

# 自律移動型電動車いすにおける搭乗者の走行意図を反映した協調型ナビゲーション

## Cooperative Navigation for Autonomous Electric Wheelchair by Reflecting User's Driving Intention

精密工学専攻 6号 伊藤将碩

Masahiro Ito

### 1. はじめに

高齢者や歩行による移動が困難な人のための移動支援ツールとして電動車いすが普及している。電動車いすによる移動支援は生活範囲を広げ、搭乗者の生活の質を向上させることができる。しかし、ジョイスティックを用いた電動車いすの場合、移動するためには進行方向へジョイスティックを倒し続ける必要がある。この連続的な入力によって搭乗者には身体的負担や誤操作による衝突などの危険が生じることが考えられる<sup>(1)</sup>。また正確・安全に走行するために搭乗者は周囲の環境を認知し、電動車いすの大きさを考慮しながら操作を行う必要があるため、操作に不慣れな場合や長時間走行する場合には精神的負担も高くなると考えられる。

搭乗者の身体的・精神的負担を軽減し安全に走行することを目指し、自律移動技術を用いた電動車いすの知能化についての研究が行われている。しかし、電動車いすの知能化研究を通じて、自律移動による安全性や移動効率の向上のみでは搭乗者の快適性が考慮されておらず、近年では搭乗者の快適性を向上するための研究が注目されている。搭乗者の快適性を向上するための手法の一つとして、搭乗者の経路予測や好みの走行を走行意図として車いすの自律移動に反映する手法がある。搭乗者の走行意図を反映する手法として、快適性を環境地図にマッピングする手法<sup>(2)</sup>や搭乗者が好みの経路を選択して走行する手法<sup>(3)</sup>、搭乗者の入力と自律移動機能によって計算される速度を混合する手法<sup>(4)</sup>などが挙げられる。

先に述べた快適性を向上するための関連研究について紹介し、それぞれの課題について考察する。視界の悪さや曲がり角などの環境による搭乗者の不快感に応じた経路計画をおこなう手法がある<sup>(2)</sup>。事前に測定した壁との距離などの経路の差と不快感の相関から経路の探索コストを変化させることにより、不快感を生じにくい経路を計画することができる。しかし、快適な走行モデルを様々な環境であらかじめ準備することは困難であることや、リアルタイムに経路を走行できないことから搭乗者の意図を柔軟に反映できないといった課題が考えられる。搭乗者の走行意図は周囲の環境や移動目的によっても変化することが考えられるため、搭乗者の走行意図の急な変化にも対応できるようなシステムの提案が必要であると考えられる。

また、いくつかの経路計画手法で算出された経路の中から搭乗者が好みの経路を選択し走行する手法がある<sup>(3)</sup>。搭乗者が目的地を設定すると、車いすは複数の経路を生成する。以前の搭乗者の経路選択傾向から生成した経路をランク付けし、搭乗者が明らかに好みそうな経路があれば車いすはそれを自動で選択し、なければ選択を仰ぐ。この手法により搭乗者は能動的に走行意図をシステムに伝達することができ、搭乗者個人に適応した経路を車いすが学習することができる。しかし、この手法では計画した経路や周囲の環境をディスプレイによって提示している。そのため、操作するためにディ

スプレイを注視することにより、搭乗者は周囲への注意が散漫になってしまうと考えられる。搭乗者は不測の事態に備え周囲の環境を常に監視する必要があるため、入力に対して注視する必要がない入力システムが好ましいと考えられる。またこの手法においても、搭乗者は走行開始前に好みの経路を選択するためリアルタイムな経路の修正ができない。

ジョイスティックの入力方向と自律移動による進行方向を線形または確率的に混合することで、搭乗者の走行意図をリアルタイムに反映しながら走行可能な手法の研究<sup>(4)</sup>も行われている。ジョイスティック入力のため搭乗者は周囲の環境に注意を払うことができる。しかし操作の際に、ジョイスティックによる連続的な入力が必要なため、搭乗者の身体的負担が軽減できないと考えられる。

一方、先行研究において搭乗者の入力と自律移動技術の協調によって走行する自律移動型電動車いす **Personal Mobility Tool(PMT)**が提案された<sup>(5)</sup>。このPMTにより、連続的な入力操作を必要としない、目的地までの移動支援を実現した。先行研究において、リアルタイムな経路修正操作を可能にすることで搭乗者の走行意図を反映し精神的負担を軽減できることが確認された<sup>(6)</sup>。ただし、本検証実験では、実験者が定めた特定の領域を通過することを目的として被験者に経路修正機能を用いるよう指示した実験であった。

本来、搭乗者自身が走行意図を能動的にシステムへ伝達するのは、PMTが走行意図を反映した快適な経路を選択するようにするためである。そのため指定された領域を通過するためだけに経路修正機能を用いるのではなく、搭乗者が自発的に経路修正を必要とする環境において検証実験を行うことで快適性の向上への効果を検証する必要がある。

そこで本研究では、非連続な方向入力で行走可能なPMT走行システムの提案と、それに応じた協調的経路修正システムを提案し、実環境下におけるリアルタイムな経路修正機能の有用性の評価を行う。これにより、身体的負担と精神的負担の双方を考慮した走行意図反映手法の提案と、搭乗者が自発的に経路修正機能を使用することでリアルタイムに走行意図を反映しつつ搭乗者ごとの走行特性を抽出することができると考えられる。

### 2. 搭乗者の入力と自律移動機能の協調による半自律移動型電動車いすの走行

#### 2.1 システム構成

PMTが目的地へ到達するためには自己位置情報が必須である。さらに、できるだけ環境に依存せずPMTに搭載したセンサのみで行えることが望ましい。そのため自己位置推定を行うための手法として、自己位置推定情報と観測した地図情報を互いにフィードバックし合うことにより高精度な自己位置推定と環境地図構築を同時に行う **Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)**<sup>(7)</sup>をPMTに適用する。

PMT は搭乗者の入力インタフェースを用いた目的地方向の入力から目的地を決定し、その地点まで経路を計算し追従することにより目的地への到達を実現する。経路を決定する際、PMT の大きさを考慮して障害物を回避する経路を計算しなければならない。また、経路を追従する際にも同じように障害物を回避するよう速度を計算する必要がある。つまり、PMT の安全な走行のためには PMT の大きさを考慮した走行可能領域情報を示す障害物地図が必須である。そのため、環境地図を基に障害物の位置や PMT の大きさを考慮し、走行可能領域情報を示すグリッド状の障害物地図を構築する Costmap<sup>(8)</sup> を用いる。この地図を参照することにより、障害物を安全に回避する経路を決定することができる。ここで、本研究では経路計画に Navigation Function<sup>(9)</sup>、経路を追従するための動作計画に Dynamic Window Approach アルゴリズム<sup>(10)</sup>を用い、これらを統合してナビゲーションシステムを実現する。Fig. 1 に PMT ナビゲーションシステムの概要を示す。

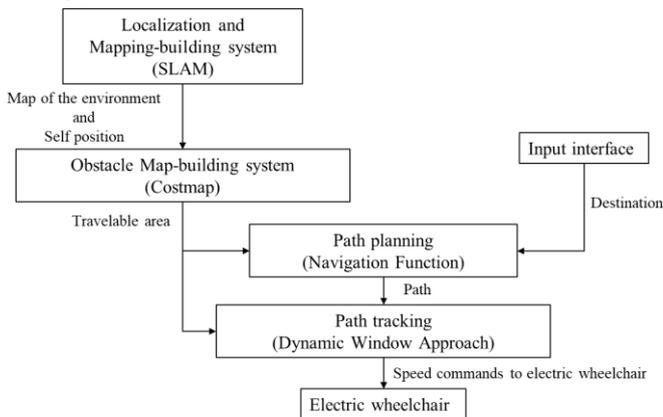


Fig. 1 System configuration of PMT navigation system

## 2.2 目的地方向入力

PMT が走行するためには、搭乗者による目的地の入力が必要である。先行研究では、方向指示に基づき予め作成された地図の端点を最終的な目的地として推定している。しかし、ジョイスティックのように簡便な方向入力によって最終的な目的地を設定するのは難しい。そこで、最終的な目的地を目指すための一時的な目的地方向をジョイスティックにより入力することとする。また、搭乗者が意図した目的地に安全に到達するために、PMT は目的地方向入力操作や停止操作を常に受け付ける。

PMT を原点とし、向きを  $x$  軸の基準として地面と平行な 2 次元平面を考え、ジョイスティックを傾けた方向の距離  $L$  [m] 先にシステム内に一時的な目的地を設定する。システムは設定した目的地に閾値以上近づいたら自動的に傾けた方向に目的地をさらに  $L$  [m] 更新する。入力時の PMT 座標系を原点とし、現在の相対位置ベクトルを  $\vec{P}$ 、ジョイスティックの入力方向ベクトルを  $\vec{e}$  (単位ベクトル) とし更新する目的地を式(1)によって求める。

$$\vec{D} = \begin{cases} \frac{(|\vec{P} \cdot \vec{e}| + L)}{|\vec{P} \cdot \vec{e}|} (\vec{P} \cdot \vec{e}) \vec{P} & \text{if } \vec{P} \cdot \vec{e} > 0, \\ \frac{(|\vec{P} \cdot \vec{e}| - L)}{|\vec{P} \cdot \vec{e}|} (\vec{P} \cdot \vec{e}) \vec{P} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

搭乗者はこの入力を更新していくことで最終的な目的地に到達する。PMT の走行時に途中で止まりたい場合は、決められた入力をするすることでその場に停止できるようになっており、搭乗者は任意の場所で停止することができる。

## 2.3 走行意図反映のための要件

先行研究ではジョイスティックから目的地を入力し、経路修正入力を走行中に行うことで目的地を変更せずに経路計画を修正するという手法であった。しかし実環境下ではジョイスティックから最終的な目的地を入力するのは困難であるため、本システムでは一時的な目的地方向を入力として非連続な複数の入力により最終的な目的地に到達する。

搭乗者の走行意図として、障害物の回避経路や、進入、回避を行いたい領域、最終的な目的地の修正などが挙げられる。これらは PMT の現在地と走行意図反映が必要と予測される領域の距離によって、直近の経路のみを修正したい場合と、事前に修正しておきたい場合という 2 種類に分けられると考えられる。そこで、目的地方向入力による自律移動に加えてこの 2 種類の走行意図に対応した 2 種類の経路修正機能を実装する。目的地方向を維持しつつ短期的に経路を修正することで直近の経路を修正する機能と、目的地方向自体を平行移動することで定期的に経路を修正し走行意図を反映する機能を提案する。

## 3. 経路修正による走行意図の反映システム

### 3.1 ジョイスティックによる走行指令の入力方法

提案する協調的経路計画手法を実現するために、目的地方向入力、停止、経路修正を任意のタイミングで行えるようにする必要がある。入力インタフェースを増やすと操作の難易度が高くなり、搭乗者の身体的・精神的負担が増加すると考えられる。そこで、先行研究より、ジョイスティックから得られるデータの扱い方を入力時間と PMT の動作状況に応じて変更することにより複数の入力モードに対応する手法を採用する。

ジョイスティックの操作内容を Fig. 2 に示す。ジョイスティックからは傾き量  $Q$  と傾き方向  $D$  を得る。傾き量  $Q$  は Fig. 2 (a) に示すように鉛直状態から傾けた度合いを示し、0 から 1 の範囲の値を取る。同じく Fig. 2 (b) に示すように傾き方向  $D$  は傾けたジョイスティックがどの方角を向いているかを示し、右方向を 0 [rad] とした  $-\pi/2$  [rad] から  $\pi/2$  [rad] の範囲の値を取る。

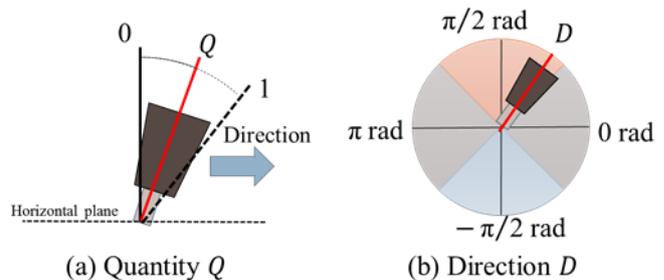


Fig. 2 Operation contents from joystick

本稿において、傾けるという操作を傾き量  $Q$  が閾値を超えたときと定義し、傾け続けた時間を入力時間  $t_{input}$  とする。入力時間  $t_{input}$  を閾値  $T_{flick1}$ 、 $T_{flick2}$  によって三つに分類し、 $t_{input} \leq T_{flick1}$  の入力をフリック 1 操作、 $T_{flick1} < t_{input} \leq T_{flick2}$  の入力をフリック 2、 $T_{flick2} < t_{input}$  の入力をフリック 3 とする。傾き量  $Q$  が最大のときの傾き方向  $D$  を最終的な傾き方向として扱う。傾き方向は、PMT の動作状態と傾き方向、入力時間に応じて入力モードを決定する。本研究では  $T_{flick1}$  を 1 [s]、 $T_{flick2}$  を 2 [s] とする。

PMT の動作状態および傾き方向、入力時間と選ばれる入力モードの関係を Table 1 に示す。目的地方向入力後の経路追従中、右方向 ( $D \leq -3\pi/4, 3\pi/4 \leq D$ ) および左方向 ( $-\pi/$

$4 \leq D \leq \pi/4$ ) でのフリック操作を経路修正入力とする。止まりたいと思ったときにいつでも止まれるように経路追従中に  $T_{\text{stop}}$  を超えて後方へ傾けたときに PMT は停止する。

また入力時間による誤操作を軽減するために搭乗者へ入力に応じた音をフィードバックする。入力時間が閾値を超えた時に 0.1[s] のピープ音を入力時間に応じた回数鳴らし、停止指示入力時と PMT が入力待機状態になった時に 0.5 [s] のピープ音を鳴らす。

Table 1 Input mode

Status of PMT	Input direction	Input time		
		Flick1	Flick2	Flick3
During stop				
During path tracking	Right Left	Direction of destination indication	Temporary path modification	Permanent path modification
	Front			
	Back	Stop		

### 3.2 短期的な経路修正の方法

搭乗者が入力した目的地方向を維持しながら、PMT 近傍における経路計画を修正する手法を提案する。そこで、入力が行われた時に Costmap 上に PMT 周囲に仮想的な障害物コストレイヤーを一定時間生成し、master map に加えることで、自律移動の経路を短期的に修正可能にする。この生成する障害物のコストを角度方向に不均一にすることで、Navigation Function による経路計画を仮想障害物コストの小さい方向に修正する。Fig. 3 に生成する仮想的な障害物レイヤーによる経路修正の概要図を示す。図中の Inflation は地図内の衝突危険度を計算する処理を示す。

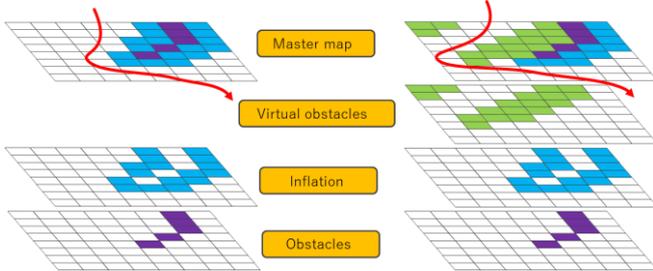


Fig. 3 Layered Costmap system concept

コストが最小となる角度  $S'(t)$  を経路修正入力時の PMT 座標系の回転角度と現在の回転角度との相対座標から式(2)を用いて算出する。式中の  $S_1$  は式(3)より求める。  $\alpha$  は設計パラメータである。

$$S'(t) = S_1 + (\theta_{\text{now}}(t) - \theta_{\text{input}}) \quad (2)$$

$$S_1 = \begin{cases} \alpha & \text{if } D \leq -\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi \leq D, \\ -\alpha & \text{if } -\frac{\pi}{4} \leq D \leq \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (3)$$

コストが最小な角度  $S_1$  を基準としてコストを線形に設定した最大値まで上昇させることで PMT の周囲に不均一なコスト場を生成する。経路修正入力後の時刻  $t$  における仮想障害物レイヤーのコスト  $M_{\text{virtual}}(r, \theta, t)$  を以下の式(4)で求める。ただし  $r, \theta$  は PMT 座標系から見た極座標であり、 $\beta, \theta_w, C, R$  は設計パラメータである。

$$M_{\text{virtual}}(r, \theta, t) = \begin{cases} 0 & \text{if } r < R, R + \beta Q < r, \\ |C/\theta_w|(\theta - S'(t)) & \text{else if } S'(t) \leq \theta \leq S'(t) + \theta_w, \\ -|C/\theta_w|(\theta - S'(t)) & \text{else if } S'(t) - \theta_w \leq \theta \leq S'(t), \\ C & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

経路計画に使用する Costmap を  $M_{\text{master}}(r, \theta, t)$ 、センサデータから作成した Costmap を  $M_{\text{real}}(r, \theta, t)$  とすると短期的な経路修正入力時の  $M_{\text{master}}(r, \theta, t)$  を式(5)より求める。

$$M_{\text{master}}(r, \theta, t) = \begin{cases} M_{\text{virtual}}(r, \theta, t) & \text{if } M_{\text{real}}(r, \theta, t) < M_{\text{virtual}}(r, \theta, t), \\ M_{\text{real}}(r, \theta, t) & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

### 3.3 定常的な経路修正

入力された目的地方向を修正するために、システム内の一時的な目的地が更新される直線を平行移動する。そのために、目的地方向入力が行われた時の PMT の位置座標を目的地が追従する直線に垂直方向な方向に平行移動する。PMT 座標系におけるジョイスティックの入力方向ベクトルを  $\vec{e}$  とすると、修正方向ベクトル  $\vec{S}_2$  を式(6)で求める。また  $\gamma, \mu$  は設計パラメータである。

$$\vec{S}_2 = \begin{cases} (-e_y, e_x) * (\mu + \gamma Q) & \text{if } D \leq -\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi \leq D, \\ (e_y, -e_x) * (\mu + \gamma Q) & \text{if } -\frac{\pi}{4} \leq D \leq \frac{\pi}{4}. \end{cases} \quad (6)$$

式(5)で求めた  $\vec{S}_2$  と目的地方向入力がおこなわれた時の PMT 座標  $\vec{O}_{\text{pmt}}$  から式(7)より修正後の目的地更新直線の原点  $\vec{O}'_{\text{pmt}}$  を求める。ここで、 $\varphi$  は目的地方向入力時の world 座標系における PMT の回転角度であり、 $D_0$  は目的地方向入力時のジョイスティック傾き方向である。

$$\vec{O}'_{\text{pmt}} = \vec{O}_{\text{pmt}} + \begin{pmatrix} \cos(D_0 + \varphi) & -\sin(D_0 + \varphi) \\ \sin(D_0 + \varphi) & \cos(D_0 + \varphi) \end{pmatrix} * \vec{S}_2 \quad (7)$$

Fig. 4 に目的地更新直線の平行移動についての概要図を示す。図中の  $X_{\text{world}}, Y_{\text{world}}$  は world 座標系である。

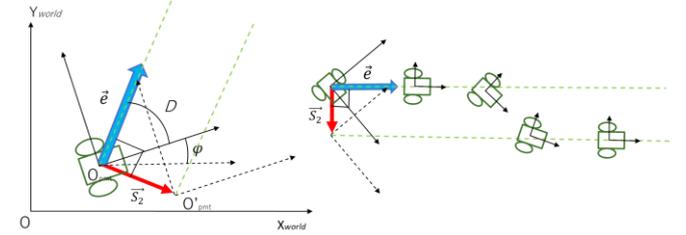


Fig. 4 Parallel translation of destination update line

## 4. 検証実験

### 4.1 実験目的

本稿では 3 章において提案した協調的経路計画手法の操作感を検証するための実機を用いた実環境下における実験について述べる。実環境を用いて、経路修正機能の有無によるメンタルワークロードの測定とアンケートにより経路修正機能の有用性の評価を行う。

### 4.2 実験設定

実験は中央大学理工学部後楽園キャンパス内の 2 号館周辺で行う。Fig. 5 に実験環境の全体図を示す。全長約 130 m の屋内外を含む実環境において走行をおこなう。PMT の最高速度は 0.35 m/s とする。被験者は 20 代男性 5 名で行う。

### 4.3 実験手順

PMT 搭乗者は各入力に対する PMT の挙動をイメージできるまで操作練習をした後、指定した通路を走行する。基本操作のみで走行するシステムと経路修入力が可能なシステムをランダムな順番で操作する。PMT 搭乗者は Fig. 5 に示した、指定した通路を自由な入力・経路でゴールまで走行する。このタスクを各システム 2 回ずつ行う。各走行システムで実

験走行が終了した後、NASA-TLXに基づくメンタルワークロードの測定とアンケート回答を行う。

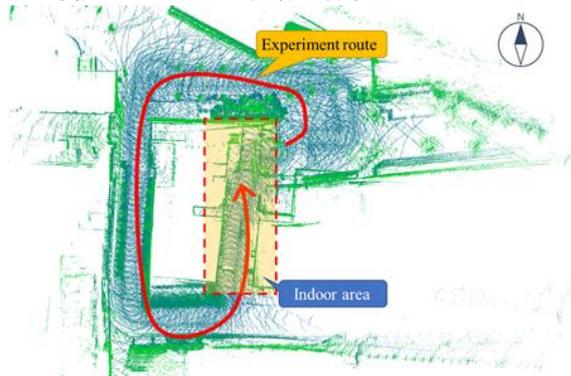


Fig. 5 Experiment environment

#### 4.4 実験結果と考察

勾配のある路面を障害物と誤認識し動作計画が失敗した試行が10%ほどあった。誤認識が生じた場合は実験者が数メートル車を押すことで自律移動を復帰させ、全ての試行でゴールまで安全に協調走行を実現した。NASA-TLXに基づく各尺度の平均評定値を Fig. 6 に示す。また、走行に関するアンケートの結果を Fig. 7 に示す。

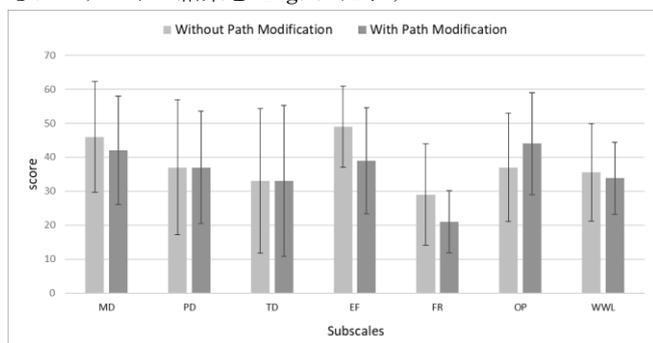


Fig. 6 Scores of scale contents for mental workload measurement

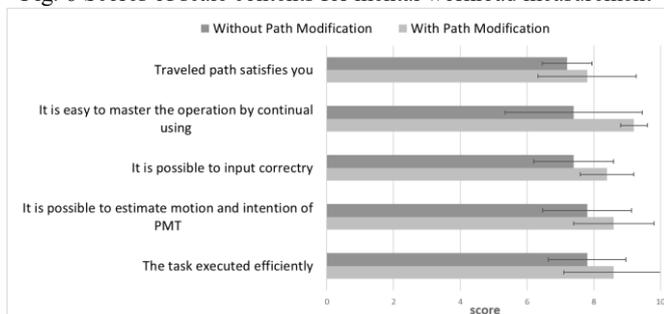


Fig. 7 Questionnaire results

Fig. 6 に示すメンタルワークロードの結果に対する t 検定による有意差検定の結果、両システム間で各項目において有意な差はみられなかった。経路修正が可能なシステムにおいて、EF(Effort)とFR(Frustration Level)の数値が低くなっている。経路修正が可能となることで、通路の端よるといった走行をおこなうとき時に進行方向を大幅に変えることなく走行することができたからであると考えられる。しかし OP(Own Performance)に対する数値が高くなった原因として、本走行環境では経路修正を必要としないと感じた被験者がいたことによると考えられる。経路修正入力が必要としない場面が多かったために、経路修正機能をうまく使いこなせなかったと感じたことで OP の数値が高くなったと考えられる。さらに、Fig. 7 に示すアンケート結果に対する t 検定による有意差検定の結果、両システム間に有意な差はみられな

かった。スコアが高いほど同意の度合いが高いことを示している。全体的な傾向として、経路修正システムにおける同意の値が高くなった。経路修正機能があることによって PMT に少し先の挙動を伝達し PMT の自律移動による経路と搭乗者の経路予測の齟齬が少なくなったと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、搭乗者の非連続的な入力による走行と経路修正機能を組み合わせた半自律移動型電動車いすのための実環境における協調的ナビゲーション手法を提案した。実験から、経路修正機能の有無による比較を行った。実験結果から、経路修正機能の有無によるメンタルワークロードおよびアンケートにおいて有意な差はみられなかった。しかし、アンケートでは全体的に経路修正機能があることで PMT の走行への満足感が向上したことや、NASA-TLX の EF, FR のスコアが減少傾向にあったことから、搭乗者が能動的に経路を修正できることによって快適性が向上するのではないかと考えられる。

今後の展望としては、歩行者などの動的要因を考慮することや、経路だけでなく速度や加速度についても走行意図として反映する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- (1) Sho Yokota, et al., Electric Wheelchair Controlled by Human Body Motion Interface, The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C, A publication of Electronics, Information and System Society, (2009), pp. 1874-1880.
- (2) Y. Morales, et al., Passenger discomfort map for autonomous navigation in a robotic wheelchair, Robotics and Autonomous Systems, (2018), pp. 13-26.
- (3) Yizhe Chang, et al., A Shared Autonomy Approach for Wheelchair Navigation Based on Learned User Preferences, IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, (2017), pp. 1490-1499.
- (4) Ahmetcan Erdogan, et al., Prediction of user preference over shared-control paradigms for a robotic wheelchair, International Conference on Rehabilitation Robotics, (2017), pp. 1106-1111.
- (5) Mihoko Niitsuma, et al., 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) 大野 翔平, 半自律移動型電動車いすのための協調的経路計画, 中央大学精密工学専攻修士論文, (2017).
- (7) D. Hahnel, et al., An efficient fast SLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements, Intelligent Robots and Systems, (2003), pp. 206-211.
- (8) D.V. Lu, et al., Layered costmaps for context-sensitive navigation, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2014), pp. 709-715.
- (9) LaValle, Steven M., Planning Algorithms, Cambridge University Press, (2006), pp. 371-381.
- (10) 水野正隆ら, 人の活動領域に基づくウインドウ設計による Dynamic Window Approach を用いた自律移動ロボットの障害物回避, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, (2013), pp. 2D2-04.