

局所経路情報と歩行者流情報を活用した動的環境下での 移動ロボットナビゲーション

○熊原 渉（東京大学），増山 岳人（東京大学），田村 雄介（中央大学），
山下 淳（東京大学），浅間 一（東京大学）

Navigation System for Mobile Robot Based on Local Path Information and Pedestrians' Flow under Dynamic Environment

○Wataru KUMAHARA (The University of Tokyo), Gakuto MASUYAMA (The University of Tokyo), Yusuke TAMURA (Chuo University), Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: This paper proposes a new navigation method that makes a mobile robot move in a dynamic environment. Using past navigation methods, the robot is often tied up when there are a number of pedestrians around the robot. To overcome this problem, we utilize local path information and the information of a pedestrians' flow around the robot. The robot can reach its destination by using the local path information and the pedestrians' flow information.

1. はじめに

近年，少子高齢化による労働力の減少・作業負荷の増大や，製品・サービスの質や生産性の更なる向上の必要性からロボット産業の需要が高まってきており，その中でもサービス分野の市場規模は 2035 年に 4.9 兆円にものぼると予想されている^[1]．サービス分野において，介護ロボットや案内ロボットなどがヒトと共存するためにはロボット自身が自律的に移動することが必須である．ロボットの自律的移動を可能とするために歩行者の移動軌跡のモデル化^[2]や，移動ロボットの自律的ナビゲーション手法の開発は重要である．

ヒトとの共存環境下での，移動ロボットのナビゲーション手法を構築するためには動的環境下に対応したナビゲーション手法であることが重要である．なぜなら動的環境下でのナビゲーションを行う際に，ラプラスポテンシャルを用いたポテンシャル法^[3]などの動的環境下での使用を想定していない経路計画法を逐次計算すると実時間で解を求めることが困難といった問題点や，計算を行う度に解が変化しロボットの移動経路が振動してしまい目的地まで到達するまでの所要時間が静的環境に比べて大きく増加してしまうという問題点が挙げられるからである．この問題を解決するため，動的環境下に対応したナビゲーション手法が提案されている．

Agirrebeitia ら^[4]は新たなポテンシャル関数を構築し，複雑な形状の障害物についても静的，動的両環境下において利用可能なナビゲーション手法を構築した．Ge ら^[5]や Huang^[6]の手法では，通常のポテンシャル

法^[7]のような障害物との相対位置から生成されるポテンシャルに加え，相対速度も考慮したポテンシャルを生成することにより動的ナビゲーションを実現している．ただし，これらの研究はロボットの周囲に動的障害物がせいぜい 2, 3 個存在するような環境を想定している．そのため多数の動的障害物で混雑した状況では，衝突回避動作が大きくなり必要以上に迂回してしまう，振動してしまうなどの問題がある．

上記の問題に対し，奥迫ら^[8]は Laser Range Finder (LRF) を用いてロボット周囲の 2 次元平面のデータを取得し，その中から歩行者発見し追従することで障害物回避動作を円滑に行っている．しかしながら，混雑環境下では追従対象が他の障害物の陰に隠れてしまうオクルージョンが頻繁に発生し，長時間オクルージョンを起こしてしまった場合には対応が困難となる．

そこで本研究では動的障害物が多数存在するの環境下でも利用可能な移動ロボットのナビゲーション手法の構築を目指す．著者らはこれまでの研究にて，駅構内などに存在する Fig. 1 のような案内標識などの局所経路情報 (Local Path Information) と歩行者流情報を利用したナビゲーション手法を提案してきた^[9]．しかしながら，この研究では歩行者が存在しない場合や，



Fig. 1 Informatory signs.

一度誤った方向や通路へ進んだ場合には目的地への到達が困難になるといった問題点や、歩行者の動きをトップダウンに決めているため歩行者が必ずしも実際の歩行者の動作の動作に即しているとは言えないといった問題点が存在した。

これらの問題を解決するために、本研究では歩行者の存在の有無にかかわらず目的地への到達を可能としたアルゴリズムを提案する。さらに実際の歩行者データを用いることにより、実環境下においても対応可能な手法が調べる。

次章以降の構成は次のようになっている。第2章ではロボットの制御手法であるポテンシャル法を説明し、さらに局所経路情報から得られる誘導ベクトルと歩行者流に沿って更新する手法について説明する。第3章では実験環境について説明する。第4章では動的環境下においてシミュレーションを行い歩行者流を用いることの有用性を示す。そして第5章において考察を行い、最後にまとめと今後の展望を述べる。

2. ナビゲーション手法の提案

本章では、未知環境において移動ロボットが局所経路情報や歩行者流といった環境中に存在する情報を利用してナビゲーションを行う手法を提案する。その際のナビゲーション手法の概略は、ポテンシャル法を用いて歩行者や壁などの障害物との衝突を避け、局所経路情報を誘導ベクトルという変数に代入し、周囲の歩行者の流れをセンシングすることにより経路に沿った目的地への方向情報を更新するような手法である。以下に手法の詳細を示す。

2.1 障害物回避動作

障害物回避を行うために本研究ではポテンシャル法を用いる。この際、壁と歩行者とロボットのみが存在する環境を考える。一般的なポテンシャル法による速度制御方法は式(1)で表される。

$$m\dot{\mathbf{v}} = \nabla U_d + \nabla U_o \quad (1)$$

$$U_o = \sum_{i=1}^{n_p} U_{p_i} + U_w \quad (2)$$

m , $\mathbf{v}$, $\mathbf{r}$, n_p はそれぞれロボットの質量、速度ベクトルと位置ベクトル、歩行者の人数を表しており、 U_d , U_o はそれぞれ目的地、障害物が張るポテンシャルを示している。なお、本研究ではロボットが回避すべき障害物を歩行者と壁とし、 U_o は式(2)のように歩行者が張るポテンシャル U_{p_i} と壁が張るポテンシャル U_w の和からなっている。

歩行者 i から受ける斥力ポテンシャル U_{p_i} を以下のように設定する。

$$U_{p_i} = \begin{cases} \eta_p \left(\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{p_i}|^2} - \frac{1}{r_c^2} \right) & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{p_i}| \leq r_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中の η_p は正の重み係数、 $\mathbf{r}_{p_i}$ は i 番目の歩行者の位置であり、ロボットと歩行者の距離がロボットに搭載されているセンサのカットオフ距離 r_c 以下の時のみこのポテンシャルが働くこととする。なお、壁から受ける斥力ポテンシャルも式(3)と同様に設定し、勾配を計算した際の方向は壁の法線方向と一致する。

本実験環境では目的地からの引力ベクトル ∇U_d は用いず、誘導ベクトル (Leading Vector) という変数を新たに定義し、式(1)を以下の式に変形する。

$$m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{V}_l + \nabla U_o \quad (4)$$

式中の $\mathbf{V}_l$ は誘導ベクトルを表す。次節以降に誘導ベクトルについての説明を示す。

2.2 誘導ベクトルの提案

ポテンシャル法は本来、式(1)のように目的地に引力ポテンシャルを、障害物には斥力ポテンシャルを仮想的に配置し、その勾配に沿ってロボットの経路設計を行うものである。しかしながら、環境地図をロボットは所持していないため目的地がセンシング範囲内に存在しない限り目的地は未知となり、目的地からの引力ポテンシャルを生成できない。

そこで本研究では目的地がロボットのセンシング範囲内に存在する場合のみ引力ポテンシャルを作用させ、それ以外の地点では局所経路情報のように経路に沿った目的地までの方向を示した誘導ベクトル (Leading Vector) という変数を用いる。その際、引力ポテンシャルの勾配ベクトルの方向成分が目的地を示していることとの整合を取るために、この誘導ベクトルは目的地へ向かう経路に沿った方向を示した大きさ一定のベクトルとする。また、誘導ベクトルは局所経路情報から得た情報だけでは環境情報を十分に反映していないので歩行者流や壁の情報を基に更新する。

誘導ベクトルの更新方法を次節で示す。

2.3 誘導ベクトルの更新方法

誘導ベクトルはロボットのセンシング範囲内に存在する局所経路情報、歩行者流、壁によって更新される。それぞれの情報はFig. 2に示したフローチャートに従つ

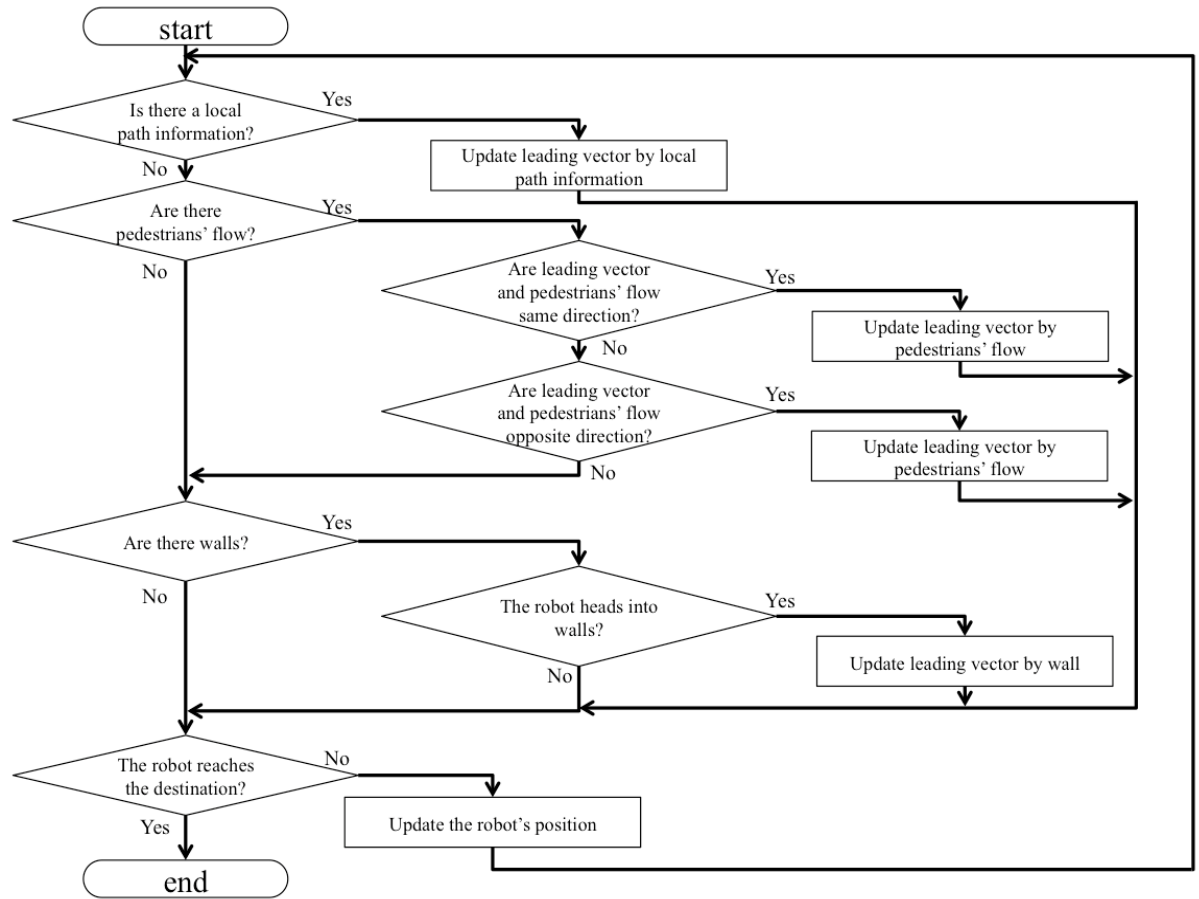


Fig. 2 Sequence of control algorithm.

て誘導ベクトルの更新に利用される。

Fig. 2 のように、まず局所経路情報が存在する場合には局所経路情報が示す目的地方向へ誘導ベクトルを更新する。次に局所経路情報が存在しない場合には歩行者流が存在するか判定し、歩行者流が存在する場合には歩行者流の向きに沿うように誘導ベクトルを更新する。さらに局所経路情報も歩行者流情報も存在せず壁のみが存在する場合には、壁に沿うように誘導ベクトルを更新するそしてロボットのセンシング範囲に何も存在しない場合には、ロボットは誘導ベクトルを更新することなく前ステップと同じ誘導ベクトルに従って移動する。

次に、誘導ベクトルを歩行者流情報を用いて更新していく方法を以下に述べる。歩行者流情報による誘導ベクトルの更新はロボットが歩行者を検出している間、連続的に更新される。誘導ベクトルの歩行者流情報を用いた時間発展式は式 (5) のようになっており、この式の効果により誘導ベクトルの方向が歩行者流に沿う

方向に向いていくよう更新される。

$$\dot{\theta}_{V_l} = \begin{cases} \varepsilon n_i \sin(\bar{\theta}_j - \theta_{V_l}) & \text{if } |\bar{\theta}_j - \theta| \leq \theta_l \\ \varepsilon n_i \sin(\bar{\theta}_j - \theta_{V_l} - \pi) & \text{if } |\bar{\theta}_j - \theta| \geq \pi - \theta_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

θ_{V_l} は誘導ベクトルの直交座標系の x 軸とのなす角であり、 $\bar{\theta}_j$ は後述の要素数が最大のクラス j 中の歩行者速度ベクトルの中心と x 軸とのなす角である。 θ_l は誘導ベクトルに対してどの範囲までの歩行者流を参照し、誘導ベクトルを更新するかを表す定数である。また、 ε は正の重み係数、 n_j はクラス j 中の要素数を示している。この式に従うと誘導ベクトルが歩行者の流れとほぼ同じ方向を向いている時には歩行者の流れと同じ方向に誘導ベクトルが更新され、歩行者の流れがほぼ逆方向に向いている時は歩行者の流れに逆らうような方向に誘導ベクトルが更新される。次節では歩行者情報を歩行者流情報としてとらえるためのクラスタリング手法を提案する。

3. シミュレーション手法

本章では、シミュレーション時の環境設定などについて述べる。本研究では駅構内をロボットが移動することを想定し、歩行者の密度をパラメータとして実験を行った。

3.1 オクルージョンの導入

LRF やカメラなど、どのようなセンサを用いてもオクルージョンは発生する [10]。オクルージョンが発生すると誤った情報取得や情報の欠落が生じてしまいロボット周囲の環境情報取得に悪影響を及ぼすことがある。そこで、本研究ではオクルージョンによる情報の欠落を再現するために Fig. 3 のような場合にオクルージョンを起こすものとした。

$$\begin{aligned} \theta_i - \theta_{oi} &\leq \theta_j \leq \theta_i + \theta_{oi} \\ \theta_{oi} &= \sin^{-1}\left(\frac{r}{l_i}\right) \\ l_i &< l_j \text{ and } i, j \in n_{p_in} \end{aligned} \quad (6)$$

なお、 l_i, l_j はそれぞれ歩行者 i, j とロボットの距離を示し、 r は歩行者の大きさを示す半径、 n_{p_in} はロボットから半径 r_c 以内にいる歩行者の人数を表す。

Fig. 3 の場合、上式に基づき P1 の陰に隠れた P4 の情報がロボットからは計測されないこととなる。

3.2 環境地図

本研究で実験を行う環境には都内のある駅の一部を用いており、Fig. 4 のようになっている。Fig. 4 の背景が黄色の部分に改札が存在し、緑色部分には階段やエスカレータが存在する。また、青色の部分には他の通路が存在する。Fig. 4 中の改札の左側の赤色部には図向かって左方向を示している局所経路情報が存在しており、この網かけ部にロボットが到達すると誘導ベク

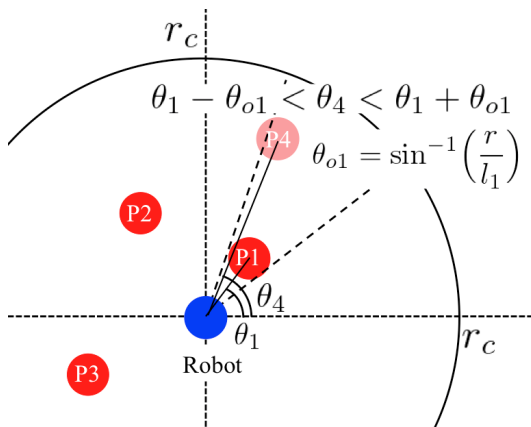


Fig. 3 Occlusion area.

トルを更新する。そしてロボットが目的地へ到達するまでの所要時間を計測した。

3.3 歩行者動作生成

本研究では中村ら [11] が実際の駅構内で計測した歩行者データを用いる。この研究では、複数のレーザレンジファインダを用いて歩行者をトラッキングしたものである。実データを用いることによりセンサ特性に沿った誤差の導入が可能となり、歩行者などの動的障害物をモデル化する際の恣意性が排除可能となる。一方、計測されたデータのため歩行者がロボットの存在に合わせて行動を変化させることがないので、本研究では歩行者がロボットから受ける影響を排除して実験を行う。

4. シミュレーション結果

提案モデルの妥当性を示すために前章の条件のもとでシミュレーションによる検証を行った。その際、シミュレーションに用いたパラメータはそれぞれ次の値にした： $\eta = 1.0$, $\varepsilon = 0.05$, $r_c = 6.0\text{m}$ 。また、比較手法としてポテンシャル法を改良した Ge ら [5] の手法を用いた。この手法は動的障害物が存在する環境下でのナビゲーション手法であり、動的障害物の速度を考慮したポテンシャルを生成することにより衝突回避を行う。

本実験では歩行者の密度の高低に対する目的地到達時間の変化を測定した。実験環境には Fig. 4 を用いた。

まず、実験時のロボットが移動軌跡を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (a) は提案手法の移動軌跡を示しており、(b) は比較手法である Ge らの手法を用いた際の移動軌跡を示している。図中のバツ印は移動開始時から 5 秒間隔でプロットされており、10 秒毎に赤いバツ印をプロッ

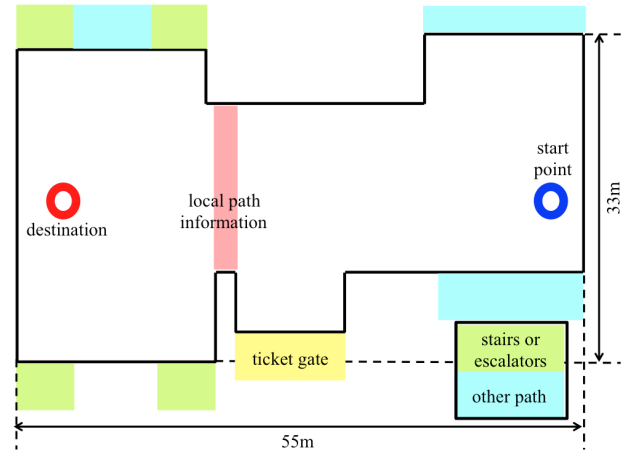
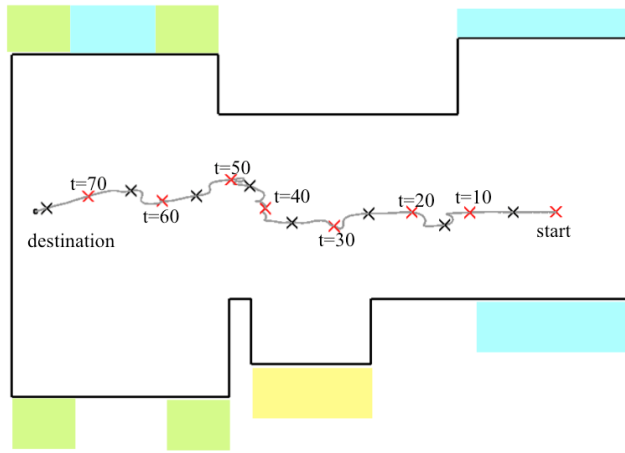
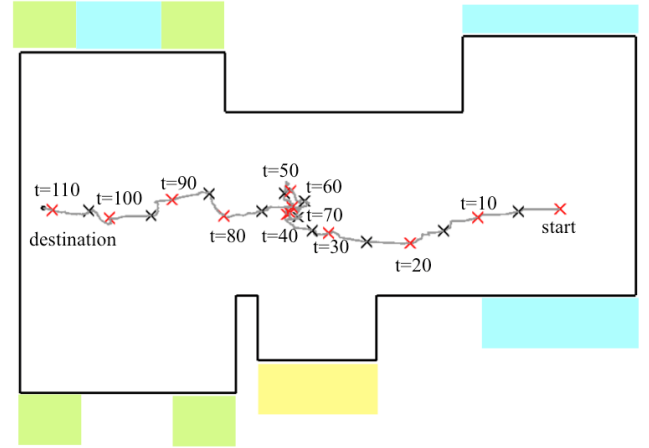


Fig. 4 A map used in experiments.



(a) Proposed method



(b) Comparative method

Fig. 5 Trajectory of the robot when pedestrians density is 0.077 people/m².

トした。なお、両者は同じタイミングで移動を始め、試行中の平均歩行者密度は0.077 人/m²であった。Fig. 5 が表すように、比較手法では40s から70s の間同じ場所に停留している様子が確認された。これに対し、提案手法では多少の迂回は見られた物の停留することなく目的地まで到達することが確認された。

次に、歩行者密度の変化に対する目的地までの所要時間を測るため、上記の実験環境にてロボットが移動開始するタイミングを変化させて300 回試行を行った結果 Fig. 6 のようになった。

図の赤色のグラフが提案手法、青色のグラフがGe手法を用いた際の結果を示しており、縦軸が所要時間、横軸が歩行者密度を表している。なお、歩行者密度はロボットが移動を開始した時点から目的地へ到達するまでの間の平均歩行者密度を示している。Fig. 6 から

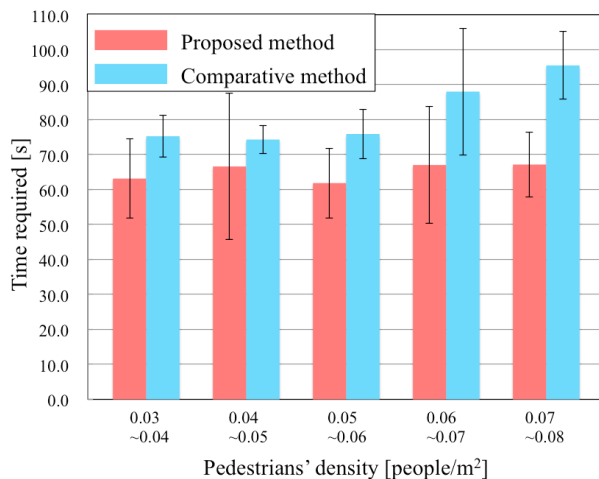


Fig. 6 Result of experiments.

分かるように全ての歩行者密度に対して提案手法の方が短時間で目的地へ到達することが確認された。また、比較手法では歩行者密度の増加に応じて所要時間が増加していたが、提案手法では歩行者密度によらずほぼ一定の所要時間となった。

5. 考察

前章のシミュレーション結果よりロボットのセンシングできる範囲内の歩行者流を検知し、その流れに合わせて誘導ベクトルを更新しつつ目的地まで到達する様子が確認できた。この時、比較手法では歩行者に囲まれた際には過度に衝突回避動作を行おうとした結果、進行方向が定まらず、周囲を囲まれている間は停留してしまっ。しかしながら、本手法では誘導ベクトルと同じ方向へ進む歩行者流に沿って進んでいったため、過度に衝突回避動作を行うことなく周囲を囲まれても停留することなく進行できた。

さらに、複数回試行を行い歩行者密度毎に所要時間を分類した結果、比較手法では歩行者密度が高くなるにつれて所要時間が長くなったのに対し、本手法では歩行者密度の影響が比較的少なかった。比較手法では、上記のような歩行者密度が高くなるにつれてロボットが歩行者に囲まれることが多くなる、脱出が困難になるといった現象が起きたためだと考えられる。対して本手法では歩行者流に沿って進むことにより歩行者に囲まれても停留せずに進行可能であったため歩行者密度の高低に対する影響が少なかったと考えられる。これに加え、本手法ではロボットのセンシング範囲内のみの歩行者について斥力ポテンシャルの計算を行ったため、実時間でナビゲーションを行うことが可能となった。

本研究では歩行者流に沿って誘導ベクトルを更新するのみであったが、今後はロボットの進みたい方向と同じ進行方向へ進む歩行者流へと合流するような手法を構築することにより、さまざまな方向へ進む歩行者に囲まれるリスクを低減する必要がある。

6. おわりに

本稿では歩行者の流れを参考にして動的環境下での移動ロボットのナビゲーション手法を提案した。その結果、適切に歩行者流に沿って進むことにより周囲に様々な方向へ進む歩行者が存在する場合にも停留することなく目的地へ到達可能なことが確認された。

また、歩行者密度が異なる場合にも必要に応じて誘導ベクトルを修正することにより歩行者密度の変化に関係なく目的地へたどり着けることが確認できた。

今後は歩行者流へ積極的に合流していくような手法を考案し、歩行者流をより有効活用することを目指す。

謝辞

本研究の一部は、科研費若手研究 (A)22680017 の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 経済産業省, NEDO, “ロボットの将来市場予測を公表 -2035 年には 9.7 兆円へ成長が期待-” 経済産業省ニュースリリース <http://www.meti.go.jp/press/20100423003/20100423003-2.pdf>, (2010, 参照日 2012 年 10 月 5 日).
- [2] 寺田善貴, 田村雄介, 山下淳, 浅間一, “移動ロボットの軌道生成のためのすれ違いにおける 歩行者の行動パターンのモデル化” 第 24 回自律分散システムシンポジウム予稿集, pp.175-180, (2012).
- [3] C. I. Connolly, J. B. Burns, “Path planning using Laplace’s equation”, *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2102-2106, (1990).
- [4] J. Agirrebeitia, R. Avile’s, I. F. de Bustos, and G. Ajuria, “A New APF Strategy for Path Planning in Environments with Obstacles”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 40, pp. 645-658, (2005).
- [5] S. S. Ge and Y. J. Cui, “Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method”, *Autonomous Robots*, Vol.13, pp. 207-222, (2002).
- [6] L. Huang, “Velocity Planning for a Mobile Robot to Track a Moving Target - a Potential Field Approach”, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.57, pp. 55-63, (2009).
- [7] O. Khatib, “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”, *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 500-505, (1985).
- [8] 奥迫伸一, 坂根茂幸, “レーザレンジファインダを用いた移動ロボットによる人の追跡”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No. 5, pp.605-613, (2006).
- [9] 熊原渉, 田村雄介, 山下淳, 浅間一, “トポロジカルな地図情報と歩行者流情報を用いた移動ロボットナビゲーション手法の提案”, 第 17 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.163-168, (2012).
- [10] H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, “An Autonomous Mobile Robot with a 3D Laser Range Finder for 3D Exploration and Digitalization of Indoor Environments”, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.45, pp.181-198, (2003).
- [11] 中村克行, 趙 卉菁, 柴崎亮介, 坂本圭司, 大鋸朋生, 鈴川尚毅, “マルチレーザスキャナを用いた歩行者の抽出”, 第 10 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.409-414, (2004).