

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

熊原 渉^{*1}, 田村 雄介^{*1}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

Navigation System for Mobile Robot Based on Topological Map and Pedestrians Flow

Wataru KUMAHARA^{*1}, Yusuke TAMURA^{*1}, Atsushi YAMASHITA^{*1}
and Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

This paper proposes a new navigation method of mobile robot based on topological maps. We introduce a new concept “leading vector” that indicates about the direction of the goal and is updated by pedestrian flow. The robot can reach its destination by utilizing the leading vector. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Mobile robot navigation, Potential method, Path planning, Pedestrians flow

1. は じ め に

近年, 自律的にナビゲーションを行う移動ロボットの研究が盛んに行われている. このナビゲーションにおいて一般的には以下の3つの問いに答えることができれば目的地に到達可能だと考えられている⁽¹⁾.

1. 現在地はどこか.
2. 目的地方向はどちらか.
3. どのようにして目的地までたどり着けば良いか.

この1番目に当たる手法として普及しているものとして自己位置推定と環境地図生成を同時に行う SLAM (Simultaneously Localization and Mapping) が挙げられる. SLAM などの手法を用いて上記の3つの問い全てに対して適切に答えながらナビゲーションを行っている研究が数多くなされている⁽²⁾.

しかしながら, Franz ら⁽³⁾は1番目の現在どこに自身が位置しているのかという問いには必ずしも答えられる必要はなく, 3番目の目的地へどのようにしてたどり着けば良いのかという問いに答えることが重要であると述べている. このようなナビゲーションを行っているものとして Bauer ら⁽⁴⁾, Nijss ら⁽⁵⁾の研究では, ローカルナビゲーションやデータ収集のために SLAM を用いているものの, グローバルナビゲーションでは歩行者に進むべき方角を尋ね, その方向へ進んでいくことで目的地へ到達しており, その際グローバルな自己

位置推定は行っていないため上記の問いの1番目には答えずにナビゲーションを行なっている.

また, 駅構内などにおいて, 図1のような案内標識が設置されている. このような案内標識には現在地がどこかといった情報は含まれず, 目的地への方向のみが示されており, この案内標識に適切に従って進路を決めていくことで目的地に到達することができる.

以上より現在地を知ることは目的地の位置を推定するために行うものであり, 目的地へどのようにしてたどり着けば良いか分かっている場合は現在地がどこなのかを知る必要がない場合もある. さらに駅の案内標識は標識のある地点から目的地への方向という情報を含んでいるが, その方向の通路のどこに障害物があるかなどの情報を含んでいない. 従って案内標識の設置してある位置と案内標識が指し示す目的地への方向の集合をトポロジカルな地図としてとらえることができる.

そこで本研究では上記のような決定プロセスとトポ

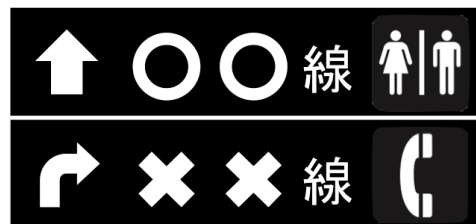


Fig. 1 Informatory signs in a station.

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656
東京都文京区本郷 7-3-1) {kumahara, tamura, yamashita,
asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

ロジカルな地図の相性が良いと考え、これらを活用したナビゲーションを行う制御手法の提案を目的とする。またセンシング誤差を考慮する際、誤差を低減するためにセンサ精度を上げることを目指すのではなく、計測誤差がある程度あっても適切に修正して目的地への方角を導き出せるナビゲーションシステムを設計する。この誤差修正システムには歩行者の歩いている方向に沿って通路が続くという仮説を基に、誤差と共に検出された目的地への方角を歩行者流に応じて修正していく手法を提案する。なお、本研究では駅構内のように道の分岐点などに案内標識がある環境を想定しており、上記の手法を用いてシミュレーション実験を行う。

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、さらにピクトグラムから得られるトポロジカルな地図情報と歩行者流情報を反映する誘導ベクトルについて説明する。第3章では環境設定について説明する。第4章ではシミュレーション実験の結果を示し、第5章において考察を行う。そして最後にまとめと今後の展望を述べる。

2. 提 案 手 法

ある地図中における移動ロボットの挙動を確認する。その際、ポテンシャル法⁽⁶⁾を用いて歩行者との衝突を避け、周囲の歩行者の流れをセンシングして目的地の方角を修正する。なお、環境中の歩行者の量はロボットの半径5m以内に2人から3人程度いるような状況を想定する。本章では以下に手法を示す。

2.1 ポテンシャル法 まずポテンシャル法について、開放空間において歩行者とロボットのみが存在する空間を考える。一般的なポテンシャル法による位置、速度の更新方法は以下のような形式をしている。

$$\dot{\mathbf{v}} = \text{grad}U_d + \text{grad}U_o \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v} \quad (2)$$

$$U_o = \sum_{i=0}^{n_p} U_{pi} + U_w \quad (3)$$

$\dot{\mathbf{v}}$, $\dot{\mathbf{r}}$ はそれぞれ速度ベクトルと位置ベクトルの微分値を表しており、 U_d , U_o はそれぞれ目的地が張るポテンシャル、障害物が張るポテンシャルを示している。そして障害物が張るポテンシャルは式(3)のように歩行者が張るポテンシャル U_{pi} 、壁が張るポテンシャル U_w の和からなっている。なお、 n_p は歩行者の人数を示している。

そして歩行者から受ける斥力ポテンシャルを以下のように設定する。

$$U_{pi} = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{pi}|^2} - \frac{1}{r_c^2} \right) & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{pi}| \leq r_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中の η は正の重み係数、 $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}_{pi}$ はそれぞれロボットの位置、 i 番目の歩行者の位置であり、二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。また壁から受ける斥力ポテンシャルも式(4)と同様のものを用いており式(4)中の $\mathbf{r}_{pi}$ をロボットから最も近い壁の一点の座標へ変換したものとなっている。また本実験環境では目的地からの引力ベクトルは用いず、誘導ベクトル (Leading Vector) という変数を用い、式(1)を以下の式に変形する。

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_l + \text{grad}U_o \quad (5)$$

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 式(1)のように本来、ポテンシャル法では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配置するものである。しかしながら、今回想定する環境では目的地までの距離が遠いため引力ベクトルを作用させても効果は薄くなることに加え、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る。

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ピクトグラムの矢印のように目的地までの大まかな方向を示した誘導ベクトル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整合を取るために、この誘導ベクトルは目的地の経路に沿った大まかな方向示した大きさ一定のベクトルとした。そしてこの誘導ベクトルは歩行者の流れに合わせて修正可能なものとする。

誘導ベクトルの修正方法は2.4節で示すようになっており、次節の手法を用いて歩行者ベクトルをクラスタリングすることで流れとしてとらえ、その流れに従って誘導ベクトルを修正していく。

2.3 歩行者速度ベクトルのクラスタリング 歩行者の流れを計測するために個々人の移動速度ベクトルをクラスタリングし、まとまりとして認識する必要がある。そこで、本研究ではK-means法⁽⁷⁾に着想を得た手法を用いてクラスタリングを行う。

本研究では簡単化のためロボットのセンシング範囲内の歩行者の速度ベクトルが一様に分布し、歩行者流としてとらえることができない場合でもクラスタリングする過程を踏んでいる。このような場合においてK-means法をそのまま用いると各要素の所属するクラスタの初期状態がランダムに割り当てられるためクラスタリングを行う度に結果が異なってしまう、誘導ベクトルの修正が不安定になることがある。

上記のような事態を避けるため要素の初期状態を図2中の領域に応じて決める。図2は誘導ベクトルと、クラスタリングを行う際の初期状態を振り分ける領域を示したものであり、誘導ベクトルと同じ向き、左側、後方、右側の4つの領域からなっている。そしてクラスタ数は歩行者がどの初期領域上に存在するかに応じて1個から4個のクラスタが生成される。

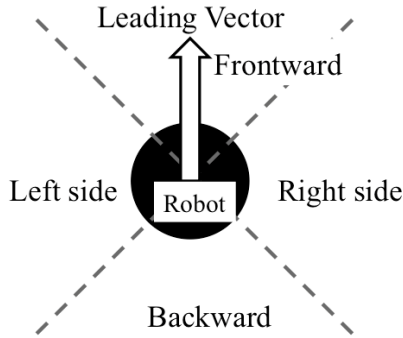


Fig. 2 Leading vector and initial clustering area.

2.4 誘導ベクトルの修正方法 上記の誘導ベクトルを歩行者の流れに合わせて修正していく方法を以下に述べる。これは結合振動子における振動子間の位相差を調節する振動子間相互作用⁽⁸⁾から着想を得たものであり、式(6)のようになっている。

$$\dot{\theta}_{v_i} = \begin{cases} \varepsilon n_j \sin(\bar{\theta}_j - \theta) & \text{if } |\bar{\theta}_j - \theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ \varepsilon n_j \sin(\bar{\theta}_j - \theta - \pi) & \text{if } |\bar{\theta}_j - \theta| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (6)$$

θ_{v_i} は誘導ベクトルの直交座標系の x 軸とのなす角であり、 $\bar{\theta}_j$ は要素数が最大のクラスタ 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。また、 ε は正の重み係数、 n_j はクラスタ j 中の要素数を示している。このようにして誘導ベクトルと歩行者の流れがほぼ同じ方向を向いている時には歩行者の流れの方向に誘導ベクトルを更新していき、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に誘導ベクトルを更新していく。

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 測定誤差の導入 本研究では、実環境で想定されるような誤差を導入した。この誤差とは、ロボットが歩行者を測定する時や、ピクトグラムを検出する際に発生するものである。歩行者の測定誤差については位置と速度について2次の正規分布に従う誤差を与えた。また、駅構内においてロボットが案内標識を認識した際に生じる誤差も与えた。

3.2 オクルージョンの導入 Laser Range-Finder (LRF) やカメラなど、どのセンサを用いてもオクルージョンは発生してしまう⁽⁹⁾。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取得に悪影響を及ぼす。そこで、本研究では情報の欠落を再現するために下図のような場合にオクルージョンを起こすものとした。

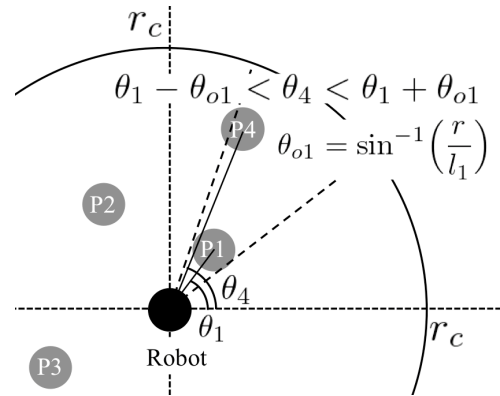


Fig. 3 Occlusion area.

$$\begin{aligned} \theta_i - \theta_{oi} &\leq \theta_j \leq \theta_i + \theta_{oi} \\ \theta_{oi} &= \sin^{-1}\left(\frac{r}{l_i}\right) \\ l_i &< l_j \text{ and } i, j \in n_{p_in} \end{aligned} \quad (7)$$

なお、 l_i, l_j はそれぞれロボットと歩行者の距離を示し、 r は歩行者をモデル化した際の半径、 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示す。具体的には、まず図3のようにロボットから近い歩行者から順にナンバリングしていく。そしてロボットから遠い歩行者から順により近い歩行者の陰に隠れてしまっていないかを式(7)の判別式を用いて判別し、式(7)に当てはまる場合はオクルージョンを起こしているものとし、その歩行者の情報はロボットに反映されないものとする。

のとする。

3.3 歩行者制御 今回用いた歩行者の状態には以下の2種類を持たせた。

- ・通常歩行（正規の通路上にいる時）
- ・ランダムウォーク（正規の通路以外にいる時）

本研究における歩行者の通常歩行は上記のロボットの制御手法と近いものとなっている。歩行者のモデリングの際に Social Force Model (SFM)⁽¹⁰⁾や磁気モデル⁽¹¹⁾を用いることがあり、この概念はポテンシャル法と類似しているため、本研究ではロボットの基本制御と同じく移動方向に関しては誘導ベクトルを用い、障害物回避にはポテンシャル法を用いている。しかしながら移動ベクトルは周囲の歩行者流によって変化せず、ある期間ごとに $\theta - \theta_{hu}$ から $\theta + \theta_{hu}$ までランダムに改変されるものとなっている。そしてこの誘導ベクトルは歩行者が交差点に到達した際に接続されている経路方向へとランダムに切り替わるものとなっている。また、ロボットのような周囲環境の測定誤差やオクルージョンを起こさないものとしている。

次に正規の通路以外の通路や改札などに入った時にはランダムウォークを行うものとした。そして通路上に戻った際には通路の方向に沿った誘導ベクトルを与え、通常歩行を行わせることとした。なお本研究では簡単化のため、意志を持って正規の通路から外れる歩行者はいないものとし、誘導ベクトルやポテンシャル法の影響により結果的に正規の通路から外れるものとした。

3.4 環境地図 本研究で実験を行う空間を図4とした。図4の網かけ部は改札や正規の通路以外の箇所を示しており、図4中のピクトグラムが描かれている位置近傍にロボットが到達すると誘導ベクトルをピクトグラムの指し示す方向に修正するものとした。この時、ロボットはピクトグラムの指し示す方向を誤差と共に取得するものとした。

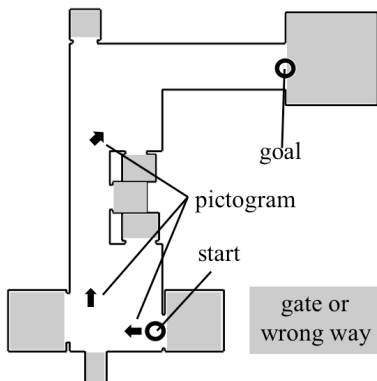


Fig. 4 A map used in experiments.

そしてロボットがゴール部以外の網かけ部に入った場

合に試行失敗とした。

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： $\eta = 1.0$, $\varepsilon = 0.05$, $r_c = 5.0\text{m}$ 。

4.1 予備実験 まず、第2章で提案した誘導ベクトルの修正が正しく行われているかを確認した。この時、歩行者の進行方向を示す誘導ベクトルは図5においてy軸に沿って正の向きと負の向きの2種に設定し、これは更新されることなく初期値を維持する。さらにロボットが歩行者を計測する際には誤差を含まず、オクルージョンも起こさないものとした。図5では始めに右上方向の誘導ベクトルを持っていたロボットが歩行者群に合流していき、y軸を平行に進行している歩行者の進行方向と同じ向きに誘導ベクトルが修正されていく様子が示されている。図中のロボットから出ている黒の線は誘導ベクトルを示し、灰色の線はクラスタリングされた歩行者の流れの向きを示している。また、ロボットとの距離が r_c 以内の歩行者には灰色の線で歩行者の進行方向を描画した。

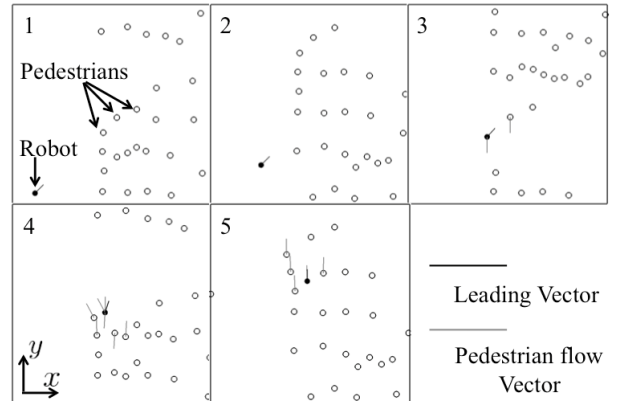


Fig. 5 Snapshot of moving robot and pedestrians in open space.

また、その時の誘導ベクトルの角度と要素数最大の歩行者の流れの角度の時間変化を図6に示す。図中の実線、破線はそれぞれ誘導ベクトル、歩行者の流れのx軸に対する角度を示し、網かけ部は $|\bar{\theta}_j - \theta| > \frac{\pi}{2}$ となっている期間を示す。これより、適切に誘導ベクトルが更新されていくことが確認された。

4.2 実験 次に歩行者の密度の高低に対する目的地到達実験の成否を調べた。この時、歩行者の位置や速度をセンシングする際の誤差を2次の正規分布で与え、平均は実際の歩行者の位置や速度の値を用い、分散はそれぞれ 0.25m , 0.5m/s とした。また、ピクト



Fig. 7 Snapshot of moving robot and pedestrians in a map.

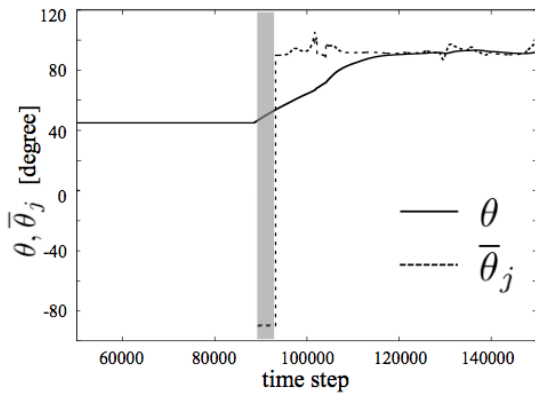


Fig. 6 Time development of angle θ and $\bar{\theta}_j$.

グラムをセンシングした際に生じる誤差として、ピクトグラムの示す方向から $\pm \frac{\pi}{6} \text{rad}$ の範囲内で $\frac{\pi}{36} \text{rad}$ 刻みの一様乱数を用いた。実験環境には図4を用い、図中の矢印のある地点にロボットが到達すると誘導ベクトルをその矢印の方向に設定する。

実験成功時のロボットの移動していく様子を図7に示す。なお、図7の左上・右下の図はそれぞれ実験開始・終了時の様子を表しており、その他の図は実験中のロボット周辺を拡大したものを表している。ロボットは図中の大きい円の中心に位置し、大きい円はロボットのセンシング範囲を示している。そしてロボット以外の点は歩行者を表しており、ロボットのセンシング範囲内にいる歩行者からは進行方向ベクトルを示した線を表示した。ロボットから出ている線は誘導ベクトルを表しており、実際の進行方向とは異なるので注意されたい。

図7よりセンシング誤差により誘導ベクトルが目的方向と異なる方向に向いてしまった状況において計測

誤差を含む歩行者流情報を利用する場合でも誘導ベクトルを適切に修正して目的地までたどり着いている様子が見て取れる。

誘導ベクトルを修正しなかった場合と修正した場合において歩行者の密度を 0.02 人/m^2 , 0.03 人/m^2 , 0.04 人/m^2 としてそれぞれ 50 回ずつ試行し、その成功率をまとめると図8のようになった。

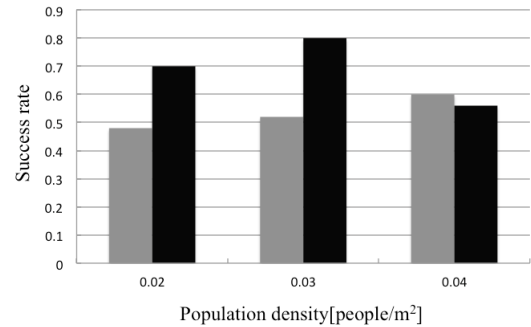


Fig. 8 Result of experiments.

図の灰色のグラフが誘導ベクトルを修正しなかった結果を示し、黒色のグラフが誘導ベクトルを修正した結果を示している。図8から分かるように歩行者の密度が 0.04 人/m^2 の時には誘導ベクトルを修正しなかった場合に比べて成功率が低下してしまったものの、歩行者の密度が 0.02 人/m^2 , 0.03 人/m^2 の時には誘導ベクトルを修正した場合のほうが成功率が20%以上向上した。

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の移動方向をクラスタリングして部分的な流れを検知し、その流れに合わせて誘

導ベクトルを修正していく様子が確認できた。図5の4つ目のスナップショットからは上方向、左上方向、下方向の3種の歩行者の移動方向のクラスタが生成されている様子が確認でき、そのうち上方向のクラスタの要素数が一番多くなった。その際、上方向に誘導ベクトルが修正されていったことからクラスタリングしたものからどのクラスタを選ぶか、適切に判断されていることが示された。また図6からは、図中の網掛け部では $|\bar{\theta}_j - \theta| > \frac{\pi}{2}$ となっているため式(6)の下式から θ は $\bar{\theta}_j - \pi$ に漸近していき、その後は $|\bar{\theta}_j - \theta| \leq \frac{\pi}{2}$ となっているため式(6)の上式から θ は $\bar{\theta}_j$ に漸近していく様子が確認できた。すなわち、本制御手法によって目的地が歩行者の流れに沿った方向にある場合、逆行する方向にある場合のどちらの状況でも適切に誘導ベクトルを修正できることが示された。

さらに、測定誤差を含む状況でロボットを制御した実験から分かるように、歩行者の位置や速度、案内認識の認識に誤差があったとしても適切に目的地まで到達できたことが確認できた。その際、歩行者の密度が 0.03 人/m^2 以下の場合において、誘導ベクトルを修正しなかった場合に比べて修正した場合の方が成功率が向上した。しかしながら歩行者の密度が 0.04 人/m^2 の場合には成功率が低下してしまった。この原因は、ロボットの目的地へ向かう歩行者流よりも別の方向へ向かう歩行者流の影響が強くなってしまった場合に別な方向へとロボットの誘導ベクトルが修正されてしまったためと考えられる。これに対し、誘導ベクトルを修正しなかった場合では一度設定した誘導ベクトルを歩行者流に合わせて修正しなかったため成功率がそこで、今後このような事態を避けるため、人通りの多い通路から人通りの少ない通路へ入る際などの状況では通路の幅情報などを活用し、誘導ベクトルを修正する際の重み係数 ε を環境に合わせて動的に変更できるものとする必要があると考えられる。

6. お わ り に

本稿では歩行者の流れを参考にして移動ロボットの誘導ベクトルを修正する手法を提案した。その結果、適切に歩行者の速度をクラスタリングし流れを検出することを確認した。そしてその歩行者の流れから自身の誘導ベクトルを適切に修正することを確認した。

また、センシングに誤差がある状況でも目的地へたどり着けることが確認できた。しかしながら、目的地方向と規模が大きな歩行者流の流れの向きが異なる場合には成功率が下がってしまったので成功率を向上させるため、どの歩行者流情報を用いるか、どれくらい歩行者流情報を参考にするかなどを動的に変更可能

なシステムへと改良する必要がある。

今後はより頑健性の高い制御手法を考案し、実環境においてピクトグラムを認識するシステムや移動体から歩行者の歩行速度をセンシング可能なシステムを構築し、本手法の効果を検証する。

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) Tod S. Levitt and Daryl T. Lawton, "Qualitative Navigation for Mobile Robots", *Artificial Intelligence*, Vol.44,(1990), pp.305-360.
- (2) 森岡博史, 李想揆, Tongprasit Noppharit, 長谷川修, "人の多い混雑な環境下での SLAM による移動ロボットのナビゲーション", 第28回日本ロボット学会学術講演会(2010), 1Q3-6.
- (3) Matthias O. Franz and Hanspeter A. Mallot, "Biomimetic Robot Navigation", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.30(2000), pp.133-153.
- (4) Andrea Bauer, Klaas Klasing, Georgios Lidoris, Quirin Mühlbauer, Florian Rohrmüller, Stefan Sosnowski, Tingting Xu, Kolja Kühnlenz, Dirk Wollherr, Martin Buss, "The Autonomous City Explorer: Towards Natural Human-Robot Interaction in Urban Environments", *International Journal of Social Robotics*, Vol.1(2009), pp.127-140.
- (5) Roderick de Nijs, Miguel Juliá, Nikos Mitsou, Barbara Gonsior, Dirk Wollherr, Kolja Kühnlenz and Martin Buss, "Following Route Graphs in Urban Environments", *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communications*, (2011), pp.363-368.
- (6) 太田順, 倉林大輔, 新井民夫, 知能ロボット入門, コロナ社(2001), pp.63-66.
- (7) 宮本定明, クラスタ分析入門-ファジィクラスタリング理論と応用-, 森北出版(1999), pp.13-20.
- (8) Yoshiki Kuramoto: "Self-Entrainment of a Population of Coupled Non-Linear Oscillators", *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics, Lecture Notes in Physics*, Vol.39(1975), pp.420-422.
- (9) Hartmut Surmann, Andreas Nüchter, Joachim 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(2003) pp.181-198.
- (10) Dirk Helbing and Péter Molnár, "Social Force Model for Pedestrian Dynamics", *Physical Review*, E 51(1995), pp.4282-4286.
- (11) 岡崎甚幸, "建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究-その1 磁気モデルの応用による歩行モデル-", 日本建築学会報告書, 第283号(1979), pp.111-119.