

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18699

研究課題名（和文）下肢は上肢より操作が上手？下肢の不器用さを物理と心理で解明・支援し潜在能力を解放

研究課題名（英文）Is the lower limb better at controlling than the upper limb? Unlocking the potential of the lower limb by clarifying and supporting the clumsiness through physics and psychology

研究代表者

小森 雅晴（KOMORI, Masaharu）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：90335191

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）：下肢の不器用さの調査実験を行った。被験者がディスプレイに表示される方向と同じ方向を意図して足で力を出す状況において、一部の方向では被験者が意図した力の方向と実際に出した力の方向が異なるという特性があることを示した。また、表示された方向と実際の方向の違いを定量的に分析し、顕著な3つの特性があることを示した。次に、この特性を考慮して、実際の足が発揮する力の測定データから、適した操作指令を算出する操作システムを構築した。そして、それを評価するシステムを構築し、それをを用いて提案した操作指令法を評価して有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上肢は多自由度な動作が可能であり、ロボット等を操作することができる。下肢も多自由度な動作が可能であるため上肢と同様の操作ができる可能性があるが、下肢は上肢と比べて不器用であるという課題がある。しかし、下肢の不器用さについて解明し、それを支援することができれば、下肢で上手に操作できる可能性がある。本研究では実験を行い、下肢の不器用さについてその一面を明らかにした。また、不器用さを支援する操作指令方法を構築した。これにより下肢で上手に操作できる可能性があることを示したことは、学術的、社会的に意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：An experiment was conducted to investigate clumsiness of the lower limb. It was showed that when subjects intend to exert force with their foot in the same direction as the direction shown on the display, the direction of force intended by the subjects differed from the direction of the force actually exerted in some cases. We quantitatively analyzed the difference between the displayed direction and the actual direction and showed that there were three notable characteristics. Next, an operation system was built that takes these characteristics into account and calculates appropriate operation commands from measurement data of the force actually exerted by the foot. We then built an evaluation system and used it to evaluate the proposed operation command method and demonstrated its effectiveness.

研究分野：機械工学

キーワード：下肢 操作

## 1. 研究開始当初の背景

上肢は多自由度な動作が可能であり、ロボット等を操作することができる。下肢も多自由度な動作が可能であるため上肢と同様の操作ができる可能性があるが、下肢は上肢と比べて不器用であるという課題がある。しかし、下肢の不器用さについて解明し、それを支援することができれば、下肢で上手に操作できる可能性があるが、そのような研究はあまりなされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では下肢による操作を対象として、下肢の不器用さについて、その特徴を理解することを目的とした。また、その不器用さを考慮することで、下肢による操作を支援する方法を開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

まず、足が発揮する力の方向を計測するデバイスと、発揮すべき力の方向を被験者に指示して実際の力の方向を計測するシステムを構築した。それを用いて実験を行い、実験結果を分析することで、足の意図した力の方向と実際の力の方向を比較した。次に、足の意図した力の方向と実際の方向の関係を考慮して、足で操作指令する方法を提案した。そして、足で画面内の操作対象物を操作して目標位置まで移動させる評価システムを構築した。それを用いて実験を行い、足の意図した力の方向と実際の方向の関係を考慮する操作指令法の効果を調査した。

## 4. 研究成果

足の意図した力の方向と実際の力の方向を比較する実験を行った。実験の状況の概要図を図1に示す。被験者は椅子に座り、右足をアイソメトリックデバイスに固定する。被験者から0.5 m離れた位置にあるディスプレイには仮想空間が表示される。ディスプレイ上で指示される方向に足で力を出すように被験者に指示した。この方向を被験者が意図した方向として扱う。一方、足から実際に出された力の方向はアイソメトリックデバイスによって計測される。

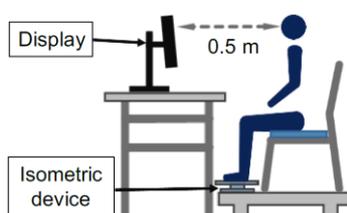


図1 実験の状況

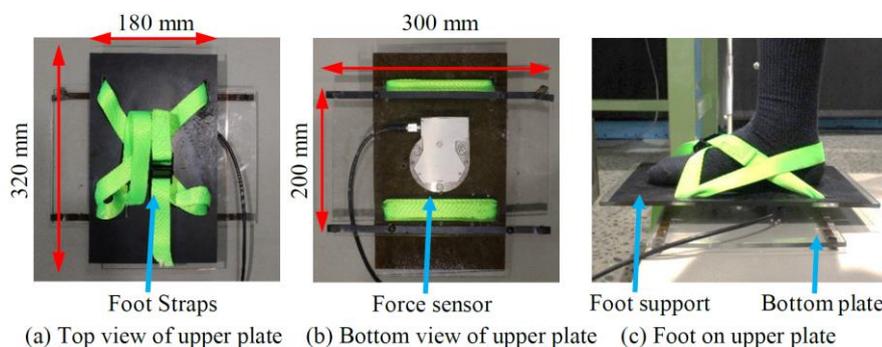
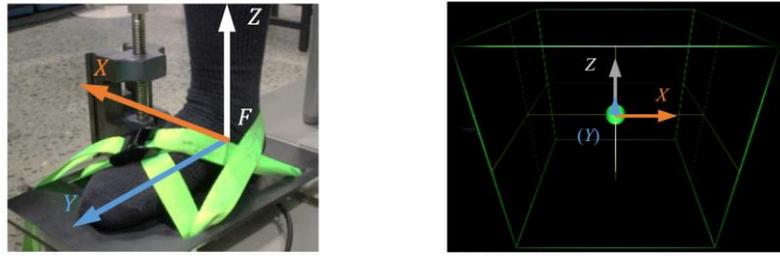


図2 開発したアイソメトリックデバイス

図2に示すように、アイソメトリックデバイスは底板、力センサ、足サポート板、ストラップから構成されている。底板は基礎に固定されている。ストラップによって足を足サポート板に固定する。もしも足と足サポート板の間で滑りが生じる可能性がある場合、被験者はすべりを起こさないような動きをする可能性があり、被験者の自然な動作を計測することができない。これを避けるためストラップを用いた。図3に足と仮想空間に定義したX軸、Y軸、Z軸を示す。



(a) Basic foot posture and foot coordinate system (b) Virtual object coordinate system  
 図3 足と仮想空間に定義したX軸、Y軸、Z軸

次に評価用のゲームを構築した。このゲームでは画面内に矢印が表示され、被験者はその方向を意図して足の力を発揮する。これを様々な方向を対象にして行った。一例として、ある被験者の実験で計測された力を図4に示す。オレンジ色、水色、灰色の各線は、それぞれ、X軸方向、Y軸方向、Z軸方向の力を意図した場合の実際の力である。この結果より、意図した方向の力に加えて、意図しない方向の力も生じている場合があることがわかる。ここで、意図した方向の力を $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ とし、意図しない方向の力を $\tilde{F}_x$ 、 $\tilde{F}_y$ 、 $\tilde{F}_z$ と表す。

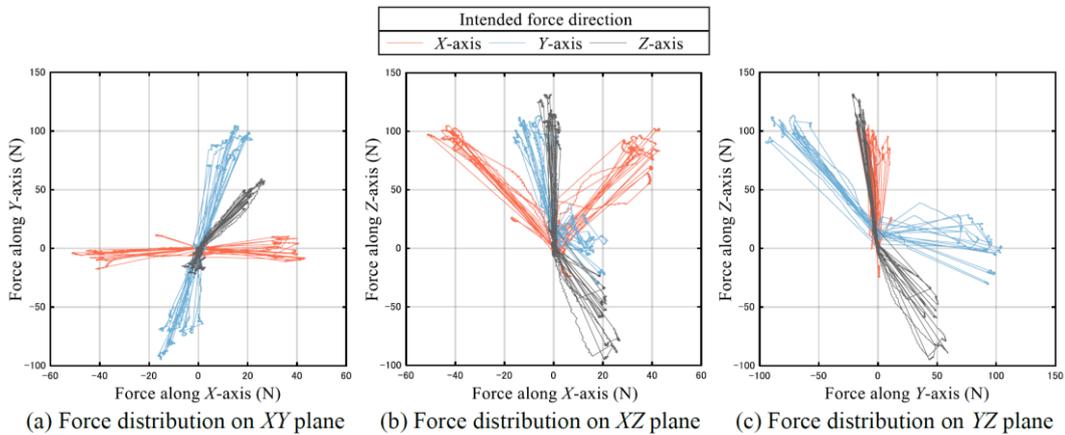


図4 実験で計測された力

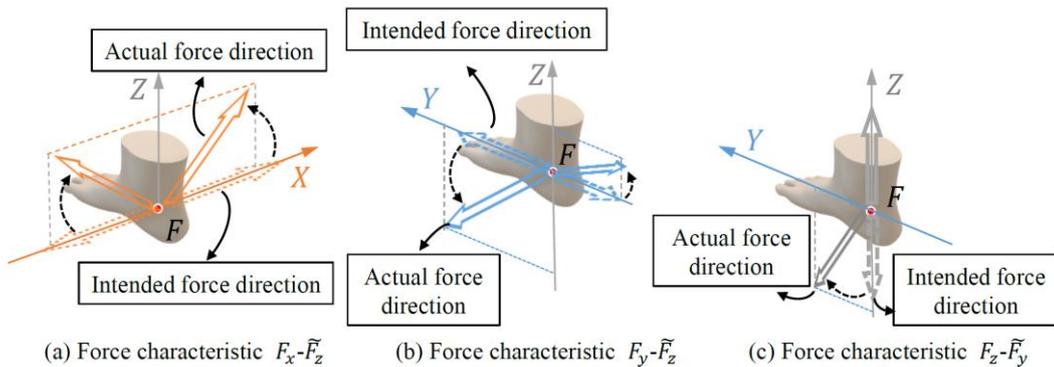


図5 意図した力の方向と実際の力の方向の比較

実験の結果、顕著な3つの特性を見つけた。これらを特性 $F_x - \tilde{F}_z$ 、 $F_y - \tilde{F}_z$ 、 $F_z - \tilde{F}_y$ と呼ぶこととする。図5(a)は特性 $F_x - \tilde{F}_z$ を示す。これは左あるいは右の方向に力を発揮しようとする、無意識に上方の力も発揮することを意味する。図5(b)は特性 $F_y - \tilde{F}_z$ を示す。この特性は足で前方の力を意図すると下方の力も同時に発生し、一方、後ろ方向の力を意図すると上方の力も同時に発生することを意味する。図5(c)は特性 $F_z - \tilde{F}_y$ を示す。これは下方に力を出そうとする、前方の力も同時に出ることを意味する。

これらの結果、意図した方向の力だけでなく、意図しない方向の力も同時に発揮されることがわかった。そのため、計測された力の方向に操作対象物が動くように指令をすると、意図しない方向の力も含む方向に操作対象物が移動することとなり、正確な操作ができなくなる。この問題を解決する目的で操作指令法を提案した。例えば、特性 $F_x - \tilde{F}_z$ では $F_x$ の力の大きさと $F_z$ の力の大きさが比例することがわかった。そこでこの関係を利用して、計測された $F_z$ には $F_x$ に起因する意図しない力が含まれていると考えて、それを差し引く変換方法を提案した。 $F_y - \tilde{F}_z$ 、 $F_z - \tilde{F}_y$ について

も同様の提案をした。

次に提案した操作指令法を評価するためのシステムを開発した。ここでは多自由度ロボットを仮想操作対象物 IOO (imaginary operated object) に変更して表示する。仮想操作対象物は黄色の三角形で、先端に緑色の球がついている。緑色の球が仮想操作対象物の代表点を意味している。黄色の三角形の向きは仮想操作対象物の姿勢を示す。

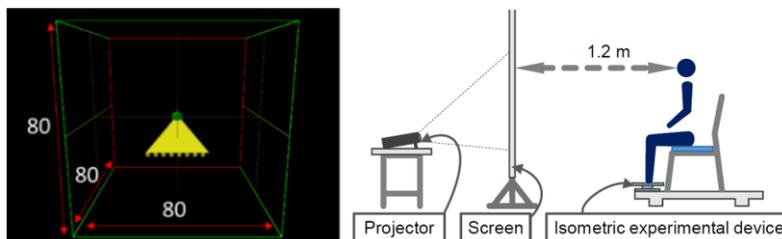


図6 仮想操作対象物と実験状況

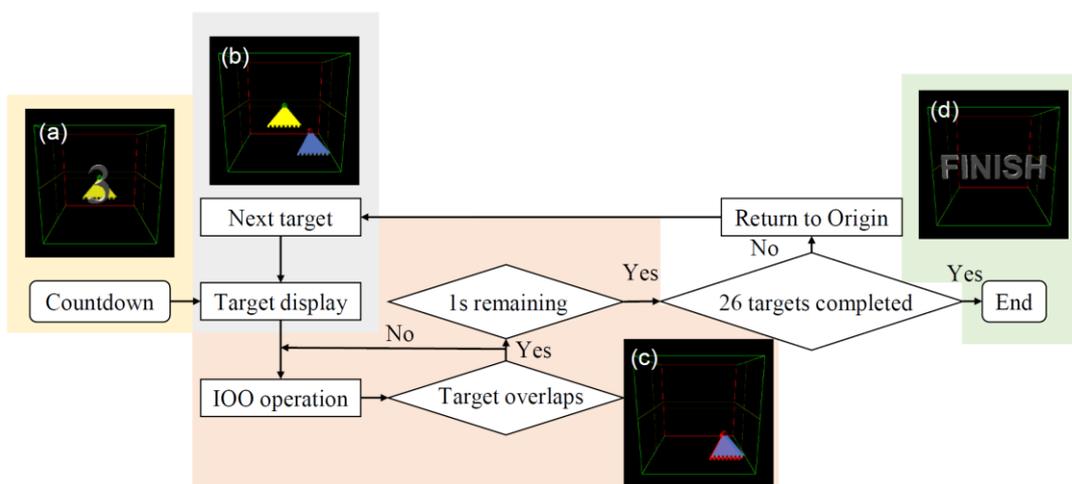


図7 操作指令方法の評価ゲームの流れ

■ Conventional operating method ■ Proposed operating method \* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$

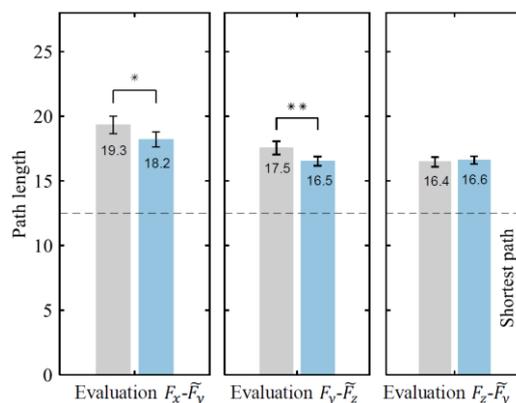


図8 操作指令法の有効性の評価実験の結果

仮想的な操作空間と仮想操作対象物がスクリーン上に表示される。被験者はスクリーンから1.2m 離れて座る。前述の実験と同じようにアイソメトリックデバイスを右足に固定する。この実験では被験者は仮想操作対象物を操作して、ターゲットに重ねることを目指す。ゲームの流れは図7と以下に示すとおりである。

- (1) 仮想操作対象物が中央に表示される。5秒のカウントダウンが始まる。
- (2) カウントダウンが0になるとターゲットが現れる。
- (3) 被験者が仮想操作対象物を操作して、ターゲットに重ねてその状態を1秒間維持する。これで1回目のタスクが完了となる。
- (4) ステップ(2)と(3)を繰り返す。

仮想操作対象物はターゲットに十分に近くなると赤色に変化する。仮想操作対象物を止めるた

めにはアイソメトリックデバイスに入力する力をゼロにする必要があるが、厳密にゼロにすることは難しいため、計測された力が 6N 未満の場合はゼロとして扱った。

実験結果を図 8 に示す。縦軸は操作対象物の移動経路の長さを意味しており、直線的に無駄なく移動するほうが値が小さく、理想経路に近いことを意味する。図 8 より、特性 $F_x-\tilde{F}_z$ 、あるいは、特性 $F_y-\tilde{F}_z$ を考慮した操作指令法では従来方法と比較して有意に値が小さくなった。

次に操作プロセス全体を初期主操作段階、中間主操作段階、微調整段階の 3 つのパートに分け、実際の経路と理想経路との差を調査した。主操作段階は、対象物を操作してターゲット付近まで移動させる段階を意味する。分析の結果、提案した操作指令法を用いることで、 $F_x-\tilde{F}_z$ 、 $F_y-\tilde{F}_z$ では主操作段階において、理想経路と実際の経路の差を低減できることがわかった。これらの結果、提案した操作指令法の有効性を示すことができた。

#### <引用文献>

Yang LI, Siying LONG, Tatsuro TERAOKAWA, Hirotaka FUJITA and Masaharu KOMORI, Foot force characteristics when using foot-controlled isometric device and operating method based on them, Mechanical Engineering Journal, Vol.11, No.1, (Published Online: Feb 5, 2024), (23-00547) (19 pages).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 LI Yang、LONG Siying、TERAKAWA Tatsuro、FUJITA Hirotaka、KOMORI Masaharu	4. 巻 11
2. 論文標題 Foot force characteristics when using foot-controlled isometric device and operating method based on them	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	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） 10.1299/mej.23-00547	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0件

〔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
研究分担者	野村 理朗  (NOMURA Michio)  (60399011)	京都大学・教育学研究科・准教授    (14301)	
研究分担者	寺川 達郎  (TERAKAWA Tatsuro)  (10847982)	京都大学・工学研究科・助教    (14301)	

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