

協調型知的電動車いすの動的環境下における心理的影響を考慮した障害物回避 Obstacle Avoidance in Dynamic Environments for Interactive Smart Electric Wheelchair Considering User's Psychological Influence

精密工学専攻 22号 澤田康之
Yasuyuki Sawada

1. はじめに

近年、高齢者や身体の不自由な人の歩行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⁾。

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パーソナルモビリティツール (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 は搭乗者が自身の移動したい方向を指示することにより操作する。移動方向を指示した後 PMT は、現在の位置、姿勢、事前に構築された周辺環境のマップである環境地図に基づいて目的地を推定する。その後、その目的地までの経路を生成する。経路生成後、経路追従制御により PMT は目的地まで移動する。このシステムでは環境地図を用いるため、環境地図に反映された既知の障害物を回避することが可能である。しかし、人共存環境での利用が主となる PMT においては、事前のマップ構築では反映されない人などの動的な障害物を回避する機能が不可欠となる。

現在までに自律移動ロボットの障害物回避に関して多くの研究がされている。たとえば、自律移動型電動車いすが周辺歩行環境へ与える影響や歩行者が車いすに対して感じる印象を評価することにより、周辺環境、歩行者へ配慮した障害物回避の設計をおこなった研究がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。歩行者へ配慮した障害物回避の研究では、パーソナルスペース (PS) に着目したものが多く、パーソナルスペースとは、人それぞれが持つ他者にそれ以上近づかれると不快に感じる距離である⁽⁶⁾。この PS を侵害しないよう車いすが移動することにより、歩行者にとって快適な自律移動を実現している。しかし、自律移動時における障害物回避動作を搭乗者の観点から評価する研究はほとんど見当たらない。

電動車いすの障害物回避時には、歩行者と同様に車いす搭乗者も周辺環境や歩行者の存在に心理的影響を受ける。自律移動型電動車いす搭乗者が障害物回避時に受ける心理的影響として以下のことが考えられる。

- PS を侵害されることによる不快感
- 混雑した環境においてスムーズな移動が妨げられることによる焦燥感
- 予期しない進路変更や加減速による不安感

本研究では、障害物回避機能が直接関わるはじめの2点の心理的影響について考える。

電動車いすは、人々の日々の生活の脚として日常的かつ長期間使用される歩行支援ツールである。そのため、搭乗者が感じるこれらの心理的な影響を改善することが、搭乗者にとってより快適な移動支援を実現する上で重要であると考えられる。そこで本研究では、PMT 搭乗者の心理的影響を考慮した動的障害物回避手法の提案をおこなう。

まず搭乗者が障害物回避時に感じる不快感に着目する。これは搭乗者の PS を考慮した障害物回避の設計により改善が期待できる。しかし、PS は人と人の中に生じる社会的領域であり、無機質なモノに対しては発生しない。そのため、人とモノの回避において、それぞれ PMT の回避特性を変化させることにより、効率的かつ快適な移動が実現されると考

る。これを実現するため、障害物を人とモノに識別し、障害物の種類に応じて回避特性を変化させる障害物回避システムを提案する。

次に、混雑した環境内において生じる焦燥感に着目する。PMT を日常的に使用するためには、駅構内や歩道など人が混雑した環境での走行機能が求められる。混雑した環境では、歩行者と衝突する危険性が増加し、多数の障害物により進路が阻まれ、スムーズな移動が困難となる⁽⁷⁾。また障害物回避行動が繰り返されることによる乗り心地の悪化などが懸念される。しかし、人はこのような混雑した歩行密度の高い環境においても停留することなく移動することができる。これは人の歩行特性である追従歩行によるものと考えられる⁽⁸⁾。追従歩行は自身の向かう方向と同方向に向かう他の歩行者を追従しながら歩行するというものである。これにより、歩行者は前方の追従対象にのみ注意を向けるだけで、他の歩行者との接触を避けながら移動することができる。また、複数の歩行者が追従歩行により集団を形成し、人の流れ (人流) が発生する⁽⁹⁾。この歩行特性により、多くの歩行者がいる環境においても整然と歩行することが可能となる。

そこで、歩行者の追従歩行の特性を応用し、PMT 自身が周辺の歩行者から追従対象となる歩行者を識別し、その対象の後方を追従走行するシステムを提案する。これにより、混雑した環境内でのスムーズな自律移動を実現する。

2章では、障害物の識別と動的障害物回避システムについて述べる。3章では歩行者追従走行システムについて述べる。4章では提案した歩行者追従走行システムを用いた群集内走行実験をおこない、5章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 障害物の識別と動的障害物回避

2.1 障害物の特徴抽出

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。次に障害物の特徴として重心座標、幅、周囲長を用いて障害物 j を記述する。Fig. 1 に特徴抽出の概要を示す。ここで $P_i (i = 0, 1, \dots, m)$ は i 番目の観測点、 $d_{i, i+1}$ は i 番目と $i+1$ 番目の観測点間の距離である。障害物 $j (j = 0, 1, \dots, n)$ の周囲長 G_j 、幅 W_j を以下のように定義する。

$$G_j = \sum_{i=1}^{m-1} d_{i, i+1} \quad (1)$$

$$W_j = \overline{P_1 P_m} \quad (2)$$

2.2 障害物の識別

本研究では、障害物を「人」と「その他のモノ」の2種類に区別する。まず、計測データから人の脚の形状を認識する。人の脚は楕円形状であり、LRF の計測データでは半楕円形状として検出される⁽¹⁰⁾。このことから本研究では脚の半楕円形

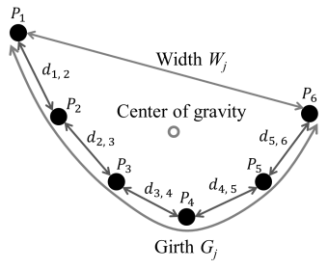


Fig. 1 Illustration of the defined attributes of an object

状を認識することにより、人の存在判定をおこなう。
 前節で定義した周囲長 G_j 、幅 W_j を用いて人の脚を定義する。まずふたつの特徴量が $G_{min} < G_j < G_{max}$ かつ $W_{min} < W_j < W_{max}$ を満たすとき、その障害物を人の脚と認識する。次に脚と認識されたクラスタ間の距離 D_j を算出し、 $D_{min} < D_j < D_{max}$ を満たすとき2つのクラスタを人の両足として認識する。以上を満たさないクラスタはすべてモノとして認識する。Fig. 2に障害物種類の識別方法の概要を示す。

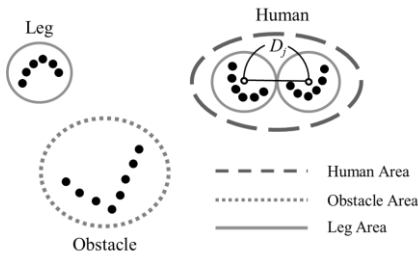


Fig. 2 Discriminating between the different obstacle types

2.3 PMT の自律移動ナビゲーション

PMT のナビゲーションシステムの構成について述べる。PMT は位置・姿勢計測システム、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。位置測定には超音波3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9軸ワイヤレスモーションセンサ IMU-Z2 (ZMP 株式会社) を用いる。また、環境地図構築と障害物検出にはレーザ測域センサ UTM-30LX (北陽電機株式会社) 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。搭乗者はジョイスティックを用いて目的地方向を指示することにより 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。本研究では、移動制御システムに新たに提案する前節で述べた障害物識別システムと次節で述べる動的障害物回避システムを統合する。このシステム構成と処理の概要を Fig. 3 に示す。

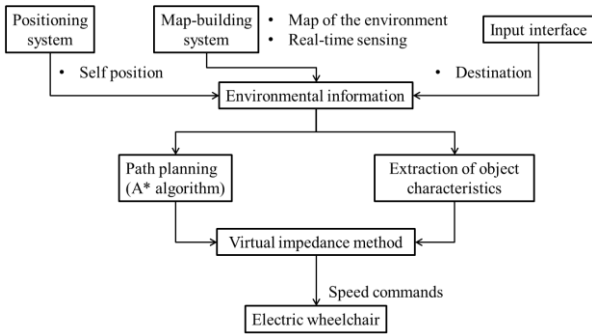


Fig. 3 PMT system configuration

2.4 仮想インピーダンス法を用いた動的障害物回避

本研究では、PMT の障害物回避手法として仮想インピー

ダンス法を導入する⁽¹¹⁾。仮想インピーダンス法は人工ポテンシャル場が発生する力をバネに凝縮させ、さらに、ダンパを付加したものである。バネ系の設計パラメータとして、仮想質量 M 、バネ定数 K 、バネの自然長 L 、ダンパ定数 C の4種類がある。この4種類のパラメータの調整により、障害物回避特性を設計する。また設計パラメータを変更することにより、後述する物体への追従走行など、システムティックな動作設計が可能となる。以下に仮想インピーダンス法を用いた PMT の障害物回避システムについて述べる。

PMT はバネ系の仮想外力から算出した速度指令値を与えることにより移動する。PMT の障害物回避の概要を Fig. 4 に示す。PMT - 目的地間に引張力を生成するバネ系を仮定し、PMT - 障害物間に反発力を発生するバネ系を仮定する。それぞれのバネ系発生力の合成ベクトルから PMT の並進速度 $V(t)$ と旋回速度 $\omega(t)$ を以下のように算出する。

$$V(t) = A_{sum} \cos \theta_v \Delta t \quad (3)$$

$$\omega(t) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{I} A_j R_j \sin \theta_{rj} \quad (4)$$

ここで、 A_{sum} は発生力の合成ベクトル、 θ_v は PMT の速度ベクトルと合成力ベクトルの相対角度、 I は慣性モーメント、 A_j は各バネ系の発生力、 θ_{rj} は PMT の正面方向からバネ系が生成された点までの角度、 R_j は PMT の重心位置からバネ系生成点までの距離である。

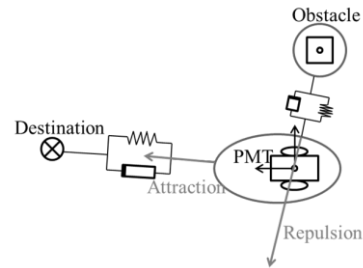


Fig. 4 Illustration of the PMT obstacle avoidance system

3. 人の歩行特性を応用した群集内走行

3.1 歩行者追従走行が求められる環境

歩行者の追従歩行はある程度歩行密度の高い環境で生じる⁽¹²⁾。そこで本研究では、歩行密度の高い混雑した環境において歩行者追従歩行をおこなうこととする。ここで混雑した環境を定量的に評価する手法として、Level of Service (LOS) を導入する⁽¹³⁾。LOS は交通のサービスの質を評価するための定性的な尺度であり、一般的には自動車道などの交通網を整備する際に基準とする指標である。これを歩行者に対して応用したものが Pedestrian LOS である。Pedestrian LOS では主に、歩行流量、歩行速度、歩行密度、歩行占有領域などの評価指標から、歩行者の歩行環境のサービスレベルを A ~ F の6段階として評価する。先行研究⁽¹³⁾を参考に LOS の評価指標を決定した。本研究では、LOS D ~ E を混雑した環境と定義する。なお LOS F の環境はほぼ停留状態にあるため本研究では PMT の歩行環境から除外する。

3.2 仮想インピーダンス法による歩行者追従走行制御

仮想インピーダンス法は、2章で述べたように仮想的なバネ系によりロボットを制御する手法である。この手法は、設計パラメータの変更により、柔軟な歩行特性の設計が可能であるという特徴がある。障害物回避時には、反発力を生成していたバネ系のパラメータを、追従歩行時には引張力を生成するパラメータへと変更する。これにより、容易に物体への追従歩行が可能となる。本研究では、追従対象が決定され歩行者を追従歩行するとき、現在の目的地からのバネ系を一時的に消去し、追従対象から引張力を利用して目的地方向へ移動する。また歩行者追従歩行時にも、他の回避対象からの障害物回避のためのバネ系は考慮する。歩行者追従歩行時のバネ系生成の様子を Fig. 5 に示す。

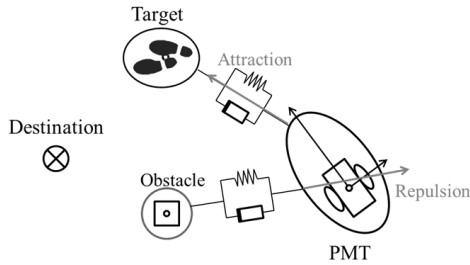


Fig. 5 Illustration of the PMT human following system

3.3 追従対象の選択

より効率的な歩行者追従走行を実現するためには、追従対象をどのように選択するかが重要となる。本研究では、PMT に設置した LRF から歩行者の歩行情報を抽出し、追従対象を自動的に決定・追従するシステムを提案する。

まず、歩行者追従走行に求められる要件を以下に示す。

- 搭乗者の目的地の方向へ移動すること
- 追従対象が搭乗者にとって予測しやすいこと
- 一定の追従速度を維持できること
- 他の周辺歩行者が追従歩行をおこなう歩行環境であること

以上の要件から、追従対象を選択するための評価項目を以下のように決定した。

- PMT の目的地方向と対象歩行者の移動ベクトルの相対角度
- PMT 正面方向と対象歩行者位置方向の相対角度
- 対象歩行者の移動速度
- 走行環境の LOS

以上の評価項目に対して設定した条件をすべて満たす歩行者の中から、最も PMT に近い歩行者を追従対象として決定する。

3.4 歩行者のトラッキング

前節で述べた、追従対象選択のための評価項目を利用するためには、歩行者の識別、位置、移動ベクトルなどの情報が必要となる。このために、PMT 周辺の歩行者のトラッキングをおこなう。2章で述べたオンボードセンサによる障害物識別手法を利用して歩行者のトラッキングをおこなう。

歩行者のトラッキングをおこなうために2つの特徴量を利用する。

まず、2.1 節で算出したクラスタの周囲長、幅から各クラスタの脚らしさ L_{legj} を式(5)より求める。

$$L_{legj} = \exp\left(-\left(\alpha(G_j - G_\mu) + \beta(W_j - W_\mu)\right)\pi\right) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha, \beta, G_\mu, W_\mu$ は設計パラメータである。次にクラスタの位置座標 (x_j, y_j) と前回クラスタリング時のクラスタ k ($k=0, 1, \dots, n$) の位置座標 (x_k, y_k) との近さ $L_{dis(j,k)}$ を式(6)より求める。

$$L_{dis(j,k)} = \exp\left(-\left(\gamma\left|(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2\right|\right)\pi\right) \quad (6)$$

ここで、 γ は設計パラメータである。

以上の特徴量 L_{legj} と $L_{dis(j,k)}$ の合計値 $L_{total(j,k)}$ をクラスタごとに算出し、その合計値が最大となるクラスタをクラスタ k と同一の物体として認識する。

$$L_{total(j,k)} = L_{legj} + L_{dis(j,k)} \quad (7)$$

クラスタ j が前ステップでのクラスタ k として判別されたときクラスタの追跡処理は成功したといえる。そのため、上のクラスタの追跡処理に成功したクラスタ k に重み P_{idk} を付加する。追跡処理に成功するごとにそのクラスタの重み P_{idk} を増加し、該当するクラスタが検出されなかったときその重み P_{idk} を減少させる。重み P_{idk} が一定値を超えたとき、トラッキング対象としてクラスタ j にクラスタ k の ID を与える。これにより外乱などによる一時的な ID の誤更新を防ぐ。

またオクルージョンにより歩行者が一時的に検出できずクラスタの追跡に失敗したとき、その ID の位置座標 (x_k, y_k)

を履歴として保存する。重み P_{idk} が一定値以上のときには、この履歴情報に対しても同様にクラスタの追跡処理をおこない、条件を満たすクラスタが現れず重み P_{idk} が 0 になったとき、その ID の履歴情報をリセットする。これにより、一時的なオクルージョンの影響を軽減する。

歩行者トラッキングに成功し ID を与えられた歩行者の位置座標の変化から歩行者の移動ベクトルを推定する。

4. 実験

本研究で提案した、歩行者とモノを識別し障害物の種類に応じて回避特性を変化させる障害物回避システムと人の歩行特性を応用した群集内における歩行者追従走行システムに対して、それぞれのシステムの有用性を評価するための実験をおこなった。

前者の実験では、人とモノを異なる回避特性で回避したときに搭乗者が感じる印象を評価した。実験の結果から、人を回避するときは、PS を考慮した距離を空けた回避が求められ、モノを回避するときはより移動効率を重視し、素早く回避することが求められることを確認した。

後者の実験では、シミュレータ実験と実機実験の2種類の実験を行った。まず、安全面の検証と歩行者追従走行が周辺歩行環境へ与える影響を確認するために、群集内走行を模擬したシミュレーション実験をおこなった。実験の結果から、歩行者追従走行を用いることにより PMT の移動効率が向上し、障害物回避のみの走行手法と比べて周辺歩行者の流率、歩行速度、PS 侵入率が改善された。次に搭乗者や歩行者の印象評価から歩行者追従走行の有用性を検証するための実験環境における群集内走行実験をおこなう。

本実験では、実際に人流の発生した環境を再現し、その環境において歩行者追従走行を用いたシステムと障害物回避のみのシステムで走行する。PMT の移動効率と搭乗者と歩行者の印象評価から歩行者追従走行の有用性を評価する。以下に実機実験の詳細について述べる。

4.1 環境設定

実験環境を Fig. 6 に示す。本実験では、歩行密度が高く、歩行者の追従歩行や人流が発生しやすい環境として Fig. 6 に示す通路のような環境を設定する。ただし歩行者以外の周辺環境による PMT への影響を排除するため、ひらけた空間内に Fig. 6 の環境を設定した。環境内では 10 名の歩行者が LOS レベル D 程度となる歩行密度、歩行速度で歩行する。歩行者は PMT の移動方向と同方向の Start line から Goal line に向かう歩行者流と、それに対向する Goal line から Start line に向かう歩行者流の2つの人流が生じるよう移動する。

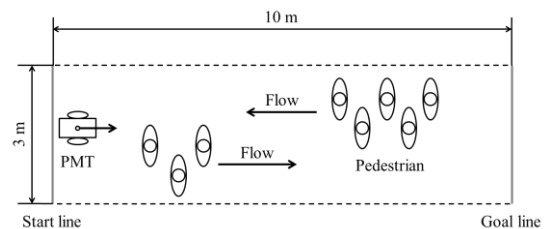


Fig. 6 Experimental environment

4.2 実験手順

PMT 搭乗者は Start line の通路中央から Goal line まで移動することを目的とする。また走行中は任意のタイミングで目的地方向の変更が可能である。搭乗者は提案手法である歩行者追従走行を用いた走行手法 A と歩行者追従走行を用いない走行手法 B の2種類を利用して環境を走行する。また、実験の前に搭乗者は PMT の操作方法について指導を受け、自身の納得いくまで走行練習をおこなう。実験後、搭乗者は PMT の挙動や周辺歩行者の印象に関する SD 法によるアンケートに回答する。また歩行者には PMT の印象についてアンケートをおこなう。アンケート対象は PMT の前方を歩行し PMT の追従対象となった歩行者と、PMT の移動方向とは逆の人流に属していた歩行者とする。被験者数は 5 名である。

4.3 実験結果

すべての被験者は、走行手法によらず障害物との衝突なく目的地へ到達した。

Fig. 7 と 8 に各走行手法における走行時間と平均移動速度を示す。結果から、歩行者追従走行を用いた走行手法 A において、走行手法 B と比べて走行時間が短縮され、平均移動速度は上昇した。これは、歩行者追従走行を用いることにより、周辺歩行者に対する回避行動が減少したためであると考えられる。また障害物回避行動をおこなう割合は走行手法 A において約 20 % 低減することが確認された。一方、走行手法 B において目的地指示入力回数が増加した。これは、障害物回避行動の増加によって PMT が目的地方向とは異なる方向に旋回するため、搭乗者が不安になり進行方向を再入力したと考えられる。

Fig. 9 に搭乗者のアンケート結果を示す。アンケート結果に対して t 検定による有意差検定をおこなったところ、各走行パターンにおいて有意な傾向を示す形容詞対は見つからなかった。しかしながら、提案手法においてより「安心」、「遠い」、「自由」といった印象が得られた。これは、歩行者追従走行により対向者との接近が回避され、比較的広い空間を走行することができたためであると考えられる。一方で、走行手法 B では「速い」という印象が得られた。これは、人流に乗ることができず対向者に接近しすぎたため、一時的に速い速度で歩行者を回避したことが原因であると考えられる。Fig. 10 に対向者のアンケート結果を示す。有意差検定の結果、「固い - 柔らかい」、「ぎこちない - なめらか」、「窮屈な - 自由な」の形容詞対において有意傾向がみられた。このことから、歩行者追従走行をおこなうことにより、周辺歩行者に PMT の挙動をなめらかに感じさせ、また歩行者への干渉が少ない走行が達成されていることが確認された。

以上の結果から、提案する自律的な追従対象の選択と歩行者追従走行のシステムを用いることにより、PMT の移動効率が向上するとともに、搭乗者の安心感と PMT の歩行者に対する圧迫感を改善することが示された。

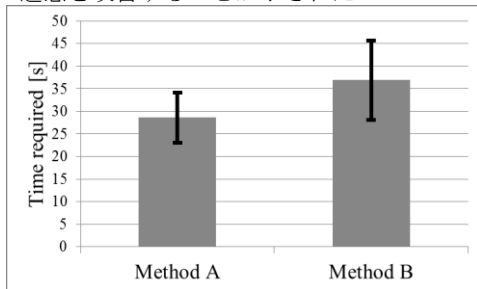


Fig. 7 Time required

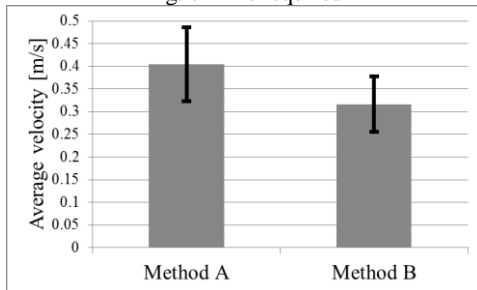


Fig. 8 Average velocity

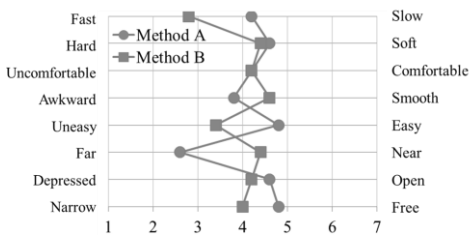


Fig. 9 Questionnaire result (User)

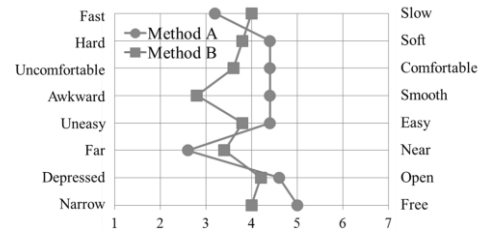


Fig. 10 Questionnaire result (Pedestrian)

5. おわりに

本研究では自律移動型電動車いすの障害物回避時に、搭乗者が受ける心理的影響に着目した。人とモノの社会的インタラクションの違いを考慮し、障害物の種類に応じて回避特性を変化させるシステムを構築した。またそのシステムを応用し、群集内でスムーズに自律移動することを目的とした、自律的な歩行者追従走行システムを提案した。

提案した歩行者追従走行を利用することにより、群集内での移動効率が向上し、搭乗者と周辺歩行者の間に生じる心理的影響を軽減することが確認された。このことから提案した歩行者追従走行が群集内走行において有用であることが示された。

今後は実際の駅構内や交差点など、歩行者の流れがより推定しづらい環境での自律走行の実現を目指す。

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, 129(10), pp.1874-1880, 2009.
- (2) Mihoko Niitsuma, et al., "Design of Mutual Interaction Between a User and Smart Electric Wheelchair", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.16, No.2, pp.305-312, 2012.
- (3) Sota Sakamaki, et al., "Operation of a Smart Electric Wheelchair Operation Based on Direction Indication Using Inclination of Hand Movement and Mobile Robot Navigation", SI2012, pp.2722-2726, 2012.
- (4) Daisuke Chugo, et al., "A Driving Assistance for a Power Wheelchair on a Pedestrian Flows", Industrial Electronics Society, IECON 2014, pp.3982-3987, 2014.
- (5) Razali Tomari, et al., "Empirical Framework for Autonomous Wheelchair Systems in Human-Shared Environments", IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.493-498, 2012.
- (6) E. T. Hall, "The Hidden Dimension", 2nd ed, pp. 113-129, 1982.
- (7) 岡本英晃ら, "歩道上を車いす利用者が快適に通行できる空間に関する研究", 土木計画学研究・講演集, No.24(1), pp.33-36, 2001.
- (8) 高柳英明ら, "歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデル - 群集の小集団形成に見られる追跡", 日本建築学会計画系論文集 第 606 号, pp.63-70, 2006.
- (9) 阿久澤あずみ, "駅構内における群集歩行シミュレーションの研究", 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士論文, 2006.
- (10) Yoonkyu Yoo, et al., "Detection and Following of Human legs using the SVDD (Support Vector Data Description) scheme for a Mobile Robot with a Single Laser Range Finder", International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, pp.98-102, 2011.
- (11) Tamio Arai, et al., "Motion Planning of Multiple Mobile Robot Using Virtual Impedance", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 11, No. 7, pp.1039-1046, 1993.
- (12) Yusuke Koido, "A study of influence on level of service in pedestrian space by pedestrian characteristics - Focused on the between pedestrian's behavior and using conditions of pedestrian space -", Journal of the City planning Institute of Japan, No.44-3, pp.97-102, 2009.
- (13) Michael R. Bloomberg, "New York City Pedestrian Level of Service Study Phase I", NYC DCP, Transportation Division, 2006.