

逐次的な階層的局所環境地図の生成による動的未知環境における 協調型知的電動車いすのナビゲーション

Interactive Intelligent Wheelchair Navigation Based on Successive Multi-Layered Environment Map Building in Dynamic Unknown Environments

精密工学専攻 55号 山本哲也
Tetsuya Yamamoto

1. はじめに

近年、高齢者や身体の不自由な人の移動支援ツールとして電動車いすが普及している。電動車いすは、ジョイスティックなどの入力装置を用いて、目的地に到達するまでその入力をし続けることにより移動する。この連続的な入力操作が搭乗者の身体的負担となることが指摘されている⁽¹⁾。

この身体的負担を軽減させることを目的として知的電動車いすが研究されてきた。先行研究において、電動車いすと自律移動ロボットナビゲーションを統合した Personal Mobility Tool (PMT) が提案されている⁽²⁾。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⁽³⁾。PMT が自律的に目的地に到達するためには、以下に示す移動ロボットナビゲーションが必要となる。

- (1) 障害物配置等の周辺環境情報を表した環境地図の作成
- (2) 搭乗者からの方向指示入力に応じた目的地決定
- (3) 目的地へのロボットの自律移動

先行研究では、搭乗者から PMT への簡便な移動指令の与え方、搭乗者から与えられた移動指令に基づく目的地推定と目的地までの経路生成、経路追従など PMT の実現に必須な要素技術について検討されていた⁽⁴⁾。そのため、PMT ナビゲーションにおける自己位置の獲得には3次元超音波位置計測装置 (ZPS) が用いられ、経路計画に用いられる地図も予め作成されていることを前提としたものであった。しかし、PMT の走行範囲は環境に配置されたセンサの観測範囲や環境地図の範囲内に制限されるため、移動支援ツールとしては不十分である。

一方、移動支援としての PMT の実用化のためには、低コストで単純な構成による自律移動ロボットの実現が求められる。また、行動範囲を制限させないために事前に環境地図の準備や環境内にセンサを配置することなく搭載されたセンサのみで走行できることが望ましく、未知環境への対応が求められる⁽⁵⁾。そして、環境に縛られることがないように、環境に依存しないセンサを搭載することが望ましい。

現在までに移動支援を目的とした自律移動ロボットに関して多くの研究がされている。たとえば、RGB-D センサとホイールオドメトリを用いて自己位置推定や地図生成、障害物回避を行う研究⁽⁶⁾がある。RGB-D センサを用いることにより3次元形状を取得することができ、より情報量の多い環境地図を作成することができる。しかし、画像処理は一般的に処理が重いことに加え、観測領域が2次元レーザ測域センサと比較すると狭くなるため複数台搭載する必要性が生じ、コストが高くなる。別のアプローチとして、QR コードをラン

ドマークとすることで自己位置推定を行う研究⁽⁶⁾がある。QR コードを用いることで低解像度のカメラで自己位置推定を行うことができ、QR コードも安価なもので設置できるためシステムのコストが非常に低い。しかし、QR コードがない場所ではこの手法が適用できず、ほかのセンサや手法による自己位置推定を行わなければならない。また、これらの手法のように移動支援を目的とした自律移動ロボットに関する研究では環境地図を用意することや QR コードを設置することなど事前の準備が必要な手法がほとんどであり未知環境に対応しているとは言い切れない。

そこで、本研究では事前準備を必要とせず、搭載されたセンサによる自己位置推定手法や動作計画法を用いることにより、PMT の未知環境における走行の実現を目的とする。

2章では PMT ナビゲーションシステムと現状の課題について説明する。3章では動的障害物回避のための階層化された障害物地図システムの概要について述べる。4章では提案した走行システムによる従来の PMT 走行システムとの比較検証実験を行い、5章ではまとめと今後の課題について述べる。

2. 移動ロボットナビゲーション

2.1 PMT ナビゲーションシステム

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、前述のよう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) ⁽⁷⁾ 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障害物地図を構築する Costmap⁽⁸⁾ 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

計画法に Navigation Function⁽⁹⁾, 経路を追従するための動作計画法に Dynamic Window Approach アルゴリズム⁽¹⁰⁾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。

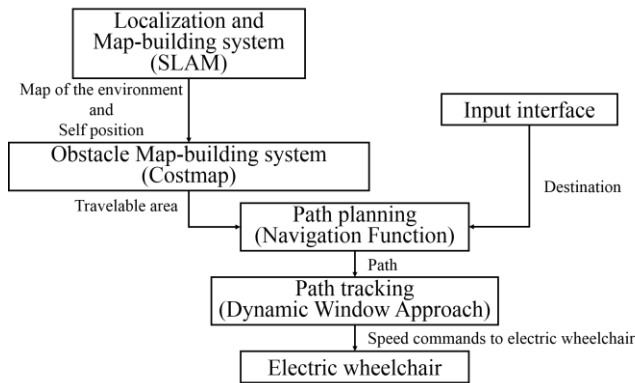


Fig.1 System configuration of PMT navigation system

2. 1. 1 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、未知環境及び局所的な環境情報のみを用いた場合、最終的な目的地を設定するのは難しい。そこで、搭乗者は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 を走行させる上で設定する一時的な目的地を Temporary Destination (TD) とし、搭乗者が目指す最終的な目的地を Final Destination (FD) とする。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 TD 座標を設定する。搭乗者はこれを更新していくことで FD に到達する。PMT の走行時に途中で止まりたい場合は、決められた入力を行う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車することができる。また、距離 L 以内の短い距離を進みたい場合は、搭乗者は時間 t [s] の間目的の方向へ入力し続けることで PMT の操作をマニュアル操作にすることができる。

2. 2 PMT ナビゲーションにおける現状の課題点

本研究においては、動的障害物が存在する動的環境を想定している。しかし、従来の Costmap⁽⁸⁾ では環境地図を構築するときに障害物を静的障害物として扱い、その環境地図を参照して走行不可領域を設定するため、これをそのまま適用すると、検出された障害物はすべて静的障害物として認識される。そのため、障害物が動物体だった場合には、Fig. 2 に示すように実際の動物体の位置とは無関係に、物体の移動した軌跡全体が走行不可領域として設定される。これにより、PMT の効率的な走行を阻害するといった問題点がある。

この課題を解決するために地図構築の更新速度を上げることや、動的障害物の速度を計測し動きを予測することで軌跡の壁を除去する方法が考えられる。しかし、前者は計算処理が非常に重くなり、後者は動的障害物の速度が一定でない場合に適用しにくいという課題がある。そこで、大きな障害物があれば自己位置推定が行えるということに着目し、センサ

データをフィルタリングすることにより動的障害物を地図に反映させないことによりこの問題に対処する。さらに、PMT と動的障害物との衝突を避けるため、障害物地図を動作計画に用いる地図と経路計画に用いる地図に階層をわけ、それぞれセンサデータと環境地図を参照することにより障害物回避を実現するシステムを提案する。なお、本研究での動的障害物は歩行者を想定してフィルタリングする物体の大きさを決定する。

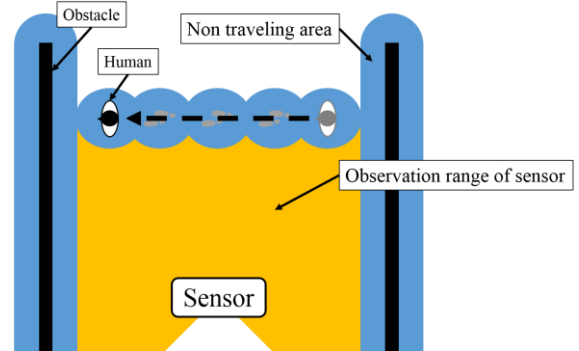


Fig.2 Illustration of the wall formed by a dynamic obstacle

3. 階層化された障害物地図システム

3. 1 障害物の大きさ認識およびフィルタリング

2 章で説明したように、センサデータをフィルタリングすることにより環境地図に小さな障害物や歩行者を反映させないことで課題に対処する。

本研究では、障害物検出用のセンサとしてレーザレンジファインダ (LRF) を利用する。LRF は標準的なカメラと比べ計測範囲が広く、センサデータから直接歩行者の特定にはつながらないため、歩行者のプライバシーの保護に有効である。

本研究で用いる LRF は、PMT 前面、床上 30 cm の位置に設置する。LRF から物体までの距離情報と角度情報を持った点群データを得る。この点群データをクラスタリングし、障害物を認識する。まず、最近傍法により点群データをクラスタリングし、点間の距離が 50 mm 以下の点をひとつのクラスタとする。ここで得られたクラスタを障害物として認識する。次に、各クラスタ内の点群数をカウントし距離 x [m] 以遠を消去範囲とする閾値 N 以下の点群数のクラスタを消去する。点群数の閾値 N を以下のように定義する。ここで W [m] は歩行者の足幅、 θ [°] はセンサの走査角である。

$$N = \frac{W}{x} \times \frac{180}{\pi} \div \theta \quad (1)$$

フィルタリング後のセンサデータおよび環境地図の様子を Fig. 3 に示す。

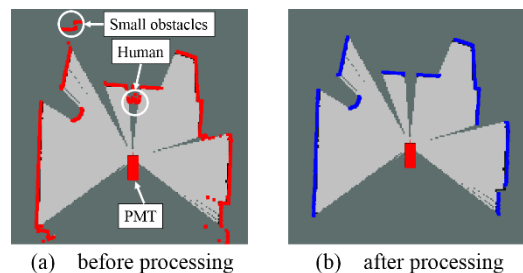


Fig.3 Clustering of the obstacle

3.2 障害物地図の階層化

本研究の障害物地図は Costmap により生成される。2章で説明したように、提案するシステムでは小さな障害物や動的障害物に衝突する可能性があるため、Costmap を改良する必要がある。そこで、経路計画が参照する障害物地図は前項で説明した手法を用いて構築した環境地図より生成し、動作計画が参照する近傍の障害物地図はセンサーデータより生成する。この二つの Costmap を統合することにより進路を阻害されることなく効率的な走行を実現する。ここで、経路計画部が参照する障害物地図を Global_costmap、動作計画部が参照する障害物地図を Local_costmap と呼ぶ。この階層化された障害物地図の概要図を Fig. 4 に示す。図中の Inflation は地図内の衝突危険度を計算する処理⁸⁾を示す。

Fig. 4 より、統合された Costmap では小さい障害物は環境地図に反映されないためその部分を通過する経路が生成される。しかし、障害物はセンサに観測されるため Local_costmap に反映され、生成された経路を追従する動作計画では環境地図に反映されなかった障害物を回避する。

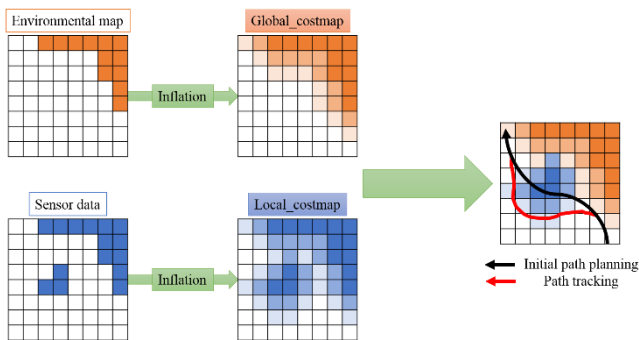


Fig.4 Layered Costmap system concept

4. 検証実験

4.1 実験目的

本研究では動的未知環境において走行可能な PMT ナビゲーションシステムを提案する。そのため、従来手法⁹⁾との比較を通じて、提案システムの有用性について検証する。具体的には、各々の手法で PMT を操作した際の経過時間、目的地方向入力デバイスの入力回数、メンタルワークロードを比較し、操作走行性能に関して評価を行う。なお入力回数は目的地方向指示入力やマニュアル操作移行入力をそれぞれ 1 回として数える。

先行研究の実験では 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、計画経路、動作計画、環境地図、Costmap を、ディスプレイを用いて被験者に提示することとした。提示する画面を Fig. 5 に示す。

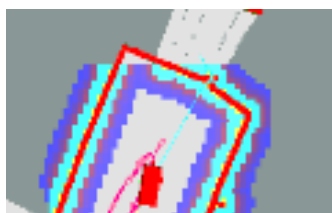


Fig.5 Screenshot shown information of navigation

4.2 実験設定

実験環境は研究室内の 3×6 m の領域を使用する。実験領域を Fig. 6 に示す。環境の中央部には環境地図に反映されていない動的障害物を設置する。 $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ の領域内で障害物は任意に移動し、障害物が同位置に留まらないようにする。

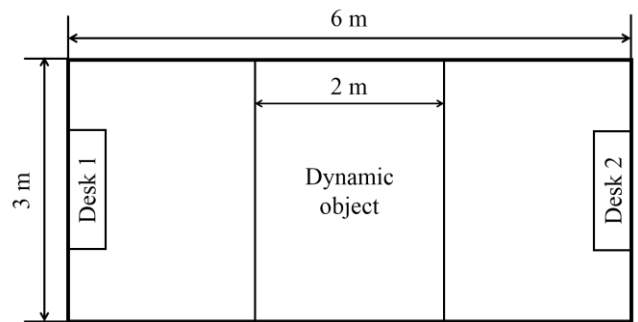


Fig.6 Experiment environment

PMT の最大並進速度は 0.35 m/s とし、最大旋回速度は 0.5 rad/s とする。また、TD 座標設定距離 $L [\text{m}]$ を 5 m 、マニュアル操作に変更するまでの時間 $t [\text{s}]$ を 2.0 s とし、マニュアル操作時の速度を 0.18 m/s とする。被験者は 20 代男性 6 名で行う。

4.3 実験手順

PMT 搭乗者はまず Desk1 からスタートし、Desk2 へ移動する。到達後に被験者は机上の本を手取る。次に Desk2 から Desk1 へ再び移動し、机上に本を置く。被験者は 1 往復につき 1 冊の本を運ぶ。本は 3 冊用意する。最初に提案手法で実験を行う被験者と、最初に従来手法で実験を行う被験者は半数で分ける。各操作手法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。

4.4 実験結果と考察

NASA-TLX に基づく各尺度の平均評定値を Fig. 7 に示す。次に、両手法での目的地方向入力デバイスの入力回数の平均値を Fig. 8 に示し、両手法での総走行時間の平均値を Fig. 9 に示す。

Fig. 7 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、両手法間で各項目において有意な差はみられなかった。これより、移動支援ツールとしての PMT の操作性を満たしているといえる。PD (Physical Demand) において提案手法の数値が高くなっている。従来手法の場合、PMT は走行する環境地図の端点に目的地を設定するため、Desk までの到達が容易である。しかし提案手法の場合、 $L [\text{m}]$ 以内に Desk がありその手前まで PMT を走行させる際にはマニュアル操作に移行する必要があるため、その操作量だけ PD の値が高くなったと考えられる。しかし、PD 以外の値においては提案手法が全体的に低くなっており、全体的な負担を表す WWL (Weighted WorkLoad score) においては提案手法のほうが 14.9 ポイント低くなっており走行する際の負担が軽減したことがわかる。これは目的地と Desk との間にずれが生じてもマニュアル操作で PMT の位置を微調整できるため、搭乗者がタスクをこなしやすかったためだと考えられる。

さらに、Fig. 8 に示す平均入力回数に対する t 検定による有意差検定の結果、両手法間に有意な差はみられなかった。

前述のとおり、提案手法ではマニュアル操作による PMT の位置の微調整操作が必要になるにもかかわらず、両手法間の平均入力回数に大きな差はみられなかった。これは、従来手法では任意の微調整ができないため、目的地の微調整に複数回入力していたためと考えられる。以上より、若干のマニュアル操作が必要になるという点はあるが、入力回数に大きな差はなく全体的に負担は減っており操作性に問題はないといえる。しかし、提案手法では L [m] 進むと止まるため、より広い範囲で走行する際には入力回数が増えると考えられる。よって今後は、未知環境を走行する場面における適切な目的地設定手法を考案する必要がある。

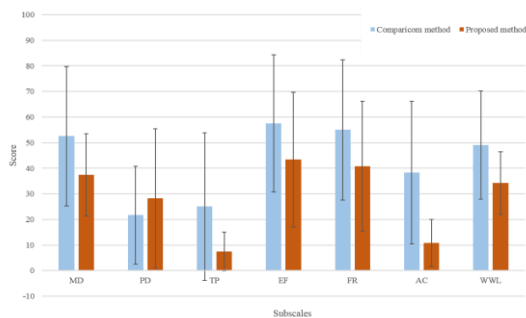


Fig.7 Score of scale contents

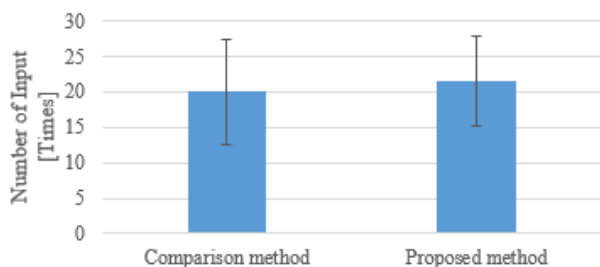


Fig.8 Average number of an input

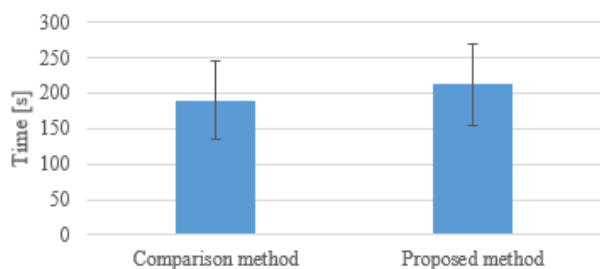


Fig. 9 Average time of trial

Fig. 9 に示す平均走行時間に対する t 検定による有意差検定の結果、両手法間に有意な差はみられなかった。提案手法の総走行時間は従来手法に比べて 22.5 s 長かったが、これはマニュアル操作時には最高速度が半分になることが原因と考えられる。なお、マニュアル操作の平均時間は 82.4 s である。これより、マニュアル操作時に速度が落ちるため走行時間が長くなるが有意な差が出るほどではないため、走行時間の観点から PMT の効率的な走行を満たしているといえる。

5. まとめ

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、障害物地図を改良することにより動的な未知環境において搭載されたセンサのみで走行可能なシステムを提案した。実験から、従来手法と比較した結果、操作性や走行時間などから有意な差はみられなかったことから、PMT の性能を維持したまま走行が行えることを確認した。

今後の展望としては、長期的な実験があげられる。今回の実験では短い時間で狭い空間内で走行したが、実際の使用を想定してより長い時間、広い空間内で走行実験を行い操作性や走行性能の検証を行う必要があると考えられる。それに伴い、より広い未知環境を走行する際の適切な目的地推定手法の考案が求められる。また、長期的に利用し、PMT の挙動や操作感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) 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.
- (3) Yasuyuki Sawada, et al., Dynamic obstacle avoidance based on obstacle type for interactive smart electric wheelchair, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2016), pp. 2722-2726.
- (4) Atsuro Takimoto, et al., Effective Destination Determination for Semi-Autonomous Smart Electric Wheelchair Based on History of Human Activity, IEEE International Conference on Industrial Informatics 2014, (2014), pp. 763-769.
- (5) Maya Burhanpurkar, et al., Cheap or Robust? The Practical Realization of Self-Driving Wheelchair Technology, International Conference on Rehabilitation Robotics, (2017), pp. 1079-1086.
- (6) Luca Cavanini, et al., A QR-code Localization System for Mobile Robots: Application to Smart Wheelchairs, European Conference on Mobile Robots, (2017), pp. 1-7.
- (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.