

半自律移動型電動車いすのための協調的経路計画 Cooperative Path Planning for Semi-autonomous Electric Wheelchair

精密工学専攻 9号 大野翔平
Shohei Ohno

1. はじめに

電動車いすは、高齢者や身体障害者などの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。また正確・安全に走行するために周辺環境を認知し、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が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、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搭載し知能化させた半自律移動型電動車いすである Personal Mobility Tool (PMT) を提案した⁽¹⁾。PMT は環境地図と搭乗者の簡便な方向指示に基づき目的地を推定する。環境地図内の自己位置と目的地から経路を計画し、計画した経路を追従することにより半自律的な目的地への走行を実現する。

先行研究⁽²⁾における成果として、電動車いすの半自律移動による身体的負担の軽減が達成された。実機による走行実験において、NASA-TLX⁽³⁾によりメンタルワークロードを測定した。半自律移動による走行によって目的地に到達することができ、マニュアル操作による走行に比べて身体的負担が減少した。一方で、作業成績とフラストレーションにおいて値が高くなり、精神的負担が増加することがわかった。どの被験者も目的地に到達することができているため、目的地到達のみではなく、目的地到達までの過程や PMT と搭乗者の相互作用が精神的負担に影響を与えることが考えられる。

以上のことから、PMT の自律移動に搭乗者が関与できる範囲を広くすることにより、搭乗者の意図を PMT の自律移動に反映することが精神的負担の軽減に有効であると考えられる。PMT は搭乗者が目的地を設定したあとは PMT が自律移動を行うが、例えば、搭乗者が望まない経路を通っていると感じた場合に経路を変えるためには、目的地方向指示により目的地を変更する必要がある。搭乗者の本来の目的地が変わっていない場合、一定距離移動後、さらに元の目的地に設定しなおす必要があるため、不必要に操作回数が増加しフラストレーションの上昇につながる。目的地だけでなく経路に搭乗者の意図を反映させることが精神的負担の軽減に有用であると考えられる。

次に搭乗者の操作を補助するために電動車いすを知能化する関連研究について紹介し、それぞれの手法が身体的・精

神的負担に与える影響について考察する。搭乗者がマニュアル操作と同様に操作し、障害物の接近による衝突の危険がある場合に障害物回避機能を利用する手法⁽⁴⁾や通路走行時に搭乗者の入力不安定でもふらつくことなく直線的に走行できるように補助する手法⁽⁵⁾がある。これらの方法では、誤操作による障害物との衝突を避けたり、ジョイスティック操作時の手の震えなどに起因する電動車いすのふらつきによる精神的負担を軽減したりすることができる。またこれらの手法は搭乗者の意図を進行方向として常に反映するが、移動するためには入力をし続ける必要があるため身体的負担を軽減することができない。別のアプローチとして、搭乗者の意図として走行経路から目的地を推定する手法⁽⁶⁾が提案されている。この手法は走環境地図内に設定した目的地の候補の中から高い精度で搭乗者の目的地を推定することができるが、目的地の推定に一定時間を必要とし、搭乗者の意図である目的地を電動車いすの動作に活用する方法は示されていない。さらに、BCI⁽⁷⁾などの新しい入力インタフェースを開発している研究⁽⁸⁾では、搭乗者の身体能力に合わせた入力手法が提案されているが、搭乗者の精神的負担についてはほとんど考慮されていない。

以上より、本研究では半自律移動型電動車いすと搭乗者の協調性を向上させることにより、身体的負担の軽減と精神的負担の軽減を両立させることを目指す。そのために半自律移動型電動車いすのために搭乗者の入力に基づく経路修正を組み合わせて、搭乗者の意図を PMT の走行経路に搭乗者の意図を反映させる協調的経路計画手法を提案する。

以下に本論文の構成を示す。2章では、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について述べる。3章では協調的経路計画手法の提案を行い、4章では、提案手法の実験について示し、5章でまとめと今後の課題について述べる。

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 のシステム構成を Fig. 1 に示す。PMT は、電動車いす (走行ロボット)、地図構築システム、位置・姿勢計測システム、入力インタフェース、経路計画システム、走行制御システムから構成される。本稿において、電動車いすとして4輪自律走行ロボット (MECBOT, オカテック株式会社製)、位置計測装置として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製)、姿勢計測として六軸モーションセンサ (IMU-Z, 株式会社 ZMP 製)、入力インタフェースとし

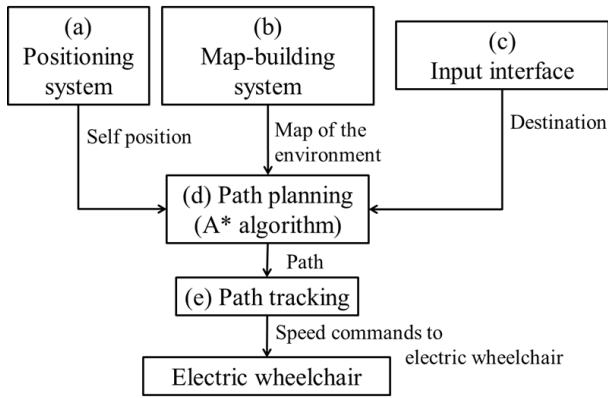


Fig. 1 System configuration of navigation

て三次元ジョイスティック (30JH, 栄通信工業株式会社製) を用いる。正方形に分割したグリッドマップ上に環境地図を構築する。

次に PMT の基本的な移動戦略について説明する。搭乗者は入力インタフェースを用いて目的地方向を指示する。搭乗者の指示した方向をもとに環境地図内から目的地を推定する。自己位置から目的地までの経路を A* アルゴリズムによって生成し、生成した経路を追従するように電動車いすに速度指令を与える。

PMT の走行において搭乗者は常に走行の決定権を持つ。搭乗者は PMT が経路追従中であっても入力を行うことによって、いつでも自由に目的地を変更することができる。搭乗者が目的地方向を入力すると再び経路計画を行い、新たに計画した経路を追従する。また、どのタイミングでも搭乗者の入力により PMT を停止させることができる。また本稿では、搭乗者の入力に基づく経路修正について新たに提案する。経路修正の方法については 3 章で述べる。

2.2 ジョイスティックによる走行司令の入力方法

3 章で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 (速度変更)、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。本稿では入力インタフェースとして、一般に普及しており方向入力の行いやすいジョイスティックを利用する。しかし、従来のマニュアル操作では上記の条件を満たすことができない。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、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提案する。

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。

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_{flick} , $T_{approach}$ によって三つに分類し、 $t_{input} \leq T_{flick}$ の入力をフリック操作、 $T_{flick} < t_{input} \leq T_{approach}$ の入力をアプローチ操作、 $T_{approach} < t_{input}$ の入力を連続操作とする。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。本稿では前述した入力に加えて、マニュアル操作を行えるようにする。搭乗者が必要とするときにのみマニュアル操作を行う場合には、身体的負担は大きくならず、方向転換などの自律移動にない動作を行えるため自律移動のみしか行えないことによる精神的負担を軽減することができると考えられる。

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。PMT の停止時、フリック操作とアプローチ操作は目的地方向指示入力とする。経路追従中、右方向 ($D \leq -3\pi/4, 3\pi/4 \leq D$) および左方向 ($-\pi/4 \leq D \leq \pi/4$) のフリック操作を経路修正入力とし、前方および後方のフリック操作を速度変更入力とする。経路追従中にアプローチ操作を行った場合には目的地方向指示入力に割り当てる。止まりたいと思ったときにいつでも泊まれるように経路追従中に T_{flick} を超えて後方へ傾けたときに PMT は停止する。連続操作はマニュアル操作とし、従来と同様の電動車いすの走行を行うことも可能である。

2.3 経路追従制御

PMT はグリッドマップによって構成された環境地図で経路計画を行う。サブゴールと PMT の現在位置の相対位置を用いて目標速度を決定する。また加減速による搭乗者の精神的負担を軽減するために躍度を抑えることを目的に速度の目標値の補正を行う。サブゴールをたどるように移動する。

はじめに旋回速度の制御系を説明する。電動車いすの向きとサブゴールの角度差が小さくなるように旋回速度を決定

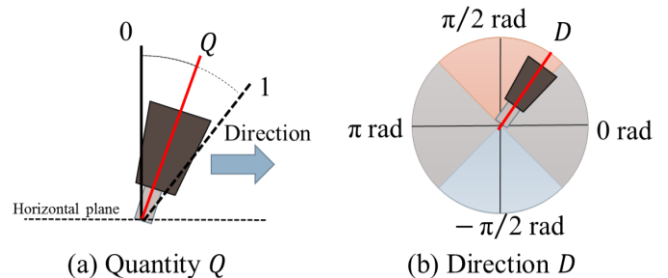


Fig. 2 Operation contents from joystick

Table 1 Input mode

Status of PMT	Input direction	Input time		
		Flick	Approach	Continuous
During stop		Direction of destination indication		Manual
During path tracking	Left Right	Path modification	Direction of destination indication	
	Front Back	Change velocity		

する。現在地に対するサブゴールの角度と現在の姿勢の差が偏差 e_θ となる。旋回速度が偏差 e_θ と比例するようにP制御にかけて目標旋回速度を得る。目標旋回速度と直前の目標旋回速度の差が閾値を超えないように補正をかけ、PID制御をかけ、最終的な旋回速度を決定する。

次に並進速度の制御系について説明する。並進速度に関しては、サブゴールまでの距離が遠いほど並進速度が速くなるように決定する。また、並進速度と旋回速度が同時に大きくなることを避けるため、旋回速度を考慮して並進速度を決定する。まず電動車いすの現在位置とサブゴールまでの距離である偏差 e_{pos} をP制御にかけて目標並進速度を得る。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、決定された旋回速度をもとに目標並進速度を修正する。目標並進速度と直前の目標並進速度の差が閾値を超えないように補正をかけ、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. 協調的経路計画

本章では、従来のA*アルゴリズムによる経路計画と搭乗者の入力に基づく経路修正を組み合わせた協調的経路計画手法を提案する。PMTは搭乗者の方向指示に基づいて経路計画を行い、経路を追従する。経路追従中、搭乗者が目的地を変更せずに経路のみを変えたい場合に左右方向にフリック入力を行うことにより、傾き方向と傾き量に応じて経路の修正を行う。

搭乗者の入力に基づく経路修正の実装に当たって、次の四つの要件を満足する必要がある。一つ目に経路修正前と経路を滑らかに接続させる。これは急な方向転換によって搭乗者に不快感を与えることを避けるためである。二つ目は修正する量を搭乗者が簡単に調節できることである。搭乗者の意図を経路に反映させるためである。三つ目は経路修正に周辺の環境の広さを反映させる。四つ目は経路修正中に経路修正の入力が行われた場合に経路の修正量を調整可能にする。修正量の調整方法については3.2節で述べる。

3.1 経路修正の方法

前に示した経路修正の条件を満たすように経路修正の計算を行う。経路修正の計算に用いる変数の説明を以下に示す。はじめに、経路修正の修正方向は左右どちらかに限定し、修正方向 S_1 は式(1)によって求める。

$$S_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } D \leq -\frac{3}{4}\pi, \frac{3}{4}\pi \leq D, \\ -1 & \text{if } -\frac{\pi}{4} \leq D \leq \frac{\pi}{4}. \end{cases} \quad (1)$$

修正方向の環境広さを A とし、修正方向の壁までの距離とする。環境広さ A が取りうる最大距離を A_{max} とする。

時刻 t における経路修正開始時からの走行距離 d_{mod} に対する Δt 後のサブゴールの方向 θ_{mod} を式(2)、(3)より算出する。ただし、 α 、 β 、 σ 、 μ は設計パラメータである。

$$f_1 = \alpha S_1 Q_1 \frac{\min(A, A_{max}) \exp\left(-\frac{(\ln \beta d_{mod}(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma\beta d_{mod}(t)} \quad (2)$$

$$\theta_{mod} = \tan^{-1}(f_1) \quad (3)$$

e_{pos} は目標並進速度が経路修正開始時と同じ速度になるような値を設定し、式(3)で得た θ_{mod} および e_{pos} から2.3節に示した制御系を用いて計算する。

なめらかに経路を接続するため、経路修正開始時と同じ姿勢になったときに経路修正を終了するように経路修正の終了条件を設ける。経路修正開始時からの走行距離の閾値 \widehat{d}_{mod} 、目標姿勢の閾値 $\widehat{\theta}_{mod}$ をそれぞれ設定し、式(4)を満たしたときにPMTは経路修正を終了する。

$$d_{mod}(t) \geq \widehat{d}_{mod} \cap |\theta_{mod}(t)| \leq \widehat{\theta}_{mod} \quad (4)$$

経路修正が完了した後、目的地までの経路をA*アルゴリズムにより再度計画し、経路追従を行う。

3.2 経路修正中の再修正

経路修正中に経路修正入力を行った場合、経路修正の計算に補正を与える。一度の経路修正中に経路修正入力を行った回数を cnt ($k = 2, \dots, cnt$)とおき、式(5)により θ_{mod} を算出する。

$$\theta_{mod}(t) = \tan^{-1}\left(f_1(1 + \sum_{k=2}^{cnt} f_k)\right) \quad (5)$$

ここで、式中の関数 f_k は k 番目の経路修正の入力内容をもとに式(6)により計算する。式中の W は式(7)により求める。 Y は設計パラメータである。

$$f_k = \begin{cases} Q_k W \frac{(A - x_{mod}(t))}{A} & \text{if } S_k = S_1, \\ -Q_k W & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

$$W = \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{mod}(t) - d_{modk}}{Y}\right)\right) \quad (7)$$

修正方向と同じ方向に入力した場合、経路を修正する量は大きくなる。経路修正と逆方向に入力した場合は、経路修正が早く終了するような補正が行われる。

4. 経路修正手法評価実験

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シミュレーション実験について述べる。

4.1 実験環境

実験は、60 m × 3 mの通路を模したシミュレーション環境で行った。ディスプレイに表示されるシミュレーション画面をFig. 3に示す。画面下の通路の端をスタート、画面上側の通路の端をゴールとする。心理的課題領域として、回避課題領域と通過課題領域を設置する。シミュレーション画面上では回避課題領域を赤色、通過課題領域を青色で示す。心理的課題領域は通過しても走行に影響を与えない。課題領域の大きさの異なる環境を3通り、課題領域の出現タイミングの異なる環境を3通り用意した。領域の大きさはPMTの進行方向に対して垂直方向の長さとし、Table 2に示すように大きさを設定する。出現タイミングについては、事前、3 m前、1.5 m前の3通りである。

並進速度の最大値を0.35 m/s、旋回速度の最大値を $\pi/4$ rad/sとする。本実験において速度変更は停止のみとし、速度の最大値の変更は行わない。

Table 2 Size of task region

	easy	normal	hard
Passage task region [m]	1.0	0.6	0.2
Avoidance task region [m]	1.0	1.4	1.8

4.1 実験方法

実験を行う前に被験者は満足するまで経路修正の操作練習を行う。被験者は通路のスタート地点からゴール地点まで走行する。走行は自律移動機能により行う。搭乗者は初めに目的地を入力した後、ゴールに到達するまでに行う操作は経路修正のみとする。搭乗者は回避課題領域を避けるように、通過課題領域を通るように操作を行う。被験者はアンケートに回答する。

4.2 実験結果と考察

本実験における被験者は6名である。入力回数の平均は課題領域の大きさが easy のとき 12.8 回であったのに対し、normal のとき 25.2 回、hard のとき 24.2 回と倍近くまで増加した。走行履歴に基づく課題領域の通過割合は、通過課題領域において hard のときも 86.7% に達した。課題領域の大きさを変えたときのアンケート結果を Fig. 4 に示す。アンケート項目は左から、意図した経路の実現性、操作の難易度、操作量、操作負担、通過課題領域の通過割合、回避課題領域の通過割合を示す。normal, hard において操作の難易度、操作負担が増加したと感ずることがわかった。一方、hard においても意図した経路の実現性が 70% であり、80% 以上課題を達成できたと感じていることがわかる。課題領域の出現タイミングを変えたときのアンケート結果を Fig. 5 に示す。すべての項目において、出現タイミングによる回答値の有意な差が見られなかった。このことから出現タイミングが操作の難易度や操作負担へ与える影響は少ないことがわかる。また、1.5 m 前で課題領域が出現しても回避課題領域の通過割合の回答値は 9% を下回っていた。

以上から提案した経路修正手法は、通過したい領域が狭くなると操作の難易度や操作負担が増加するものの搭乗者の期待通りの領域を走行できるといえる。また、避けたいという要求が直前に生じた場合でも達成できることがわかった。よって提案した経路修正手法は搭乗者の意図を PMT 走行経路へ搭乗者の意図を反映させるのに十分であると考えられる。

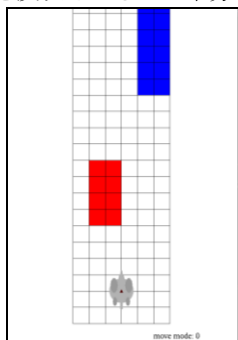


Fig. 3 Experimental environment

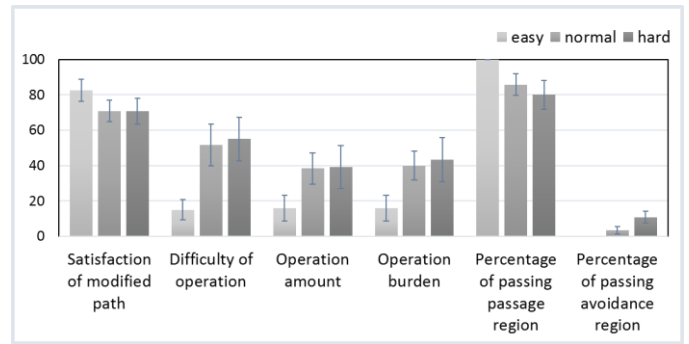


Fig. 4 Questionnaire results: size of task region

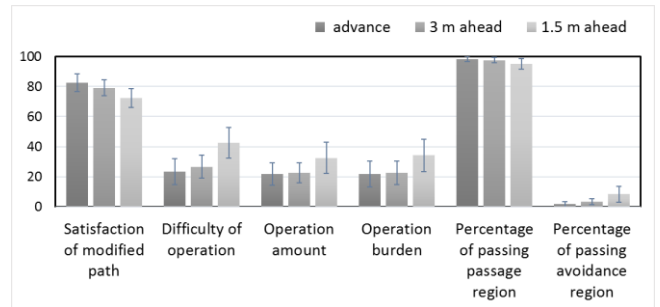


Fig. 5 Questionnaire results: appearing timing of task region

5. おわりに

本稿において A*アルゴリズムと搭乗者の入力に基づく経路修正を組み合わせた半自律移動型電動車いすのための協調的経路計画手法を提案した。

今後の課題としては、搭乗者の入力にもとづく経路修正により電動車いすの半自律移動による精神的負担を軽減できることを確認するため、メンタルワークロード評価実験を行うことが挙げられる。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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).
- (4) V. K. Narayanan, A. Spalanzani, M. Babel, A semi-autonomous framework for human-aware and user intention driven wheelchair mobility assistance, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2016), pp. 4700-4707.
- (5) Q. Li, W. Chen, J. Wang, Dynamic Shared Control for Human-Wheelchair Cooperation, ICRA, (2011), pp. 4278-4283.
- (6) T. Matsubara, J. Valls Miro, D. Tanaka, J. Poon, K. Sugimoto, Sequential intention estimation of a mobility aid user for intelligent navigational assistance, IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, (2015), pp. 444-449.
- (7) E. Donchin, K. M. Spencer, R. Wijesinghe, The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Volume: 8, Issue: 2, (2000), pp. 174-179.
- (8) J. Duan, Z. Li, C. Yang, P. Xu, Shared control of a brain-actuated intelligent wheelchair, Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, (2014), pp.341-346.