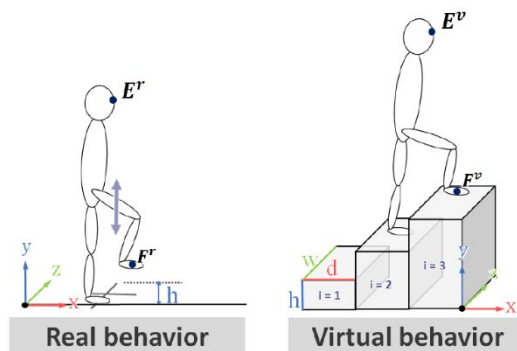


図3 実空間での動作と仮想空間での動作の対応

##### 4.2 視覚的運動イメージによる臨床効果検証実験

構築した視覚的運動イメージの介入が階段昇降に対してどのような身体的・精神的効果を及

ぼすのかを臨床介入実験により検証する。本研究において行われた実験研究は、福岡整形外科病院倫理委員会の承諾（承認番号：2020-26）を得て実施された。研究の実施には、ヘルシンキ宣言および人を対象とする医学系研究に関する倫理指針を遵守して実施した。

協力病院に入院中のTKA患者10例を実験対象者とし、術後経過週数3-4週目の期間に該当する者とする。すべての対象患者において入院期間中のトレーニングは同様の内容で施されており、評価計測の時点までで一足一段のリハビリを一度も実施していない者とする。なお本実験は、すべての被験者に対して事前に口頭で実験主旨および実験方法について十分に説明をし、承諾を得たうえで実験を行った。実験プロトコルを図4に示す。実験デザインを無作為化比較試験とした。10名の被験者をブロックランダム化法により無作為に2群に割り付けた。割り付けられた2群の一方をVRによる視覚的運動イメージを施行する介入群5名とし、もう一方をVR介入を実施しないコントロール群5名とした。介入内容としては、VRによる運動イメージの介入を20分/日を3日間実施する。介入タスクとしては、仮想的な段の高さ10-30cmの10cm刻みで、昇段と降段のそれぞれで行う。術後経過週数が約4週目となる時点で評価計測を実施する。なお階段を昇降する際は、安全性を考慮して両手摺り保持の状態での歩行とした。また、2足1段と1足1段の2種類の歩行様式で階段を昇降してもらった。

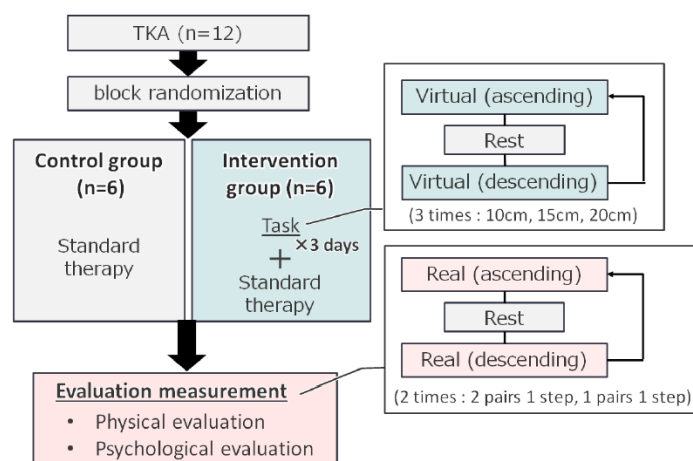


図4 実験プロトコル

#### 4.3 実験結果

各計測項目の介入群と対照群の群間比較として、対応のないt検定による統計処理を行った。有意水準は5%未満とした。図5に、被験者間での平均値を群間で比較した結果を示す。いずれの両群間においても有意差は確認できなかったが、痛みに対するVASの相対標準偏差は昇段87.7%、降段57.6%、恐怖に対するVASの相対標準偏差は昇段107.7%、降段110.3%であり、個人間によるばらつきが大きいことがわかる。有意な差はなかったものの、傾向としては対照群よりも介入群の方が高値であった。このように至った原因として、主観評価の計測方法が挙げられる。VASは主観による影響が大きく個人間に差が生じやすいため、基準刺激によって正規化する方法やpre-postの変化率を比較する方法がとられているが、本実験では個人差の影響を排除していないことから、個人間にばらつきが大きい結果となった。

次に、膝関節の動作解析結果を平均、群間で比較した結果を図6に示す。昇段動作中の運動躊躇時間において、対照群(0.995)と比較して介入群(0.706)で有意な差(p=0.0197)を確認した。また、降段動作中の躍度指数(AJI)において、対照群(46.1)と比較して介入群(16.2)で有意な差(p=0.0199)を確認した。また、降段動作中の屈曲最大角速度において、対照群(133.8)と比較して介入群(107.1)で有意な差(p=0.0496)を確認した。

運動躊躇時間が低値であることは、膝関節の運動方向を切り替える際にかかる時間が短くなっていることを示している。そのため、運動イメージの介入を行ったことで、1足1段による階段昇降動作の脳内イメージを構築することができ、実運動を実施した際に躊躇うことなく運動を行えていることがわかる。階段昇降動作中に運動に対する恐怖を保持していると動作の円滑さが低下し動作を微調整するため、関節の角躍度に高周波成分が乗ることは明らかになっている。従って、運動イメージの介入によって、階段昇段時の膝関節動作に対する恐怖感が減衰した可能性が示唆される。降段動作の円滑性が向上した結果として、降段動作時の躍度指数に有意差が現れたと考えられる。



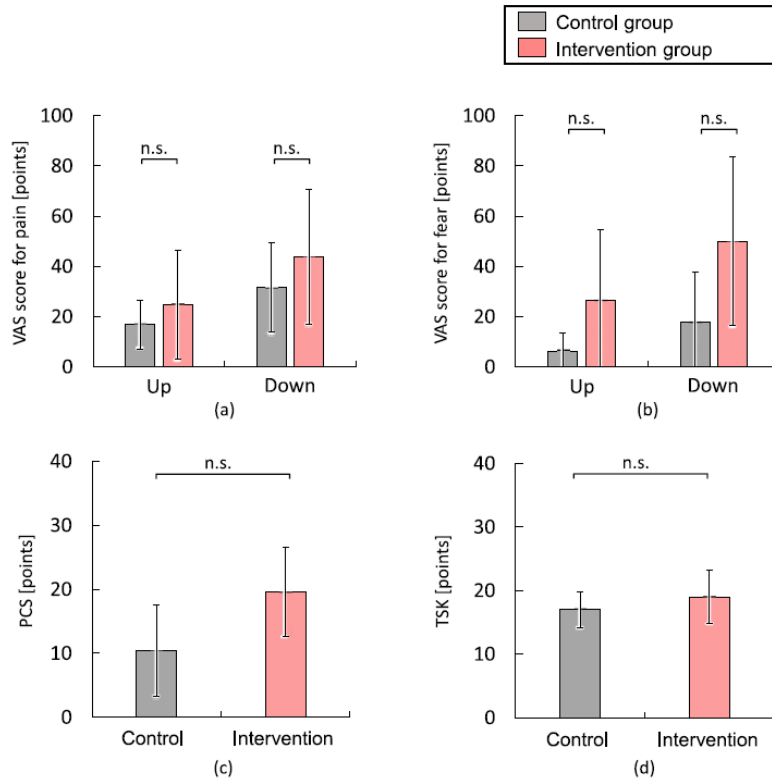


図5 被験者毎の主観評価値の結果

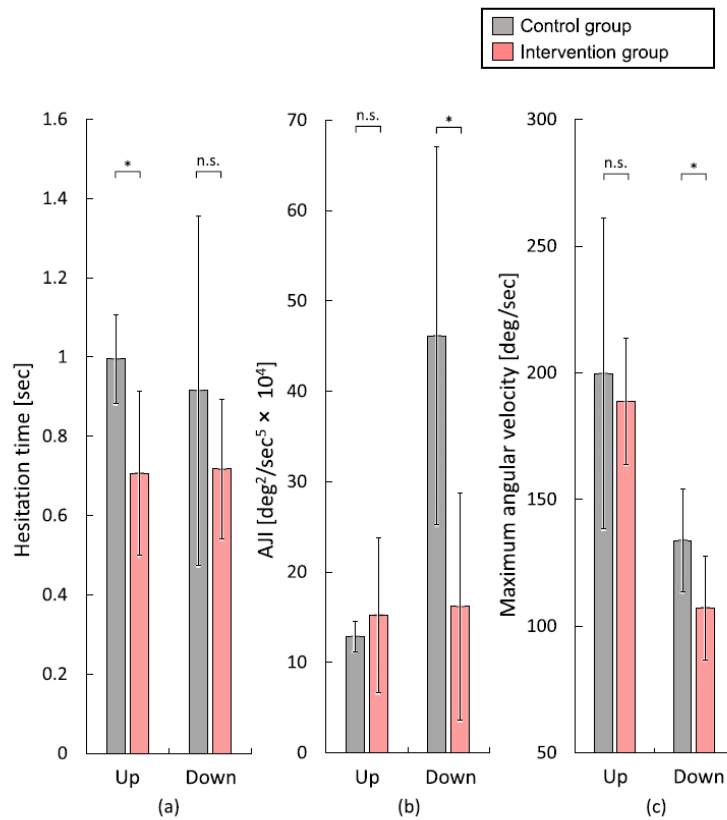


図6 膝関節の動作解析結果 (a)運動躊躇時間、(b)躍度指数、(c)最大関節角度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichi Kurita, Takumi Okumura, Ryota Imai, Tomohiko Nishigami, So Tanaka, and Takanori Taniguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Stair-Climbing Training System Using Visual VR Display for Total Knee Arthroplasty Patients	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	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 Minakata Mayuko, Maruyama Tsubasa, Tada Mitsunori, Ramasamy Priyanka, Das Swagata, Kurita Yuichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Safe Walking Route Recommender Based on Fall Risk Calculation Using a Digital Human Model on a 3D Map	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 8424 ~ 8433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3143322	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21件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Enrique Calderon-Sastre, Swagata Das, and Yuichi Kurita
2. 発表標題 Impact of PGM Training on Reaction Time and Sense of Agency
3. 学会等名 International Conference on Smart Multimedia（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichi Tamai, Yuichi Kurita
2. 発表標題 Manipulation of perceptual force by vibration -Effect on isometric wrist extension movement-
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 玉井太一、栗田雄一
2. 発表標題 振動と等尺性手首伸展動作がアシスト力の知覚に及ぼす影響
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川康太、栗田雄一
2. 発表標題 人工筋による力覚介入を用いたVR階段降段トレーニングシステム
3. 学会等名 The 6th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉井太一、栗田雄一
2. 発表標題 振動と等尺性手首伸展動作がアシスト力の知覚に及ぼす影響
3. 学会等名 The 6th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Enrique Calderon-Sastre, Swagata Das, Yuichi Kurita
2. 発表標題 GM Training for Reaction Time Improvement and Sense of Agency
3. 学会等名 The 6th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田雄一, 小濱遼平, 丸山翼, 遠藤維, 多田充徳
2. 発表標題 人工筋を用いた力覚介入による重り保持時の努力感の操作
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 ウェアラブルなアクチュエータによる力覚介入と運動拡張
3. 学会等名 日本機械学会年次大会・先端技術フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 視覚と力覚の同時介入によるVR運動・リハビリトレーニング
3. 学会等名 ARO協議会第9回学術集会・JST成果展開支援事業ランチョンセミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 デジタル時代のヘルスケア・リハビリのためのスマートコーチング技術
3. 学会等名 第38回日本義肢装具学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 Soft wearable exoskeleton and its applications to human augmentation
3. 学会等名 Easwari Engineering College International Faculty Development Program on Exploring the future endeavours in the Biomedical Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 Human augmentation with a soft wearable exoskeleton
3. 学会等名 Ninth International Conference on Biosignals, Images, and Instrumentation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Priyanka Ramasamy, Masato Hamada, Swagata Das, and Yuichi Kurita
2. 発表標題 Human balance ability assessment through Pneumatic Gel Muscle (PGM)-based Augmentation
3. 学会等名 AugmentedHumans 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rikuo Kawamoto, Taiki Yoshitake, Yuichi Kurita, Tomohiro Shibata
2. 発表標題 Development of a Compact Wireless Walking Assist Device for Parkinson's Disease Patients
3. 学会等名 9th International Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小濱遼平, 栗田雄一
2. 発表標題 筋活動度推定と力覚介入による運動感覚伝送
3. 学会等名 The 5th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs (ROOB2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松浦詩乃, 遠藤維, 多田充徳, 丸山翼, 平田和彦, 木村浩彰, 栗田雄一
2. 発表標題 デジタルヒューマンモデルを用いた運動計測によるADL評価
3. 学会等名 The 5th Workshop of Robotics Ongoing Breakthroughs (ROOB2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田開, 木村浩彰, 平田和彦, 来間千晶, 栗田雄一
2. 発表標題 力覚フィードバックで拡大した手指運動によって運動イメージの増強を図るリハビリ支援システム
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田開, 木村浩彰, 平田和彦, 来間千晶, 栗田雄一
2. 発表標題 視覚・力覚フィードバックにより拡大した手指運動が動作の一致感へ及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 人の感覚・運動特性を考慮した建機の遠隔操作インタフェース
3. 学会等名 日本機械学会IIP2022 情報・知能・精密機器部門（IIP部門）講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 人間の可能性を拡張するテクノロジー
3. 学会等名 東広島市学びのワーケーションリカレント講座（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田雄一
2. 発表標題 運動支援/力覚提示スーツによるサイバー・フィジカル・オーグメンテーション
3. 学会等名 日本機械学会年次大会公開先端技術フォーラム：機械と情報通信の融合で人間の能力を拡張する新技術（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Gunarajulu Renganathan, Yuichi Kurita, Sasa Cukovic, and Swagata Das	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 24
3. 書名 Foot Biomechanics with emphasis on the Plantar Pressure Sensing: A review, In Karupppasamy Subburaj, Kamalpreet Sandhu, Sasa Cukovic (eds.), Revolutions in Product Design for Healthcare: Advances in Product Design and Design Methods for Healthcare (Design Science and Innovation)	

1. 著者名 Swagata Das, Yuichi Kurita, and Ramin Tadayon	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 41
3. 書名 Accessible Smart Coaching Technologies Inspired by Elderly Requisites, In Troy McDaniel, Xueliang Liu (eds.), Multimedia for Accessible Human Computer Interface	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>人体モデルを用いた筋活性度推定と力覚介入によるオンライン運動感覚伝送プロジェクト  <a href="https://sites.google.com/view/aha-prc/aha-prc-jp/motor-sensation-jp">https://sites.google.com/view/aha-prc/aha-prc-jp/motor-sensation-jp</a></p>
--

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	遠藤 維 (endo yui) (40599073)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  (82626)	
研究分担者	丸山 翼 (maruyama tsubasa) (50817161)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員  (82626)	
研究分担者	多田 充徳 (tada mitsunori) (70392628)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長  (82626)	

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