

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02053

研究課題名（和文）人のように車のように移動できる屋内屋外用全方向移動乗り物の開発と足操作性の解明

研究課題名（英文）Development of an indoor / outdoor omnidirectional vehicle that can move like a car like a person and elucidation of foot operability

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） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：足の多自由度操作の特性を定量的に評価するシステムを構築した。実験により、足操作について移動経路の精度などの点から定量的に評価した。人の足の動作特性を調査し、人の意図した足の動きと実際の動きには違いがあることを明らかにした。足の動作特性を考慮し、適切に指令する操作法を構築し、検証実験を行った。提案する全方向移動機構について、成立条件の調査や、移動速度を変化させる場合などを対象とした運動状態の分析、実験装置の製作、検証実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近距離の快適な移動が社会から求められている。このため、屋内をスムーズにどの方向にも移動でき、屋外や道路での移動もできる1人用移動装置が必要とされている。そこで本研究では、屋内での全方向移動から、高い速度での道路走行まで、人のように車のように移動できる屋内屋外用全方向移動乗り物を実現することを目的として研究を行った。また、研究代表者が提案した全方向移動機構の成立条件の分析や足操作性の調査など、学術的な調査を行った。

研究成果の概要（英文）：A system was constructed to quantitatively evaluate the characteristics of multi-degree-of-freedom operation of foot. Through experiments, the foot operation was quantitatively evaluated in terms of the accuracy of the movement path. By investigating the movement characteristics of foot, it was clarified that there is a difference between the intended movement and the actual movement. Considering the movement characteristics of foot, an operation method to give appropriate commands was constructed, and verification experiments were conducted. For the proposed omnidirectional movement mechanism, we investigated the necessary conditions, analyzed the motion state for cases where the movement speed was changed, manufactured an experimental device, and conducted verification experiments.

研究分野：機構学

キーワード：全方向移動 乗り物 足操作性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

近距離の快適な移動を実現するため、屋内をスムーズにどの方向にも移動でき、屋外や道路での移動もできる1人用移動装置が求められている。しかし、従来の移動装置は両方の機能を1台で実現することは困難であった。また、このような装置や機械装置を足で操作できればより便利なものにすることができるが、足で操作することについて研究が進んでおらず、どのような課題があり、どのようなことを考慮する必要があるのかなど明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

本研究では研究代表者が提案した全方向移動機構の移動原理を基にして、屋内での全方向移動から、高い速度での道路走行まで、人のように車のように移動できる屋内屋外両用全方向移動乗り物を実現することを目的とする。また、このような装置や機械装置を足で操作することを可能にするため、足で操作する場合の操作性や、足の動作特性を調査し、その特性を考慮して、足の動きで操作する方法を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

足の多自由度操作の特性を定量的に評価するための評価システムを構築した。そこでは足の動作によって仮想空間中の仮想操作対象物进行操作する。仮想空間中にターゲットを表示してそれに合うように仮想操作対象物进行操作する評価ゲームを作成した。提案した評価システムを使用した実験を行い、実験結果について分析した。

人の足の動作の特性の解明と、操作法の構築、評価を行った。人の意図した足の動きと実際の動きの違いを調査した。画面内に仮想操作対象物を表示し、被験者は仮想操作対象物を自分の足の動きで操作しているという設定の下で足を実際に動かさず実験を行い、この結果を分析した。また、足の動作特性を考慮した操作法を構築し、検証実験を行った。

提案した全方向移動機構について、その原理、性質、成立条件を検討した。移動速度が一定の場合やそれを変化させる場合、移動方向を切り替える場合、円弧運動をする場合を対象として運動状態を分析した。また、その実験装置を製作し、動作実験を行った。

研究の方法の詳細については次章で説明する。

### 4. 研究成果

足の多自由度操作の特性を定量的に評価するための評価システムを構築した<sup>(1)</sup>。足の動作による操作と比較するため、手の動作でも同様に操作できるシステムとした。提案したシステムでは、仮想空間に配置された仮想操作対象物进行操作する方法を採用した。図1は操作者に提示される仮想操作対象物を示す。仮想操作対象物は、位置と姿勢に関して最小限の機能を備えた単純な物体とする必要がある。ここでは、先端に緑色の球が固定された黄色の三角形を仮想操作対象物として採用した。緑の球は仮想操作対象物の位置の代表点を示し、三角形の方向は仮想操作対象物の姿勢を表している。各面を区別するために、裏面にはドットのパターンがあり、底面と側面には方向の異なる縞模様がある。仮想操作対象物の操作可能な範囲である仮想操作空間は、緑色の辺を持つ立方体で示されている。操作者は仮想操作空間と仮想操作対象物を斜め上から見ている状態としている。

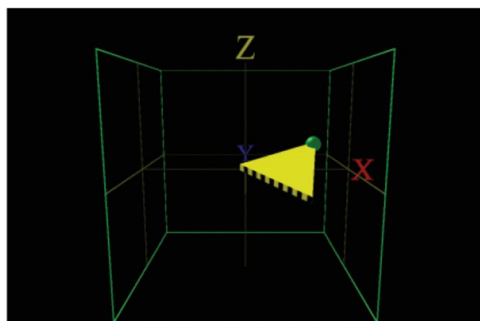


図1 仮想操作空間と仮想操作対象物<sup>(1)</sup>

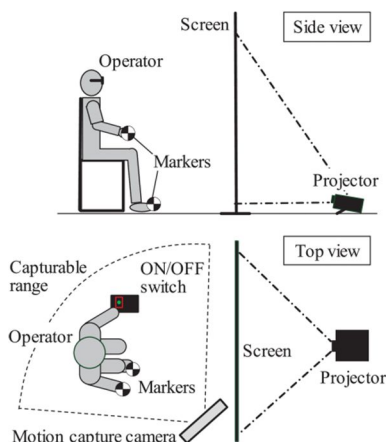


図2 実験状況の模式図<sup>(1)</sup>

図2は実験の状況を模式的に示す。仮想操作空間と仮想操作対象物は、3D空間表示用のコンピュータソフトウェアによって描画され、専用のプロジェクターでスクリーンに投影される。操

作者はアクティブシャッターメガネを着用しており、仮想操作空間と仮想操作対象物を立体的に見ることができる。

身体の部位のジェスチャーを測定して仮想操作対象物の位置と姿勢を操作する方法として、本研究ではマスタースレーブ法を使用する。モーションキャプチャーで手または足の位置と姿勢を測定し、仮想操作対象物にそれと同じ動きを実行するように指令することで、仮想操作対象物の位置と姿勢の6自由度の動きを操作する。また、本研究では操作のON/OFF切り替えを行う。ON状態とは、手足の動きが仮想操作対象物に入力され、それを操作する状態を意味する。OFF状態とは、手足の動きが仮想操作対象物に入力されない状態であり、手や足の状態を一旦リセットするために使用する。具体的には次のように操作する。まず、操作者は仮想操作対象物をON状態で操作する。手や足が可動範囲の限界に近づき、動作中に状態を維持することが難しくなると、OFF状態に切り替える。その後、操作者は手や足を快適な状態に戻した後、再びON状態にして操作を開始する。これを繰り返すことで、手や足の可動範囲に関係なく、仮想操作対象物を任意の目標位置・姿勢に移動させることができる。位置の操作については、手や足の座標の変位を仮想操作対象物の座標の変位に追加する。この場合、仮想操作対象物は手や足と同じ方向に移動する。姿勢操作については、操作者から見た手足の回転軸ベクトルと回転角が、操作者から見たスクリーン上の仮想操作対象物の回転軸ベクトルと回転角に一致するように、手足の姿勢変位を仮想操作対象物に入力する。

この評価システムを用いて、足の動きを用いる操作法を定量的に評価し、手を用いる操作法と比較する実験を行う。実験では、図3に示すように、仮想操作対象物と同じ形状のターゲットを仮想空間に表示し、操作者が仮想操作対象物を操作してターゲットと重ねるようにする評価ゲームを行った。ターゲットは、ランダムな位置と姿勢で仮想操作空間に現れるようにした。ただし、操作者が側面または底面しか見えない場合、ターゲットの姿勢を判断することが困難であったため、そのようなターゲットは除外している。仮想操作対象物とターゲットの位置が一致すると、三角形の先端に固定された球が緑から赤に変わり、操作者がそれを理解できるようにする。仮想操作対象物とターゲットが完全に重なると、図3(c)に示すように、仮想操作対象物全体が赤で表示される。この状態が1秒間続くとターゲットはクリアされたと判断する。

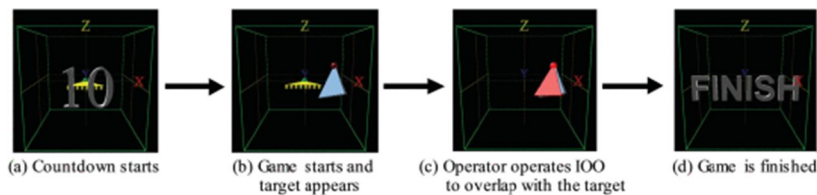


図3 評価ゲーム<sup>(1)</sup>

実験では、ゲーム終了までに要した時間を意味するクリアタイム、ゲーム内の仮想操作対象物の移動経路、操作者へのアンケート調査を操作性の評価指標として使用した。仮想操作対象物を短時間で目標位置・姿勢に移動させることができると操作性が良いと考えられることから、これをゲームのクリアタイムで評価した。また、無駄な動きが少ないと操作性も高いと考えられることから、初期位置から目標位置までの最短経路長と仮想操作対象物が動いた経路長の比を評価に用いた。この比が1に近くなると移動経路が最短経路に近いことを意味し、無駄の少ない動作をしていると判断できる。これらの客観的指標に加えて、各操作方法の主観的評価を調査するためにアンケート調査を実施した。評価項目は「仮想操作対象物の操作が容易かどうか」とし、VAS(Visual Analog Scale)法をアンケートに用いた。

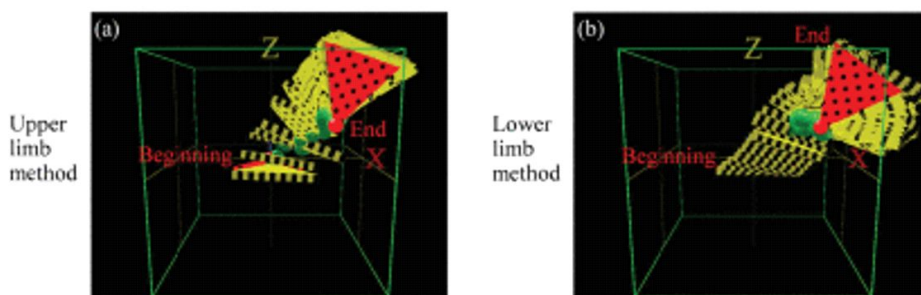


図4 手による操作と足による操作での仮想操作対象物の動きの例<sup>(1)</sup>

図4は、ある被験者のあるゲームで観察された仮想操作対象物の動きを示す。図4左側に示す



手を用いた操作では、仮想操作対象物が初期状態から目標状態に直接的に移動しているように見える。一方、足を用いた操作では初期状態から目標状態まで移動する間に無駄な動きが見られる。

図 5(a)は、すべての被験者のゲームごとのクリアタイムの平均値と信頼区間を示す。手による操作と足による操作の平均クリアタイムはそれぞれ 10.0 秒と 18.0 秒であり、5%の有意水準で有意差があった。足操作のクリアタイムは手操作のそれより約 79%長い結果となった。クリアタイムの標準偏差は、手では 2.5 秒、足では 4.3 秒であり、足での操作ではクリアタイムの変動が大きくなった。

1回のゲームで被験者が ON/OFF 状態を切り替えた回数の平均値と信頼区間を図 5(b)に示す。平均値は手による操作では 3.9 回、足による操作では 7.1 回であり、足では約 82%だけ値が大きくなった。図 5(a)と(b)を比較すると、クリアタイムと ON/OFF 切り替え回数に相関関係がある可能性がある。一般的に、足関節は手関節よりも可動範囲が小さい。特に姿勢動作における関節可動域の制限のために、被験者が ON/OFF 状態を数回切り替えた動作を入力したため、足操作のクリアタイムが長くなったことが示唆される。

図 5(c)は、すべての被験者のゲームごとの経路長比の平均値と信頼区間を示す。経路長比の平均値は、手による操作と足による操作でそれぞれ 0.40 と 0.19 であり、5%の有意水準で有意差があった。足操作は手操作よりも約 109%悪い値となっている。この結果は、足操作が手操作よりも操作中に無用な動きをしていることを意味する。手による操作と比較すると、足による操作に人が慣れていないと考えられ、その結果、足操作については動きが不正確となったと考えられる。

アンケート結果を図 5(d)に示す。すべての被験者の平均値は、手による操作で 74.6、足による操作では 46.0 であり、これらの結果の間には 5%の有意水準で有意差があった。手による操作と比べて足による操作の方が 39%ほど操作が困難であると被験者が感じたことを意味する。この結果は、クリアタイムや経路長比に関する結果と同様である。

これらの結果より、提案した評価システムを用いることで、多自由度操作における足の操作性を定量的に評価でき、また手操作の操作性と比較することができることを示した。

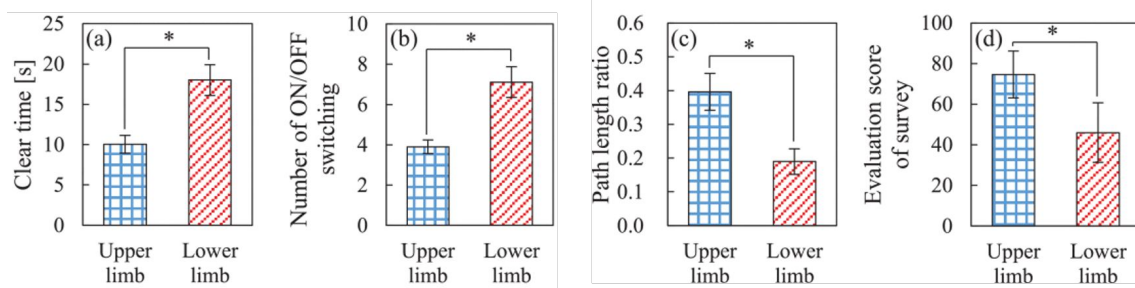


図 5 手操作と足操作の実験結果 (\*:  $p < 0.05$ ) <sup>(1)</sup>

ファジィ推定を用いて位置操作と姿勢操作の理想度を定量的に評価する方法を提案した。その結果、足操作の理想度は手操作よりも 20%から 25%低いことを明らかにした。また、理想度は位置操作よりも姿勢操作の方が約 13%低いことを示した。仮想操作対象物をターゲットに移動させる操作をマクロアプローチ操作と調整操作に分けられると仮定して、ファジィ推定に基づく操作粗さ指標を定義した。これを用いてマクロアプローチ操作を評価した結果、足操作は手操作よりも 1 回あたりの移動距離、回転角度、回転速度が小さいことを明らかにした。

人の足の動作の特性の解明と、操作法の構築、評価を行った<sup>(2)</sup>。人の意図した足の動きと実際の動きの違いを調査した。画面内に仮想操作対象物を表示し、それが動く様子を被験者に示した。被験者は仮想操作対象物を自分の足の動きで操作しているという設定の下で足を実際に動かした。すなわち、被験者は仮想操作対象物の動作と同じ動作を足で行うことを意図して自分の足を動かした。その際の被験者の足の実際の動作をモーションキャプチャーで計測した。仮想操作対象物の動作を被験者が意図した動作と考え、この意図した足動作と計測された実際の足動作を比較した。仮想操作対象物の動作として単純動作から複合動作まで示した。次に足の動作特性を考慮し、実際の足の動作から操作者が意図した動作を推測し、適切に変換して指令する操作法を構築し、検証実験を行った。

提案した全方向移動機構については、その原理、性質、成立条件を検討し、機構構成の影響を明らかにした。移動速度が一定の場合やそれを変化させる場合、移動方向を切り替える場合、円弧運動をする場合を対象として運動状態を分析した。また、その実験装置を製作し、これを用いて動作実験を行い、理論的に解明した原理が正しいかを検証した。また、条件を変更した実験を行い、理論との比較をすることで、実稼働状態での機構の特性を調査した。具体的には、まず、一方向への移動実験を行い、その結果、本機構ではその運動が可能であることを確認した。一方、移動した状態は理論状態とは完全には一致しなかったことを確認し、その誤差を定量的に評価

した。また誤差の原因について考察した。これと同様に、移動方向を変化させる場合や円弧経路を移動する場合についても実験を行い、想定通りの動作が可能であることを確認した。

<参考文献>

(1) Masaharu Komori, Tatsuro Terakawa, Ikko Yasuda, Experimental Investigation of Operability in Six-DOF Gesture-Based Operation Using a Lower Limb and Comparison With That in an Upper Limb, IEEE Access, Volume 8, 2020, 118262-118272.

(2) Masaharu Komori, Tatsuro Terakawa, Kyota Matsutani, Ikko Yasuda, Posture Operating Method by Foot Posture Change and Characteristics of Foot Motion, IEEE Access, Volume 7, 2019, 176266-176277.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Komori Masaharu, Terakawa Tatsuro, Yasuda Ikko	4. 巻 8
2. 論文標題 Experimental Investigation of Operability in Six-DOF Gesture-Based Operation Using a Lower Limb and Comparison With That in an Upper Limb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 118262 ~ 118272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.3002954	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 Kato Hiroki, Terakawa Tatsuro, Komori Masaharu, Yasuda Ikko	4. 巻 9
2. 論文標題 Analysis of Effect of Motion Path on Leg Muscle Load and Evaluation of Device to Support Leg Motion During Robot Operation by Reducing Muscle Load	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 45104 ~ 45122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3066192	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 Komori Masaharu, Terakawa Tatsuro, Matsutani Kyota, Yasuda Ikko	4. 巻 7
2. 論文標題 Posture Operating Method by Foot Posture Change and Characteristics of Foot Motion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 176266 ~ 176277
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2957861	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	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
---------	---------