

# 手綱型入力装置を用いた自律度を調整可能な協調型電動車いすの操作

## Operation of Cooperative Electric Wheelchair with Adjustable Autonomy Using Rein Style User Interface

精密工学専攻 29号 坂巻草太  
Sota Sakamaki

### 1. はじめに

近年、電動車いすに移動ロボット技術を統合した知的電動車いすの研究が行われ、使用者の移動能力の向上に用いられている。移動ロボット技術の中でも自律移動機能を利用すると、使用者は手動操作を必要とせずに目的地に到達することが可能である。特に身体的に手動入力が困難で安全に操作ができない使用者にとって、自律移動機能は有用である。しかし、自律移動機能のみを使用する場合には、使用者が望んだ場所に、正確に到達することが困難である。そこで、様々な種類の電動車いすの入力インタフェースが提案されている。例えば、頭部の動き<sup>(1)</sup>、脳波<sup>(2)</sup>、口の形状<sup>(3)</sup>、身体の重心<sup>(4)</sup>などを利用した入力インタフェースが提案されており、使用者の身体状況に合わせて入力インタフェースを選択することが可能である。

しかし、身体状況に合った入力インタフェースを選択した場合でも、電動車いすは連続的な入力を必要とする。例えば、ジョイスティックで操作する場合、使用者は移動したい方向へジョイスティックを倒し続ける必要がある。また、使用者は連続的な移動操作と同時に進行方向の環境を常に確認を続ける必要がある。これにより、連続的な入力から身体的負担が生じ、周辺環境の認知からは精神的負担が生じる。また、使用者の誤入力により、電動車いすが使用者の意図していない動作をし、それが使用者のストレスとなることも考えられる。これを避けるために、使用者は連続的な入力で電動車いすを正確かつ安全に操作することを強いられ、精神的負担が大きくなる。そこで、本研究では連続的な入力を避ける入力インタフェースが必要であると考え、使用者からの非連続的な操作を利用する入力インタフェースを提案する。

著者らは先行研究において電動車いすに自律移動技術を組み合わせた Personal Mobility Tool (PMT) を提案した<sup>(5)</sup>。安全かつ快適な知的電動車いすを実現するため、ナビゲーション技術のみではなく、搭乗者と知的電動車いす間の直感的なインタラクションにも着目した。そして提案システムを実機に搭載し、搭乗者の非連続的な操作（方向指示）と自律移動機能の協調による電動車いすでの移動を実現した。そして PMT とジョイスティックによる電動車いすの移動を比較し、身体的・精神的操作負担の軽減に対する PMT の有用性を検証した<sup>(6)(8)</sup>。操作に対するメンタルワークロードを比較した結果、身体的負担の減少は確認できたが、精神的負担の減少は確認できなかった。この原因として搭乗者からの操作指示に対する自由度の低さ考えられる。

搭乗者からの方向指示により目的地を決定し自律移動を行うのみでは、「短い距離だけ自律移動させたい」や「完全に手動で操作したい」など、搭乗者自身が状況に合わせて PMT への操作量を自由に選択することはできない。その結果、搭乗者の操作に対するフラストレーションが溜まり精神的負担を軽減できなかつたと考えられる。そのため、これを解決するためには、搭乗者の指示に基づく PMT への操作量を搭乗者自身が任意に調整可能にすることが有効であると考えられる。言い換えれば、従来の PMT の走行において搭乗者の操作に依存する割合は小さく、PMT は高い自律性を有していたといえる。一方、搭乗者からの操作量を大きくすることは PMT の走行において搭乗者からの入力に依存する割合を多くすることと考えられる。すなわち、精神的負担を減少させるための方策として、従来一定として考えられていたロボットの自律度をユーザからの指示に基づき調整可能にすることを提案する。これを実現するため PMT の操作イ

ンタフェースには、目的地方向を入力できるだけでなく PMT の自律度を調整できる入力方法が求められる。

人が自律度を調整しながら移動を行うものとして馬がある。乗馬で使用する手綱は自律移動を行う馬を発進、停止、速度、移動方向などの指示を与え自在に制御していると思える。また、人の操作が多いほど人の意図通りに馬を制御することが可能であり、操作量は制御可能な入力手法であると考える。そこで本研究では方向指示のみではなく、PMT の自律度を調整し、人の操作量を制御にする操作インタフェースとして手綱型入力装置を提案する。手綱型入力装置を用いて自律度を調整することにより、手動操作で移動する、あるいは短い距離または長い距離を PMT の自律性に基づき移動させるかについて搭乗者が走行しながら決定することを可能にする。

2章では搭乗者の操作、自律移動機能の協調による電動車いす操作、自律度の調整による電動車いす操作について述べる。3章では手綱型入力装置による電動車いす操作と、ジョイスティックによる電動車いす操作の走行結果を比較した評価実験について述べる。4章には結びとして本研究のまとめと今後の展望について述べる。

### 2. 人の操作と自律移動機能の協調による知的電動車いす操作

#### 2.1 システム構成

PMT のシステム構成について述べる。PMT は位置計測システム、地図構築システム、入力インタフェース、移動制御システムにより構成される。位置計測および環境地図構築には知能化空間 (iSpace)<sup>(7)</sup> を使用する。位置測定には超音波三次元位置計測システム (ZPS, 古河機械金属株式会社) を使用し、姿勢測定には六軸モーションセンサ (IMU-Z, 株式会社 ZMP) を使用する。また、環境地図構築時にはレーザ測域センサ (UTM-30LX, 北陽株式会社) を使用する。環境地図は正方形に分割したグリッドマップ上に構築される。

次に PMT の走行の流れを説明する。搭乗者は後述の入力インタフェースを用いて方向指示をすることにより PMT を操作する。目的地までの経路は A\*アルゴリズムによって決定される。経路が決定された後、速度指令を PMT へ与える。最後に、経路を追従することにより目的地までの移動を達成する。このシステム構成と処理の概要を Fig. 1 に示す<sup>(5)</sup>。

ここで、搭乗者は移動方向を望んだときにいつでも変更可能であり、搭乗者から方向指示の入力を受けたときに PMT により経路が再決定され、新しい目的地へ移動する。

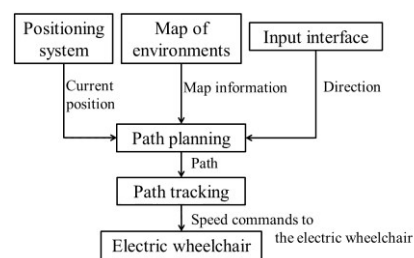


Fig 1. System configuration of navigation system and electric wheelchair as mobile platform

## 2.2 手綱型入力装置

前章で述べたように、自律移動機能のみでは特定の場所に到達することが困難であり、目的地は搭乗者によって決定されるべきである。また、身体的負担を軽減するために、連続的の入力は避けるべきである。しかし、ジョイスティックのような連続的の入力により精神的負担の減少が可能であれば、完全に連続的の入力を避けるべきではない。

そこで方向指示入力が可能であり自律度を調整可能な入力インタフェースとして手綱型入力装置を提案する。手綱型入力装置の概形を Fig. 2 に示す。手綱型入力装置は六軸力覚センサ、把持部で構成される。

目的地方向の指示は手綱とみためた把持部（ワイヤ）に伝えられた力の大きさから推定する。力の検出には、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の力とモーメントを検出できる静電容量型六軸力覚センサ（Dyn Pick, 株式会社ワコーテック）を用いる。把持部と締結した六軸力覚センサを搭乗者の前方に設置し、把持部が引かれることにより発生した力を検出する。

自律度の調整は把持部を握る強さから推定する。把持力の検出にはフォトインタラプタ（GP2S24J000F, シャープ株式会社）を用いる。

目的地推定方法および自律度調整方法についてはそれぞれ、2.2.1 項、2.2.2 項で述べる。

### 2.2.1 目的地推定方法

手綱型入力装置では、片側のみ引く動作、両側を引く動作を用いて PMT への指示入力を行う。入力される指示内容と動作の対応を Table 1 に示す。PMT が停止している状態で把持部の両側が引かれたとき、PMT の正面方向を目的地として設定する指示とした。PMT の移動中に両側が引かれたときには PMT を停止させる指示とした。

正面方向以外へ進みたい場合は把持部の片側だけを引くこととした。しかし、モーメントのみで目的地方向を決定する場合、搭乗者が正確に方向指示をするためには引く力の調節に慣れが必要である。このため、手綱型入力装置に慣れていない搭乗者は望んだ場所に向かって目的地方向を指示できないと考えられる。そこで、慣れていない搭乗者であっても適切に目的地方向を指示できるような方法を用意することとした。具体的には、旋回後に正面方向を指示し目的地方向を決定する方法である。正面を指示することは簡単であるため、操作に慣れていない搭乗者であっても望んだ位置へ目的地方向指示ができると考える。旋回行動を行うための指示として、片側だけ 2 秒以上引くという動作を導入する。片側だけ 2 秒以上引かれた場合は目的地を設定せず、引かれている間だけ現在位置で旋回を行うこととした。PMT の停止中、移動中に関わらず把持部の片側のみが引かれた場合は引かれた角度に応じて目的地方向が新たに設定される。

正面以外の目的地方向の決定は次のように行う。片側の把

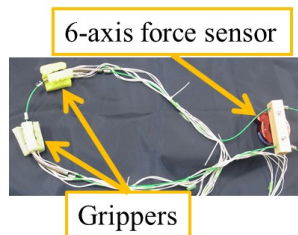


Fig 2. Rein style user interface

Table 1 Operation method

		Stop	Move
Pull right and left		Set destination at front	Stop
Pull right or left	Under 2 seconds	Set destination regarding moment	
	Upper 2 seconds	Turn	

持部が引かれたときのモーメント  $M_z$  の大きさから引かれた角度  $\theta_{rein}$  を算出し、正面方向から角度  $\theta_{rein}$  を加えた位置を目的地方向として設定する。角度  $\theta_{rein}$  は以下の式から求める。

$$\theta_{rein} = M_z / A_{rein} \quad (1)$$

ここで  $A_{rein}$  は角度算出のための設計パラメータであり、定数として与える。

### 2.2.2 自律度調整方法

搭乗者の操作量を制御するために、自律度の調整を行う。現在地から遠くまで人の入力に依存せずに移動することは自律度が高いと考えられる。そこで本研究では、搭乗者の操作量の時間的な割合を自律度によって調整することを考える。すなわち、自律度に基づいて推定する目的地までの距離を変化させることにより操作量の制御を行う。

自律度が低い場合には現在地からより近くに目的地が設定され、短い距離の移動となり、結果的に人の操作量が増加する。自律度が極端に低い場合には、搭乗者の手動操作となる。自律度が高い場合には搭乗者の操作量が少なく、走行制御の権利が PMT にあるとみなせる。自律度が低い場合には、搭乗者の操作量が多く、走行制御の権利が搭乗者にあるとみなせる。これにより、自律度を調整することにより、搭乗者からの操作量を搭乗者自身が任意に制御することが可能となる。

搭乗者が把持部を引くと同時に自律度を調整することが望ましいため、自律度は搭乗者が手綱型入力装置の把持部を把持する力から決定することとする。把持力の計測モジュールを Fig. 3 (a) に示す。今回の手綱型入力装置には Fig. 3 (b) のように、左右の円筒形の把持部の周囲に、それぞれ四個のモジュールを設置した。

搭乗者が意図的に操作を行う場合は把持部を握る強さが大きくなると考え、把持力が大きい場合は、自律度が低い状態とした。自律度が低い状態で目的地決定を行うと、把持力の大きさに応じた距離までの目的地を決定する。同一の場所で同一の方向を決定した場合の自律度による目的地までの距離の変化例を Fig. 4 に示す。

把持力の決定には左右いずれかの把持部のそれぞれ四つのセンサの合計出力値  $Grip_{out}$  のうち大きい方の値を用いる。自律度  $\alpha$  は把持力の最大値  $Grip_{max}$  と採用された把持力の合計出力値  $Grip_{out}$  から以下の式で求める。

$$\alpha = 1 - Grip_{out} / Grip_{max} \quad (2)$$

把持力により決定された自律度  $\alpha$  に基づき目的地までの距離を決定する。従来の PMT の目的地推定方法では目的地 ( $x_{edge}$ ,  $y_{edge}$ ) は環境地図上の端に設定する。そこで自律度  $\alpha$  により目的地 ( $x_{adj}$ ,  $y_{adj}$ ) を次式のように設定する。

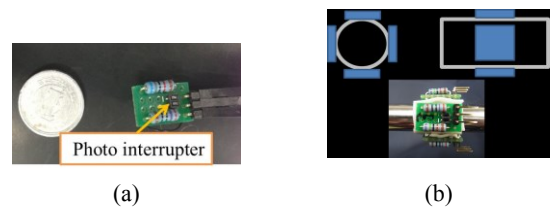


Fig 3. Grip force detector module

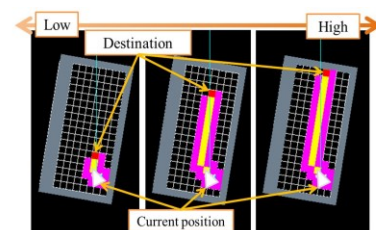


Fig 4. Variation in destination due to autonomy

$$x_{adj} = \begin{cases} x_{edge} & \text{if } \alpha \geq 0.9 \\ (1 - \alpha) \cdot x_{edge} & \text{if } 0.1 < \alpha < 0.9 \end{cases} \quad (3)$$

$$y_{adj} = \begin{cases} y_{edge} & \text{if } \alpha \geq 0.9 \\ (1 - \alpha) \cdot y_{edge} & \text{if } 0.1 < \alpha < 0.9 \end{cases} \quad (4)$$

大きい方の把持力により自律度  $\alpha$  が 0.9 以上となる場合は地図上の端が目的地となり、自律度  $\alpha$  による目的地決定の最大移動距離である。自律度  $\alpha$  が 0.1 未満の場合には、隣接グリッドを目的地とし、最小移動距離となる。

左右両方の把持力により決定された自律度  $\alpha$  がそれぞれ 0.1 未満となった場合、手動操作となる。手動操作時は正面方向に引くことにより前進、片側を引くことにより旋回する。また正面方向に引きながら片側を強く引くことにより前進をしながら旋回する。速度は引く強さに応じて変化し、最大並進速度は 0.35 m/s、最大旋回速度は 0.4 rad/s とした。

### 2.3 PMT の速度制御

PMT は、目的地までの経路を A\* アルゴリズムにより決定する。環境地図にはグリッドマップを用いているため、実際に走行する場合には経路計画上で通るグリッドの地点をサブゴールとして、次々とグリッドをたどるように移動を行う。その際の速度設計について説明する。

旋回速度の制御系を Fig. 5 (a) に示す。旋回速度は電動車いすの向きと目的地の角度差が 0 に収束するように旋回速度を決定する。旋回速度の大きさは角度差が大きいほど速く、角度差が小さいほど遅くなるように設計する。現在地から目的地までの角度を  $\theta_r$ 、現在の車いすの姿勢を  $\theta$  とすると、目的地までの角度と現在の姿勢の差を引いた偏差  $e_{rad}$  を PD 制御にかけて旋回速度の指令値を得る。

次に並進速度の制御系について説明する。Fig. 5 (b) に並進移動の制御系を示す。並進速度に関しては、目的地までの距離が遠いほど並進速度が速くなるように現在地から目的地までの距離を考慮する。また、並進速度の急な変化を無くすため、旋回速度を考慮して速度を決定する。

並進速度の決定にはサブゴール間の距離  $l_r$  をとし、電動車いすの現在位置とサブゴールまでの偏差  $e_{pos}$  を PID 制御にかけて並進速度指令値を得る。また、旋回時に並進速度を下げ、経路が大回りにならないように、Fig. 5 (a) において決定された旋回速度にゲイン  $K_w$  をかけて並進速度に加える。また、この 2 つから生成された速度と電動車いすの速度の偏差  $e_{vel}$  を PID 制御にかけて、最終的な並進速度を決定する。

## 3. 実験

本稿では自律度を調整可能な手綱型入力装置による PMT 操作の結果、自律度を調整不可能な手綱型入力装置による操作の結果<sup>(8)</sup>、手の傾きを利用した入力インターフェースによる PMT 操作の結果<sup>(6)</sup>およびジョイスティックによる電動車いす操作の結果を比較し、手綱型入力装置による PMT 操作が他の操作方法と比べて、どの程度の操作性があるのかを検証する。具体的には各々の手法で電動車いすを操作した際の練習時間、移動軌跡、移動効率、メンタルワークロードを比較し、操作性に関して評価を行う。

先行研究<sup>(6)</sup>の実験では、手の傾きを利用した PMT 操作において、PMT が推定した目的地や経路等の動作状況を被験者に提示した。そのため、今回の実験においても、PMT の現在位置、指示方向、推定された目的地、計画経路を被験者

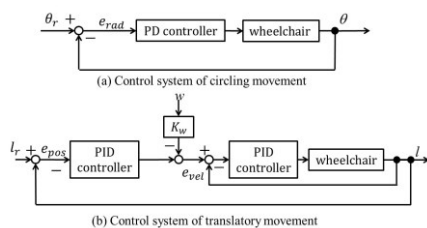


Fig 5. Control systems of the PMT

に提示することとした。実際に被験者に提示した画面を Fig. 6 に示す。

### 3.1 実験環境

あらかじめスタート位置とゴール位置を決め、Fig. 6 に示すような障害物を設置した部屋を電動車いすで走行する。Fig. 7 (a) は実際の走行環境を示し、Fig. 7 (b) は障害物の配置を示す。この走行環境は全ての操作手法で使用し、右上の開始位置から左下の目標位置まで走行する。被験者は 20 代の男性 10 名である。どの操作手法においても電動車いすの最大並進速度は 0.35 m/s、最大旋回速度は 0.4 rad/s とした。

### 3.2 実験手順

実験を行う前に被験者は操作に満足するまで練習を行う。練習終了後、実験走行を行う。手綱型入力装置による操作とジョイスティックによる操作の走行では、同じ走行環境を使用するため、被験者が走行環境に慣れることが考えられる。

そこで最初に手綱型入力装置を操作して実験を行う被験者と、最初にジョイスティックを操作して実験を行う被験者を半数で分けた。各操作手法で実験走行が終了した後、NASA-TLX<sup>(9)</sup>に基づくメンタルワークロードの測定を行う。メンタルワークロードの測定が終了した後、残りの操作手法に関して同様の手順により実験を行う。

### 3.3 実験結果と考察

被験者は走行実験前に練習走行を行った。走行練習は練習開始から被験者が操作に十分に慣れたと判断したときまでの時間を練習時間とした。自律性を調整する手綱型入力装置の平均練習時間は 222 秒で、先行研究<sup>(6)(8)</sup>と同等な練習時間であった。ジョイスティックの練習時間は 42 秒であった。今回の被験者は以前に同様の実験を行い、ジョイスティックに慣れている被験者であった。このため、ジョイスティックと手綱型入力装置の練習時間に大きな差があると考えられる。しかし、ほとんどの被験者は 4 分程度の練習時間で操作に慣れたと判断したことを確認した。また、自律度調整の導入による練習時間の極端な増加はないことを確認した。

練習走行の後、走行実験を行った。全ての被験者は、4 分程度の練習のち、一度も失敗することなくゴールに到達した。自律度を調整可能な手綱型入力装置による操作の入力回数は平均 5.1 回であった。自律度を調整不可能な手綱型入力装置による操作の場合では 4.1 回であった。一方ジョイスティックによる操作の場合、目的地に到達するまで常に操作を

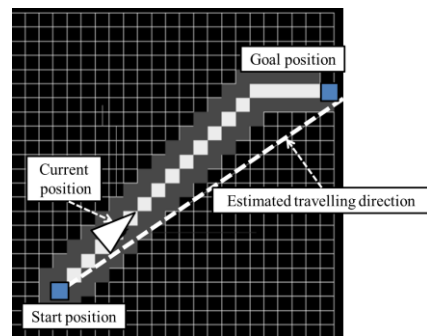
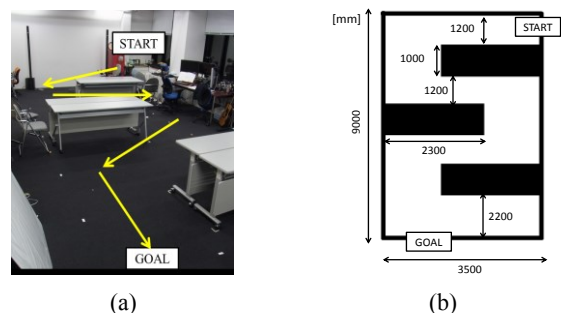


Fig 6. Visualization of the PMT status



(a) (b)  
Fig 7. Experimental environment

し続けなければならない。このため、5.1 回という少ない入力回数によって目的地に到達できるため、PMT により身体的負担が減少したと考えられる。目的地周辺に到達した後、手動操作を行うことにより目的地の近くに停止した例を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に示すように搭乗者は目的地までの移動方法を、自律性を調整することにより意図的に選択して到達することが可能であることを確認した。

次に、走行経路の効率を比較するため、移動効率  $E_{move}$  を以下のように定義した。

$$E_{move} = d_{joystick} / d_{PMT} \quad (5)$$

ここで  $d_{joystick}$  はジョイスティックを用いて電動車いすを操作したときの移動距離、 $d_{PMT}$  は手網型入力装置を用いて操作をしたときの移動距離である。移動効率が 1 に近い値をとるほど、PMT の移動距離がジョイスティックの移動距離に近い走行結果となる。

Fig. 9 に各操作手法の移動効率を示す。どの操作手法においても上昇傾向にあることが確認できる。このことから、少ない使用回数であっても習熟の向上が確認でき、簡便に使用できるインタフェースであると考えられる。また、自律性調整の有無で比較をすると、移動効率の分散が一回目から小さいことが確認できる。このことから、操作量を制御することにより被験者に合った操作が可能となり、大きく異なる方向へ移動することがなくなると考えられる。

次に Fig. 10 にメンタルワークロードの結果を示す。はじめに、どの程度の身体的活動を要求したかを示す PD の値に着目する。各提案手法はジョイスティックよりも低い値であることが確認できる。PD に関して P 検定における有意差の検定を行い、有意差がある ( $p < 0.05$ ) ことを確認した。このことから操作回数のみではなく、メンタルワークロードの評価からも身体的負担の低減を確認した。また、自律性調整の有無で比較をすると、自律性を調整する操作手法において PD の値が高いことが確認できる。操作回数においても自律性の調整をする場合に増えていることから、搭乗者が意識をして操作回数を増加させたと考えられ、自律性の調整による操作量の制御が可能であったと考えられる。ほかの評価項目では精神的・身体的な努力が必要かを示す EF の項目が自律性の調整を導入することにより低減していることが確認できる。被験者によっては、ジョイスティックよりも低い値であった。

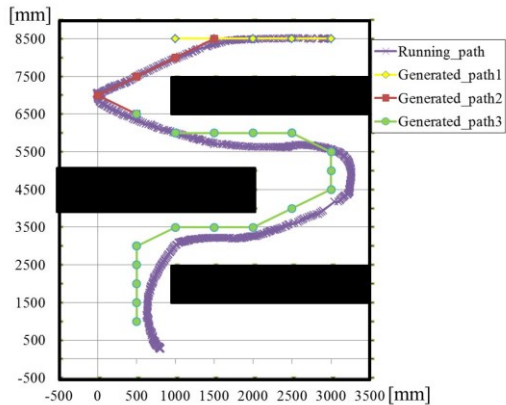


Fig 8. Generated paths and running path of the PMT

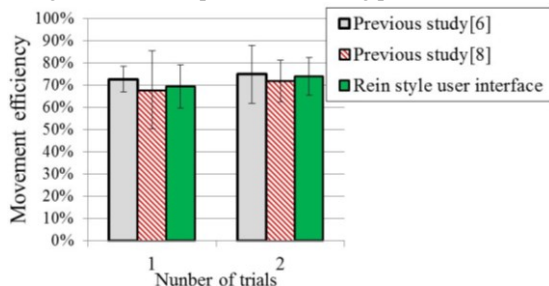


Fig 9. Movement efficiency

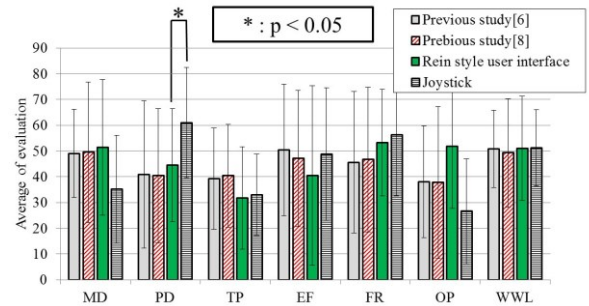


Fig 10. Mental work load

しかし、分散が大きく、操作者によっては先行研究<sup>(6)(8)</sup>と同様に努力が必要であると感じる被験者もいた。このことから、今回の実験の操作回数のみで操作に慣れた被験者は努力を必要と感ぜないが、完全に慣れていない被験者では動作の予測や目的地方向指示の努力を必要と感じたと考えられる。そのため長期的な実験を行うことにより、操作技術が向上し動作の正確な予測が可能となり、精神的負担をさらに軽減できると考える。

以上より、身体的な負担は軽減したが、精神的負担に関しては課題を残す結果となった。

## 4. おわりに

本研究では、自律移動機能と人の操作を協調した電動車いすである Personal Mobility Tool (PMT) を提案し、自律度を調整することにより操作量を可変にさせる制御方法を提案した。実験結果から PMT による走行では、ジョイスティックによる走行よりも身体的負担の軽減が可能であることを示した。また走行時には意図的に操作回数を増やしたと考えられ、自律度を手網型入力装置により調整することで、操作量を搭乗者が意図的に制御することが可能であることを確認した。

今後の課題としては、長期的な実験が挙げられる。今回の実験では短い時間で操作を行わせているが、操作能力が向上する傾向を確認することができた。このため、長期的に走行実験を行い、どの程度向上するのかの検証を行う必要があると考える。また、長期的に使用し、PMT に慣れた状態でのメンタルワークロードの測定を行う必要があると考える。

## 参考文献

- (1) S. Rehman, B. Raytchev, I. Yoda, L. Liu, Vibrotactile Rendering of Head Gestures for Controlling Electric Wheelchair, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, (2009), pp. 413-419
- (2) J. Philips, Jose del R. Millian, G. Vanacker, E. Lew, F. Ferrez, H. Van Brussel, and M. Nuttin, Adaptive Shared Control of a Brain-Actuated Simulated Wheelchair, Proc. of the 2007 IEEE 10th ICORR, (2007), pp. 408-414.
- (3) T. Saitoh, N. Takahashi, and R. Konishi, Oral Motion Controlled Intelligent Wheelchair, The Society of Instrument and Control Engineers 2007 Annual Conference, (2006), pp. 341-46.
- (4) S. Yokota, H. Hashimoto, Y. Ohyama, J. She, Electric Wheelchair Controlled by Human Body Motion: Classification of Body Motion and Improvement of Control Method, Journal of Robotics and Mechatronics, 22-4, (2007), pp. 439-346.
- (5) M. Niitsuma, T. Ochi, M. Yamaguchi, and K. Iwamoto, Design of Mutual Interaction Between a User and Smart Electric Wheelchair, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 16-2, (2012), pp. 305-312.
- (6) S. Sakamaki, M. Niitsuma, Evaluation of Smart Electric Wheelchair Operation Based on Directional Input from User and Mobile Robot Navigation, The 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2013), pp.471-476.
- (7) J.-H. Lee, H. Hashimoto, Intelligent Space: concept and contents, Advanced Robotics, 16-3, (2002), pp. 265-280.
- (8) 坂巻草太, 新妻実保子, 手網型入力装置による協調型知的電動車いす, 第14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, (2013), pp. 2729 - 2734
- (9) 芳賀繁, メンタルワークロードの理論と測定, 日本出版サービス, 東京, (2001)