

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11985

研究課題名（和文）身体固定状態における没入型VRシステムの実現に関する基礎研究

研究課題名（英文）Basic research on physical restraint immersive VR system

研究代表者

中村 壮亮（Nakamura, Sousuke）

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：20634695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は身体固定型の没入型VRインタフェース「Motion-lessVR」に関するものであり、固定されるが故の問題を如何に解消するか（非固定の自由運動と同様の運動発揮・感覚の知覚を可能とするか）の技術開発を追及した。特に、運動発揮の違和感解消のため取り組んでいた姿勢に応じたトルク変換の適用に関して、固定姿勢と仮想姿勢の乖離がある状況で有効性が示唆された一方で、運動発揮は感覚の影響も受けてしまうため運動錯覚の効果が姿勢乖離とともに減退することが新たな問題として浮上した。運動錯覚の劇的な性能向上には冷却等の感覚麻痺技術との併用なくして、一定以上の姿勢で十分な運動の実現は困難であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタバースなどに期待が集まる昨今においても、視聴覚でのVRが主であり、リアルな運動を再現できていない。これは、多様な環境であらゆる運動を可能とする没入型VRシステムが物理的に困難であることに起因している。そこで、身体固定状態とすることで環境による制約を取り除きつつも、運動錯覚技術などで自由運動と遜色のない運動感覚を持たせることを提案システムでは志向した。各要素技術の進展次第では本システムは有用なものとなり得ることが示唆された一方で、現時点においては一部要素技術（特に運動錯覚技術など）の性能が没入型VRシステムとして十分な運動性能を発揮するには不十分である事なども判明した。

研究成果の概要（英文）：This research is related to “Motion-lessVR,” a body-fixed immersive VR interface, and we pursued technological development on how to solve the problem of immobilization (i.e., how to enable the perception of motion exertion and sensation similar to that of unfixed free motion). In particular, the application of posture-based torque conversion, which we have been working on to eliminate the discomfort of kinetic motion, was shown to be effective in situations where there is a discrepancy between the fixed and virtual postures, but a new problem emerged: the kinetic motion is also affected by the sensory perception, and the effect of the kinesthetic illusion diminishes with posture discrepancy. Without a dramatic improvement in the performance of the kinesthetic illusion or in combination with sensory numbing techniques such as cooling, it was found to be difficult to achieve sufficient motion at a certain posture.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：バーチャルリアリティ ヒューマンインタフェース 全身没入

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタバースなどに期待が集まる昨今においても、視聴覚での VR が主であり、リアルな運動を再現できていない。これまでに様々な研究がなされてきたが、多様なバーチャル環境においてあらゆる運動を実行可能とする汎用的な没入型 VR システムの実現に関しては、未解決課題となっている。これは、特に下半身において、運動を相殺しつつ (移動を伴う場合には限定された空間で実現するためには移動量の相殺が必須)、環境との接触を再現するために外力を与えること (そのためには移動のために外骨格が利用できない前提では環境への実際の物体配置を切り替える) が、限られた状況の再現は可能であるが、汎用的なものとなると原理的に困難であることに起因している。そこで、研究代表者らは、実際の運動を物理的 (力学的) に再現する従来のアプローチからは離れ、本人が運動を知覚出来ていれば良いとの考えのもと、運動に関する錯覚技術を用いたアプローチを考案した。

これは、身体固定状態とすることで環境による制約を取り除きつつも、運動錯覚技術などで自由運動と遜色のない運動感覚を持たせるといったものであり、「Motion-Less VR」と称して研究を進めてきた。Motion-Less VR は「① 運動意図の取得、② 運動のシミュレーション、③ 運動感覚の提示」の要素技術から構成され (図 1)、身体固定下でこれを実現する事で、運動に伴う移動量の相殺や環境側に置かれる接触する物体の形状を切り替えるといった事が究極的には不要となるものである。

最初に取り組んだものは、機械的な固定により身体の姿勢変化を制限した状態において、トルクセンサを用いて運動意図を取得し、そこから本来発生するはずであった運動をバーチャル環境でシミュレートし、その結果を視覚提示するというものであった。その後改良を重ね、現時点では、独自の運動意図取得・運動シミュレーションと、視覚に加えて運動錯覚を取り入れた運動感覚提示とを統合した形態をとっている。なお、運動錯覚とは、筋腱への振動刺激により、運動していないにもかかわらず四肢が動いている感覚が身体から得られる現象である。

しかし、これまでの Motion-Less VR では、自然な運動感覚を得られる運動姿勢の範囲が狭く、外部環境との物理的な接触なども実現出来ていなかった。

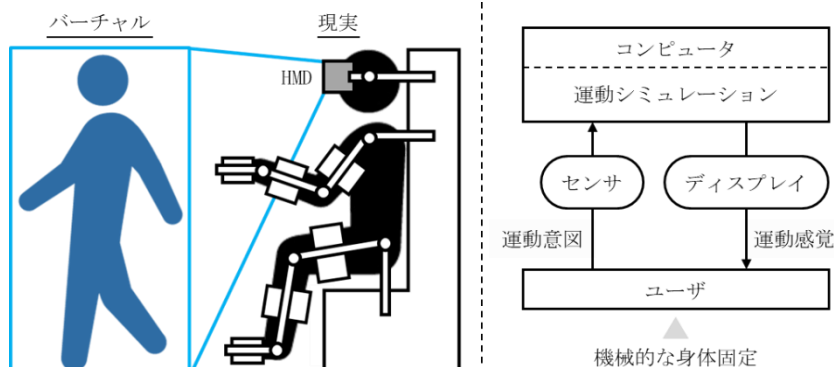


図 1 Motion-Less VR のイメージと機能概要

2. 研究の目的

本研究課題では、自然な運動感覚を得られる運動姿勢の範囲を広げる (理想的にはユーザーの可動域まで) ことと、外部環境との物理的な接触を実現することを目的とした。まずは原理検証のため、実装評価が容易と考えられる腕部を対象部位として、研究を行う。

3. 研究の方法

研究代表者らはこれまで、トルクセンサで運動意図を取得するものとし、手始めに運動感覚提示を視覚のみに制限して手指への適用を行い、続いて腱振動刺激による運動錯覚を加えた運動感覚提示を導入して肘の屈伸 (1 軸) や手首の撓尺屈・掌背屈 (2 軸) への適用を行う形で、段階的に研究を進めてきた (図 2)。

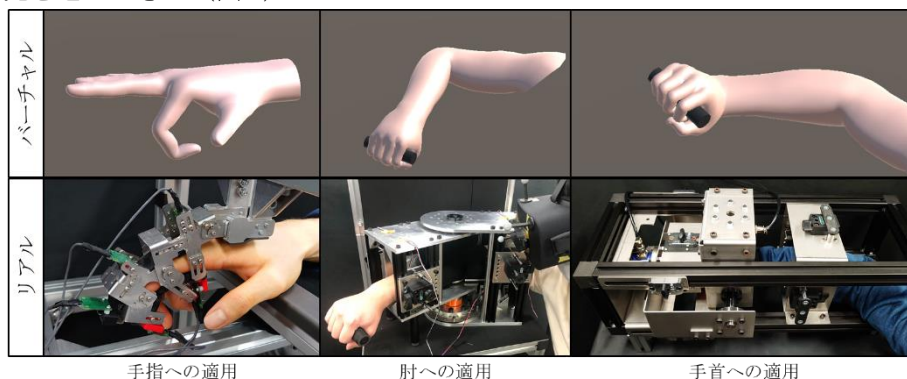


図 2 これまでの Motion-Less VR の取り組み

本研究ではさらに研究を推し進め、自然な運動感覚を得られる運動姿勢の範囲拡大と、外部環境との物理的な接触を実現する。そのために、以下の4STEPで研究に取り組んだ。

STEP1・2は運動意図取得技術の改良，STEP3は運動シミュレーション技術の改良，そして最後のSTEP4は外部環境との物理的な接触の実装・評価である。

STEP1：姿勢に応じたトルク変換による運動意図取得の精度向上

発揮可能な関節トルクの最大値は関節角度に依存することが知られている。ここで，Motion-Less VRでは固定された実身体の関節角と運動しているバーチャル身体の関節角が異なることとなるが，ユーザはバーチャル身体の関節角を自身の現在の姿勢と思い込んで筋発揮を行うため，実身体で計測されたトルクをバーチャル身体へ本来入力しようとしたトルクへと変換することでより自然に腕を動かす事が可能となると考えられる（図3）。この変換手法について研究を進めた。なお，ここでは腕部を対象とし，腕主要関節（肩屈伸，肩内外転，肘屈伸の3自由度）での動作を可能とする右腕の装置にて実験を行った。

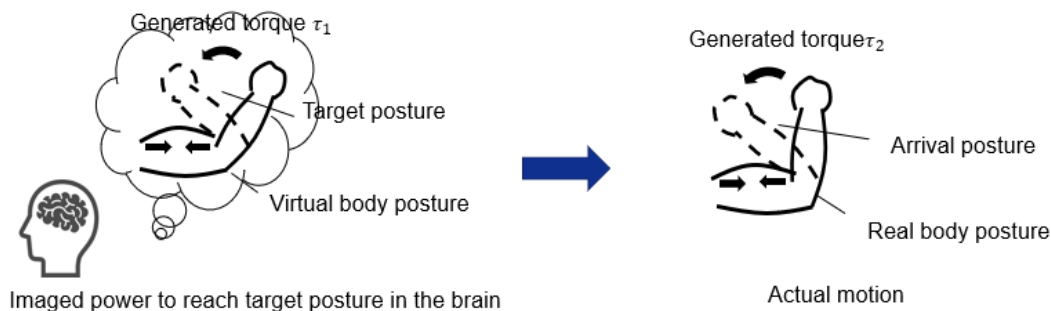


図3 実身体の姿勢で計測したトルクが意図した発揮トルクと異なる様子

STEP2：筋電センサを用いた運動予測による運動意図取得の遅延抑制

トルクセンサのみを用いた運動意図取得では，センサの検出遅延や運動シミュレーションの処理遅延により，時間遅れ及びそれに伴う不要な筋発揮が生じていた。そこで，筑波大学・山海教授らの開発したパワーアシストスーツである HAL における研究事例を参考に，筋電センサを用いたバーチャル身体の運動予測により時間遅れの低減を図った。ここでは，STEP1と同様の装置を用いて肘関節を対象を絞って実験を行った。

STEP3：力学モデルパラメータの個人適合の要否確認と適合手法の検討

これまで，剛体リンクモデルにおいて，質量や形状を平均値，関節の粘弾性係数を文献[1]の代表値としていた。しかし，これは本来ユーザ固有の値であるため，個人適合の要否を確認した。ここでも，STEP1と同様の装置を用いて実験を行った。

[1] 荻原 直道，山崎 信寿，“身体の構造制約に基づく自然な上肢リーチング動作の生成”，日本機械学会論文集，Vol.67，No. 659，pp.2314-2320，2001.7.

STEP4：バーチャル環境とのインタラクションの実装と評価

左腕を追加実装する形で両腕の装置を完成させ，バーチャル環境との物理的なインタラクションの実装と評価を行った。

4. 研究成果

上記に示した4STEPに関して，具体的に行った事とその成果を以下に述べる。

STEP1：姿勢に応じたトルク変換による運動意図取得の精度向上

ここでは，以下の3プロセスからなる変換処理を提案した。計測トルクではなく，この仮想的な関節トルクが，Motion-Less VRの運動シミュレーションで使用される入力トルクとなる。

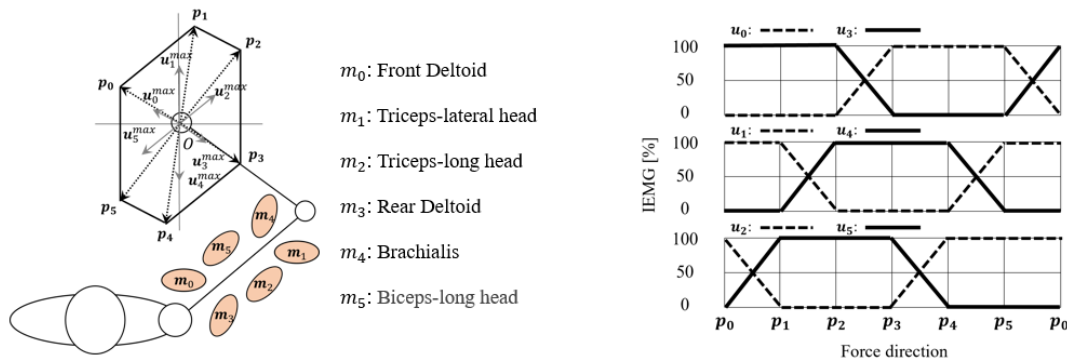


図4 6角形の出力分布と筋活動パターンの対応モデル（3対6筋モデル）

①計測された固定姿勢での関節トルクをヤコビ行列で手先の力出力に変換 ②個別に実測値から最適化した6角形の出力分布と筋活動パターンへの対応モデル(3対6筋モデル:図4)を適用して筋張力に変換 ③緊張力から仮想身体の姿勢とした場合の仮想的な関節トルクを算出

評価実験は下記の通り行った。まず、剛体リンクモデルに基づいた動力学シミュレータを作成し、そもそもトルク変換が必要となるような姿勢の領域を割り出し(姿勢がさほど乖離しない範囲では姿勢変換の効果は見込めないため)、その領域の範疇に姿勢を誘導する必要がある運動を設定した。ここでは、以下の8点に対して目標位置が切り替わる度にそこに指先を誘導するタスク(図5)を設定した。なお、その際には、STEP3の個人適合に関しても適用した。



図5 実行したポインティングタスク

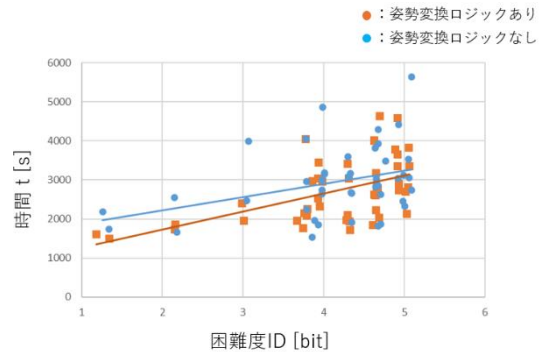


図6 困難度IDとタスク実行時間tの関係

結果をフィッツの法則に基づいて分析したところ(図6)、姿勢変換ロジックありの方が短い実行時間となっており、一定の改善が見られた。(今後、より多くの被験者で確認していく)

しかし、想定していたよりも効果は十分ではなかったため、その理由を固定感にあると考え、今後はホワイトノイズのような振動提示や冷却による固有需要感覚の感度低減を図る予定である。現在、そちらの試作も完成し、実験計画を立案している段階にある。

STEP2: 筋電センサを用いた運動予測による運動意図取得の遅延抑制

当初の実験では改善が見られず、その原因が筋電信号の誤差が無視できず、S/N比が許容水準に無かった事が原因と結論付けた。そこで、取り付け位置や信号処理などの工夫によって筋電取得の見直しを行った。

その結果、安定的な筋電取得が可能となったため、運動予測に基づく遅延抑制を試みた。しかし、結果としては信号検知にかかる処理時間なども併せると、遅延抑制に至るほど高速な予測的処理は困難であった。今後は、時系列情報を扱うAIモデルの導入などで予測スピードを高めることを検討する予定である。

STEP3: 力学モデルパラメータの個人適合の要否確認と適合手法の検討

関節の弾性係数や粘性係数などを各人ごとに推定する手法を提案した。ここでは、腕の運動軌跡と発揮トルクが、軌跡を入力としてトルクを出力とする逆動力学モデル(このモデル内で関節の弾性係数や粘性係数などが同定すべき未知パラメータとして表現される)で紐づけられることに着目し、軌跡とトルクの時系列データを計測し、そこから未知パラメータを最小二乗法で同定する事とした。

そこで、軌跡と発揮トルクを記録する計測装置(図7)を作成し、肘を低速および高速で前後させ(図8)、その時の軌跡と発揮トルクを記録した。低速及び高速で運動させたのは、同定対象である関節の弾性係数及び粘性係数の最適化に影響しやすくするためである。また、屈伸運動は、被験者の関節可動域範囲限界まで行った。

これをフィルタ処理でノイズ除去し、最小二乗法を用いて物理パラメータを同定した。そして、前述の通り、STEP1にて個人適合を適用した運動性能の評価実験を行い、一定の運動性能向上が認められた。なお、同定が正しく機能している事は、図9の結果からも読み取れる。

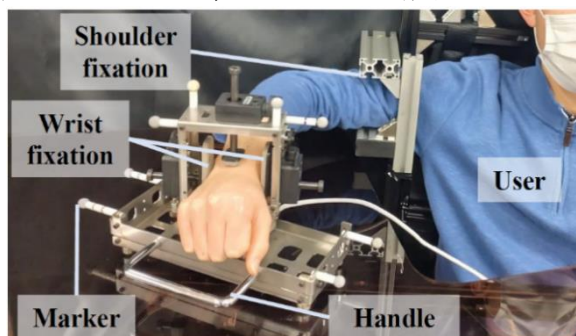


図7 作成した計測装置

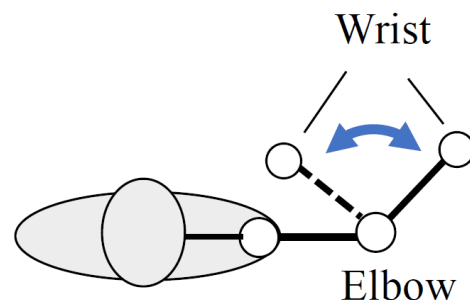


図8 描かせた軌跡のイメージ

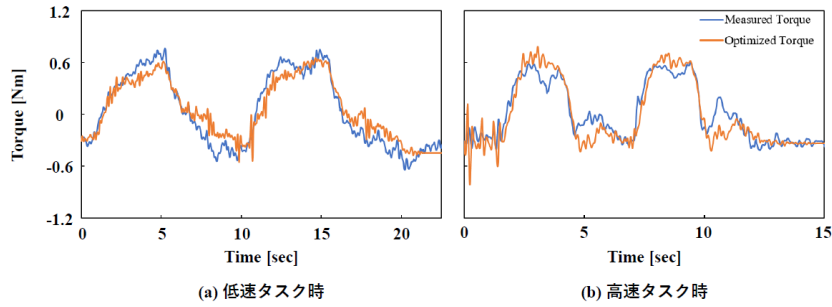


図9 同定パラメータを用いて計算されたトルクと実測トルクとの比較

STEP4: バーチャル環境とのインタラクションの実装と評価

これまで片腕であった装置を、左腕を追加実装する形で両腕の装置(図10)に拡張し、バーチャル環境との物理的なインタラクションの実装と評価を行った。ここでは具体的に、左右それぞれの腕で仮想壁を押す実験を行った。その結果、個人差はあったものの、運動錯覚の生起に成功した。被験者においては壁を押す感覚が得られ、力学インピーダンスの設定によって壁の固さある程度調節できることが確認された。今後は、両腕を同時に使って、物体を挟む実験を行っていく予定である。両腕に対してほぼ無意識で動作させるような自然な運動が実現出来ていなければこのタスクの成功はままならないため、今後のシステム改良に向けての大きな試金石になると考えている。

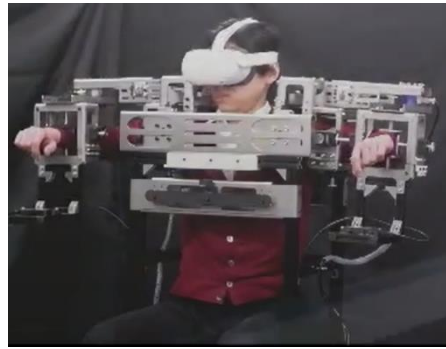
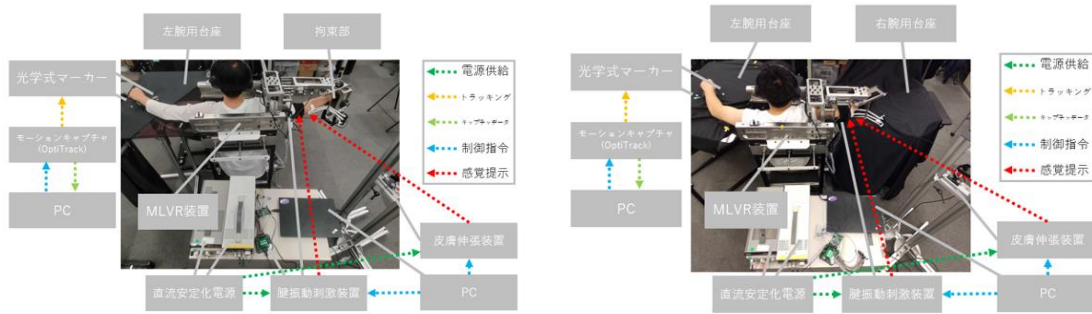


図10 拡張した両腕の装置

また、これら以外に試みた内容で成果が得られたものもあるため、報告する。

本研究課題のSTEP1で扱うような広範な姿勢での運動では、仮想身体の姿勢が実際の固定姿勢と大きく乖離することにより、運動錯覚の効果が大きく低減した。このような姿勢が乖離した状態での評価を研究開始当初では行っておらず、新たに出現した課題となった。これに対して、運動錯覚の効果を増強すべく試行錯誤を行い、皮膚を伸長(テープなどで引っ張る)させる刺激を追加することで大きな改善が見られた。これは、実際に肘などを屈曲・伸展させた際に、関節周りの腕の動きに合わせて、皮膚の張り具合が変化するものを仮想的に再現したものになる。

具体的には、図11の環境(拘束状態と非拘束状態の両方)で実験し、図12の結果を得た。



拘束状態における実験環境

非拘束状態における実験環境

図11 拘束状態(Motion-Less VR条件)と非拘束状態における実験環境

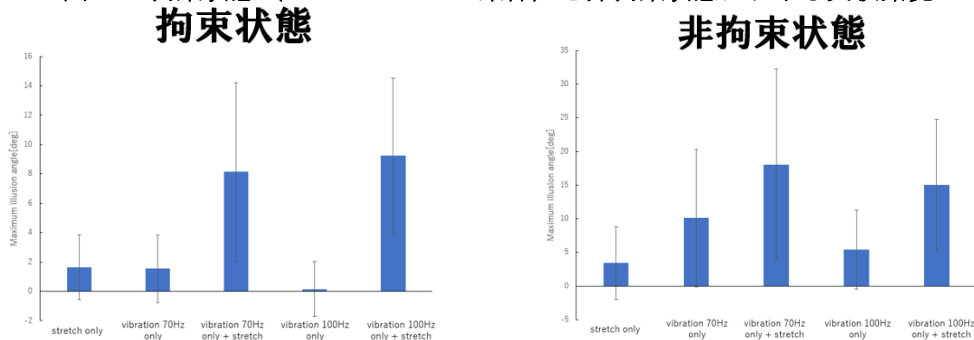


図12 拘束状態と非拘束状態における運動錯覚の度合い(錯覚角度)の実験結果

Motion-less VRで想定する固定状態では運動錯覚が低減しやすいが、皮膚伸長刺激の追加で劇的に改善される事が分かった。今後は運動錯覚量向上だけでなく、その制御に取り組みたい。

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 NAKAMURA Sousuke	4. 巻 33
2. 論文標題 Challenges for Immersive Virtual Reality and Initiatives in the Motion-Less VR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 89 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3156/jssoft.33.3_89	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 望月 典樹、今永 尚志、中村 壮亮	4. 巻 57
2. 論文標題 Motion-Less VRの研究：上肢2自由度運動を可能とするシステムの開発と基礎評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 418 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.418	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 石井光, 望月典樹, 中村壮亮
2. 発表標題 筋収縮時の筋紡錘神経発火モデルに基づく腱振動刺激による運動錯覚に関する基礎検討
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(SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村誠一郎, 望月典樹, 岡本夏葵, 中村壮亮
2. 発表標題 Motion-Less VR の研究：バーチャル身体の運動生成におけるリアル身体の姿勢の影響
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本夏葵, 望月典樹, 中村壮亮
2. 発表標題 Motion-Less VR の研究: パーチャル身体の力学モデルにおけるパラメータの個人適合による運動性能改善の検討
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生島 昇, 井口 純志, 大谷 拓也, 望月 典樹, 中村 壮亮
2. 発表標題 振動受容器への電気刺激による触運動時の粗さ感提示に関する基礎検討
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 N. Mochizuki, T. Imanaga, N. Okamoto, S. Nakamura
2. 発表標題 Research on Motion-Less VR: Comparative Evaluation of Surface EMG Signals Induced by Motion Intention Output under Body Immobilized and Normal Conditions
3. 学会等名 IEEE / SICE International Symposium on System Integration (SII 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Imanaga, N. Mochizuki, N. Okamoto, S. Nakamura
2. 発表標題 Research on Motion-Less VR: Comparison of Muscle Outputs between Motion Using Developed System and Natural Motion
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 夏葵, 望月 典樹, 今永 尚志, 中村 壮亮
2. 発表標題 Motion-Less VRの研究：身体固定状態での運動意図出力による筋活動に関する分析
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 土井滉次郎, 三島爽真, 生島昇, 田村誠一郎, 望月典樹, 中村壮亮
2. 発表標題 前腕の回内・回外を対象とした皮膚伸張刺激と振動刺激による運動錯覚の提示
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三島爽真, 土井滉次郎, 生島昇, 望月典樹, 中村壮亮
2. 発表標題 Motion-Less VR の研究：腱振動刺激と皮膚伸張刺激を組み合わせた運動感覚の提示に関する基礎検討
3. 学会等名 第24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 2023年

1. 発表者名 N. Okamoto, N. Mochizuki, S. Nakamura
2. 発表標題 Research on Motion-Less VR : The Effect of Physical Parameter Personalization in Motion Control of Virtual Body
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Ohgi, N. Mochizuki, S. Nakamura
2. 発表標題 Research on Motion-Less VR: Basic Examination of Restraining the Motion Using Muscle Electrical Stimulation
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 制御装置及び制御方法	発明者 中村壮亮、望月典樹	権利者 法政大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-101033	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

リアル身体での運動を伴わない身体没入型VRインタフェース【中村壮亮研究室HPのページ】 https://s-nakamura-lab.ws.hosei.ac.jp/
--

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	大谷 拓也 (Otani Takuya) (70777987)	早稲田大学・理工学術院・次席研究員(研究院講師) (32689)	
研究分担者	望月 典樹 (Mochizuki Noriki) (70823756)	法政大学・理工学部・助手 (32675)	

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