

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19806

研究課題名（和文）緊張性振動反射(TVR)を用いたNo Motion VRディスプレイの開発

研究課題名（英文）Development of No Motion VR Display Using Tonic Vibration Reflex

研究代表者

廣瀬 通孝 (Hirose, Michitaka)

東京大学・先端科学技術研究センター・名誉教授

研究者番号：40156716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、大きな体動なしに身体運動を感じさせることのできる手法を開発することである。本研究では、振動刺激や経皮電気刺激といった軽量で小型な装置で実施できる刺激に注目して、大きな体動無しに移動・運動の感覚をもたらす手法の研究を実施した。全身の移動感覚をもたらす手法として、座面への偏振動刺激による牽引力錯覚の生起に関する基礎研究を実施した。また、人が動きうる状態を作れるようなスライダ機構を開発し、これと座面振動を組み合わせ可能なシステムを開発した。また、2つの振動源による腱への刺激効果や足への経皮電気刺激の効果を用いたシミュレーションにて検証し、新たな刺激手法の設計について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

VRのHMDを利用した場合、テレワークでの使用を想定した場合、頭部の運動に伴って視空間が移動し、手に持ったコントローラのアクションによって、手が動く。つまり、身体性を伴った体験が可能となるのである。しかしながら、身体性を伴う体験をもたらす運動に利用できる空間リソースは多くの場合有限であり、十分に身体を動かせるスペースがない場合が多い。そこで、本研究では身体を動かしていないにも拘わらず、身体運動を知覚させることができ、身体運動ディスプレイを開発し、有限の現実空間リソース内で、広大なVR空間で自由に運動した感覚を振動刺激や経皮電気刺激等によってもたらす手法の開発に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a method to make people feel physical movement without large body movements. In this study, we focused on vibration stimulation and transcutaneous electrical stimulation, which are lightweight and small devices that can be used to create the sensation of movement and motion without large body movements. We conducted basic research on the generation of the illusion of a traction force by partial vibration stimulation of a seat surface as a method to produce the sensation of whole-body movement. We also developed a slider mechanism that can create a state in which a person can move, and a system that can combine this with vibration of the seat surface. The effects of two vibration sources on tendon stimulation and transcutaneous electrical stimulation of the foot were verified by finite element simulation, and the design of a new stimulation method was discussed.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：移動感覚 バーチャルリアリティ 感覚提示

1. 研究開始当初の背景

テレワークが社会的に必須な現在，在宅環境で様々な身体的体験を作り出せるコンパクトなVR技術の重要度が高くなった．現状のVR技術では，コンピュータ画面を見ながら，マウスやキーボードなどの汎用インタフェースを利用して，3D空間を視覚的に移動しつつ，空間性を持ったコミュニケーションや，空間性を活用した視覚的体験をもたらすものがテレワークにおいて利用されている．また，多少は一般社旗に認知され始めたVRヘッドセット(HMD:Head Mounted Display) を利用した場合，頭部の運動に伴って視空間が移動し，手に持ったコントローラのアクションによって，手が動く．つまり，身体性を伴った体験が可能となるのである．

しかしながら，テレワークでの使用を想定した場合，身体性を伴う体験をもたらす運動に利用できる空間リソースは多くの場合有限であり，十分に身体を動かせるスペースがない場合が多い．さらに，VR空間を利用したコミュニケーションの利点は，現実世界の空間リソースに縛られず，広大なスペースを活用できるという部分にある．

そこで，本研究では身体を動かしていないにも拘わらず，身体運動を知覚させることができ，身体運動ディスプレイを開発し，有限の現実空間リソース内で，広大なVR空間で自由に運動した感覚を振動刺激や経皮電気刺激等によってもたらす手法の開発を目指す．

2. 研究の目的

本研究の目的は，VRの分野で切望されている，大きな体動なしに身体運動を実感できる運動感覚を体感させるディスプレイ手法を開発することである．

3. 研究の方法

本研究では，(i)TVR効果の最適設計パラメータの同定，(ii)複数箇所を刺激した場合のクロスエフェクト効果の解明，(iii)具体的なインタフェースデバイスの試作とVR環境下での試験の3つの項目に注目して研究を実施する．

4. 研究成果

(1)全身の移動感覚をもたらす手法の検討

振動刺激によって手腕の運動感覚を引き起こす刺激については，田中[1]らの研究をはじめとして，様々な研究が実施されている．これらは，身体の一部の移動感覚であり，身体全体の移動感覚をもたらすものではない．そこで，本研究では全身の移動感覚をもたらす手法について検討した．特にテレワークにおいては，座位にてコンピュータを利用したタスクが多く，全身の移動感覚も座位にて移動した感覚がもたらされることが望ましい．このような制約の下，座面である腰部に対して，偏振動分布を形成し，椅子にけん引されている感覚を惹起しうるかどうかを検討した．座面に振動分布を形成するインタフェースデバイスは，図1のような振動子を25個並べたアレイを準備した．この振動子の振動方向は，面に平行な方向である．

この振動インタフェースを利用して，臀部と腰部に振動インタフェースを押し当てて座り，背中や腰がどの方向にけん引されているのかを，回答してもらう実験を実施した．この時に，振動パターンは変曲点(偏振動の極性変化点)の有無ごとに，導出したところ，図2のようになった．

この振動分布面を形成するインタフェースを利用した腰部の牽引力の方向知覚の正答率はまだ十分に高くはないものの，チャンスレベルよりも有意に高い条件があり，かつ回答の偏りを示すスコアにおいても同様に優位な差がみられた条件があった．

(2)座面振動をベースとした移動感覚ディスプレイの開発

述を受けて，本研究では座面振動分布による牽引力を移動感覚の惹起へとつなげるべく，機械式低摩擦スライダーを構築した．船や電車などの乗り物に乗っていると，自分が移動しているの



図1：振動インタフェース

	圧力 [kgf]	正答率	p-value
変曲点なし	1	0.538	0.0631 †
	2	0.559	0.00300 **
	4	0.506	0.782
	8	0.513	0.553
変曲点あり	1	0.520	0.323
	2	0.553	0.00804 **
	4	0.511	0.607
	8	0.534	0.0891 †

(†p<0.1 *p<0.05 **p<0.01)

図2：牽引力の方向の正答率

か停止しているのか判然としないが、地面に立って HMD を装着して映像を見ているだけでは自分が動いたように感じないというように、移動感覚は“自身が動きうるかどうか”という、自己状態の認知に影響を受けうる。そこで、本研究では“自身が動きうる状態”を機械的に作り出すための機械プラットフォームを構築した。

このプラットフォームは、研究遂行の理由から 1 辺約 180cm で構築したが、実際には移動感覚を生起するにはより小型なプラットフォームとして制作してもよいものと考えられる。さらには、非常に摩擦を低く構築できるならば、キャスター付きの椅子などでもこれを代用できるものと考えられる。

本研究において、このプラットフォームを構築したものの、プラットフォームを利用したときの牽引力と移動感覚の関係やその効果を体験できる VR デモンストレーションの構築までは至っていない。今後も本研究の成果を発展させる形で、全身を含めた移動感覚の惹起手法とその体験コンテンツの制作を実施していく予定である。

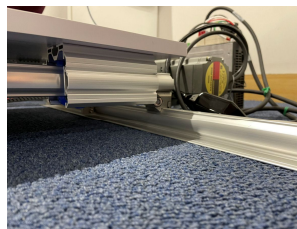


図 3：スライダの設計

(3) 複数振動源を持つ腱振動刺激シミュレーション

本研究では複数箇所を刺激した場合のクロスエフェクト効果に着目した研究として、複数の振動源の合成波による腱振動刺激の有限要素解析を実施した。このシミュレーションによって、振動刺激の位置や位相ずれなどの振動刺激パラメータが対象とする筋や腱に対して効果的に振動を伝達できる刺激を設計できるものと考えられる。このシミュレーションでは、Zygo 社の Solid Male 3D モデルを採用し、問題を簡単化するために、肘関節のみを残して上腕と前腕を削除し、その断面を固定高速条件としたときに、肘関節上に設置された振幅 0.1mm、周波数 90Hz の正弦波振動している 2 つの振動子の位相ずれによって腱の変形がどの程度もたらされるのかを、Comsol Multiphysics の構造力学モジュールを利用してシミュレーションした。

このシミュレーションの結果、位相ずれにより、腱や筋上に発生する経時的な変位、つまり振動の分布が大きく異なることが分かった。つまり、振動子の位置と振動周波数、位相ずれと刺激対象組織の関係によって、最適な振動刺激を設計しうるものと考えられる。一方で、本研究で用いた構造力学モジュールによる振動解析では、1 つの振動刺激条件において、振動 1 周期分を 10 回として計算をした場合、条件にもよるが長いもので 30 時間程度 (Core-i9, メモリ 128GB のラップトップコンピュータで計算) がかかる場合もあった。つまり、この振動刺激の最適化計算において、振動子位置を固定し、その間での位相ずれ程度であれば、現実的な時間で最適条件を探索可能である可能性が示唆されるものと考えられる。

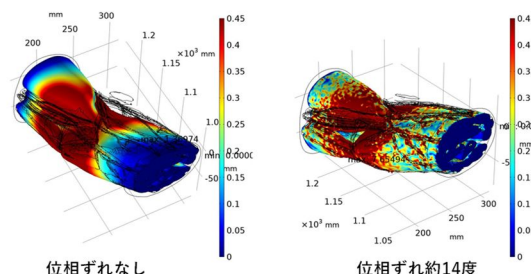


図 4：肘関節での 2 つの振動子による筋肉の変位計算結果 (振動開始 0.008 秒後)

表：身体組織の密度・ヤング率・ポアソン比

先行研究、データベース、書籍を参考に決定。ポアソン比は振動子以外は 0.49 とした

	振動子	内部組織	皮膚	軟骨	血液	筋肉	骨	血管	神経	
密度	7870	1036	1169	1100	1102	1090	1906	1102	1075	kg/m ³
ヤング率	2.00E+11	3.41E+05	5.00E+05	2.90E+06	1.00E+05	1.02E+05	3.30E+09	1.00E+05	1.00E+07	Pa
ポアソン比	0.29	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	

(4) 足首の腱への経皮電気刺激の可能性検証と最適設計

移動感覚は手関節や身体全体の移動だけでなく、人の移動を支える足部・脚部の運動感覚が強く影響を与えるものと考えられる。特に、足の運動感覚は足首の腱の感覚の寄与は大きいものと考えられる。足は身体を支える重要な機械的機能を持つため、振動等による力学的な刺激を提示するよりも、力学的な作用を及ぼさない電気刺激等の刺激の方が様々な観点から堅牢で安全なシステムとなりうると思われる。先行研究 [2] において、足首の腱への経皮電気刺激の有効性は検証されているもの、その刺激の最適化には至っていない。そこで本研究では、足首の腱への経皮電気刺激の電極位置の最適化を目指し、足首の腱上に経皮電気刺激の電流が形成する電流密度分布を条件を変えて逐次計算を繰り返すことのできるアプリケーションのプロトタイプを構築した。このアプリケーションは、シミュレーションソフトである、Comsol Multiphysics と Matlab を使い Comsol with Matlab に組み込まれている API を用いて、条件を変えて逐次計算を実行し、電流密度分布を条件ごとに比較することのできるシステムとなっている。このシステムを足の身体 3D モデルに対して適用し、適切に動作することが確認で

きるところまで研究が進展している。この成果は、現状は脚部を対象にしたシミュレーションとして活用しているが、経皮電気刺激を対象とした様々な刺激の最適化設計にも応用しうるため、これらに関連した研究を発展させうる成果となったと考えている。

参考文献：

1. 田中叡 他：腱振動刺激による運動錯覚を用いた動かないハプティックインタフェースの予備的検討，第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，(2019)
2. Takahashi et.al, , "Sensation of Anteroposterior and Lateral Body Tilt Induced by Electrical Stimulation of Ankle Tendons", Front.VR, 3: 800884 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0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 廣瀬通孝	4. 巻 106 (8)
2. 論文標題 メタバースのこれまでとこれから	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 698-704
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 無
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 青山 一真	4. 巻 125
2. 論文標題 ニューノーマルな生活様式を支える神経刺激インタフェース(<特集>withコロナにおける新たな生活様式を支える技術)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Mechanical Engineers	6. 最初と最後の頁 6~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jsmemag.125.1244_6	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8件（うち招待講演 6件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 太田貴士, 雨宮智浩, 葛岡英明, 青山一真
2. 発表標題 有限要素法を用いた足首の腱電気刺激における電極位置の最適化の試み
3. 学会等名 第4回神経刺激インタフェース研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 青山一真
2. 発表標題 経皮電気刺激による感覚提示と効果器アクチュエーション
3. 学会等名 メディアエクスペリエンスとバーチャル環境基礎研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田貴士, 雨宮智浩, 葛岡英明, 青山一真
2. 発表標題 有限要素法を用いた足首神経束電気刺激手法の検討
3. 学会等名 メディアエクスペリエンスとバーチャル環境基礎研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 廣瀬通孝
2. 発表標題 VRからメタバースへ
3. 学会等名 エジソンの会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬通孝
2. 発表標題 DXとVRの融合世界: メタバースが切り拓く新たなビジネス領域
3. 学会等名 フロントオフィスDXPO東京 '22 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬通孝
2. 発表標題 VRからメタバースへ
3. 学会等名 ジャパンディスプレイ講演会招待講演 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬通孝
2. 発表標題 メタパースのこれまでとこれから
3. 学会等名 Japan IT Week【秋】2023セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣瀬通孝
2. 発表標題 VR/メタパースはどこに向かうのか
3. 学会等名 第16回トレイグジスタンス研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 服部桂，宮川祥子，青山一真，石黒浩，神原咲子，熊崎博一，山海嘉之，為末大，水流聡子，ドミニク・チェン，尾藤誠司，三宅陽一郎，吉川雄一郎，吉藤オリイ	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本看護協会出版会	5. 総ページ数 256
3. 書名 人工知能はナイチンゲールの夢を見るか	

〔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
研究 分担者	雨宮 智浩 (Amemiya Tomohiro) (70396175)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	青山 一真 (Aoyama Kazuma) (60783686)	東京大学・先端科学技術研究センター・特任講師 (12601)	
研究分担者	伊藤 研一郎 (Ito Kenichiro) (30805578)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教 (12601)	

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