

# 人ごみで移動可能な移動ロボットの開発

○近村 学 (東京大学), 田村 雄介 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

## Development of a mobile robot moving in crowded environment

○Manabu CHIKAMURA(Univ. of Tokyo), Yusuke TAMURA (Univ. of Tokyo),  
and Hajime ASAMA(Univ. of Tokyo)

**Abstract:** This paper attempts to develop a mobile robot which is able to move in crowded environment. When a robot works under high population density environment, it is necessary to make many collision avoidances. To solve this problem, it is available that a robot moves with a pedestrian lane, which is self-organized in crowded environment. In this paper, we regarded crowded environment as a set of pedestrian lane and developed an algorithm moving along it. As a simulation result, it was confirmed that the proposed method was more reliable than others that don't consider a characteristic of crowded environment.

**Key Words:** Mobile Robot, Crowded Environment

### 1. 研究背景

安全・安心な社会の実現, 便利でゆとりある生活を実現するために, ロボットが生活・公共の場でより身近な存在として役立つことへの期待は高まっている[1].

ところが, 人間の共存環境下で動くロボットは人の密度が低い環境下を想定したものが多く, 人ごみを取り扱ったものでも実際にロボットの周囲にいる人間は数人程度であり, 駅のコンコースのような周囲に多数の人間が常にいる環境を想定はしていない[2][3]. そこで, 本研究では人間の密度が高い人ごみの環境下で移動可能なロボットの開発を目的とする.

人間の密度が高い環境下で問題となるものの一つに, 人間に対する回避行動の増加があげられる. 回避行動が増えた結果, 人間の安全性や快適性を損ない, ロボットの移動効率を低下させる恐れがある. この問題を解決するため, 人ごみの特性に着目する. 人間の密度が高い環境下では同じ方向に向かう人間のレーンが自己組織的に形成されることが知られている[4]. そのレーンに乗ることにより, 回避動作を減少させることができ, 人間に対し安全かつ快適となり, ロボットの移動効率を損なわない行動が予想される.

本稿では人ごみをレーンの集合としてモデル化し, そのレーンに乗り移動を行うアルゴリズムを開発し, シミュレーションで検証を行った.

### 2. モデル化

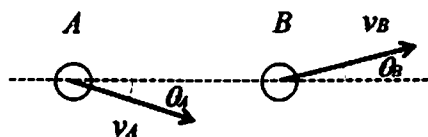


Fig.1 Definition of Human Lane

### 2.1 レーンの定式化

本研究では人間のレーンを速度が近い人間同士が直線上に一列に並んでいる状態として考え, 以下のように定式化することとする (Fig.1).

- 1) 人間 A と人間 B の距離が閾値  $d_{threshold}$  以下

$$\|x_A - x_B\| \leq d_{threshold} \quad (1)$$

- 2) 人間 A, B を結んだ直線と, 人間 A, B の速度ベクトル  $v_A, v_B$  のなす角  $\theta_A, \theta_B$  が閾値  $\theta_{threshold}$  以下

$$\theta_A \leq \theta_{threshold} \quad (2)$$

$$\theta_B \leq \theta_{threshold} \quad (3)$$

- 3) 人間 A, B の速度ベクトル  $v_A, v_B$  の差が閾値  $v_{threshold}$  以下

$$\|v_A - v_B\| \leq v_{threshold} \quad (4)$$

要素 A が, あるクラスタのある要素 B と上記三つの条件を満たしているならば, 同じクラスタに属するとし, 形成されたクラスタをレーンと定義する.

### 2.2 人ごみのモデル化

本稿では Fig.2 のように出発地から目的地の途中に人

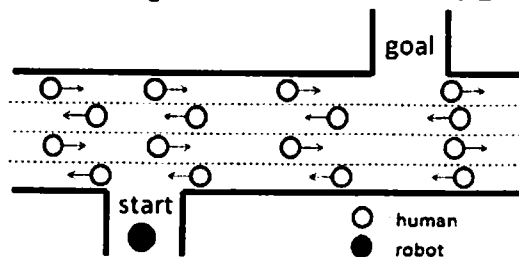


Fig.2 Modeling Crowded Environment

ごみが存在している状況を考える。人ごみはレーンを形成しており、移動ロボットはこの人ごみの中を移動し、目的地に移動する。人ごみの密度はそれぞれのレーン内に移動ロボットが入り込むことができる隙間が十分にあるものとする。単純化のため、レーンの進行方向は出発地から目的地に向かう流れと目的地から出発地に向かう流れに限られているものとする。また、出発地から目的地方向に進む人間のレーンが少なくとも一列存在すると仮定する。

### 2.3 想定する移動ロボットの条件

ロボットには出発地と目的地の座標が与えられているものとする。センサは移動ロボットに搭載されたものみの使用を考え、環境中のセンサの使用は考慮しない。センサにより取得できる情報は、ロボットが存在しているレーンの前後の人間と隣のレーンまでの移動ロボットから一定範囲の人間の位置を取得できると考える。ロボットのオドメトリによりロボットの位置を取得できるとする。また、使用する移動ロボットは全方向に移動可能なロボットを考えその向きは考慮に入れないこととする。

## 3. アルゴリズム

本稿ではレーンの進行方向に逆らわず、レーンの流れに沿って移動しながらレーン間を渡り歩くことによって目的地へたどり着くようにすることを目指す。移動ロボットはレーン間の移動とレーン内の追従運動の二つを繰り返すことにより目的地に向かうことを目指す。本章ではレーン間移動とレーン内の追従運動をどのように組み合わせて目的地まで進むかについての大域的なアルゴリズムについて述べたあと、移動のための局所的な運動であるレーン間の移動、レーン内の追従運動について述べる。

### 3.1 大域的なアルゴリズム

ローカルなセンサしか持たない移動ロボットでは、信頼できる情報は隣のレーンまでに限られると考えられるので、移動ロボットは周囲の情報の取得も兼ねて、最も目的地に近いレーンに移動する (Fig.3-(1))。最も目的地に近いレーンの進行方向が目的地に向かっているなら容易に目的地に進めるが (Fig.3-(6))、進行方向が目的地の逆の場合 (Fig.3-(2)) はそのまま目的地方向に進むと正面から人間を回避しなければならない。ここでは、人間の行動を妨げないことを第一の目標とするため、ゴール方向に向かうレーンまでさかのぼり、迂回してゴールに進むことを考える。まずゴール方向に向かうレーンの中で最もゴールに近いレーンに移動する (Fig.3-(3))。そのレーン内で追従行動を行い (Fig.3-(4))、目的地と現在位置との進行方向の距離  $d$  が閾値  $d_1$  以上離れた位置からレーン間の移動を開始する (Fig.3-(5))。  $d_1$  は今まで各レーンの進入から退出までに移動した距離の平均値  $d_{average}$  と現在地から目的地までに存在するレーンの数  $n$  の積とし、

$$d_1 = nd_{average} \quad (5)$$

とする。

これによりゴール方向に向かうレーンに乗り、目的

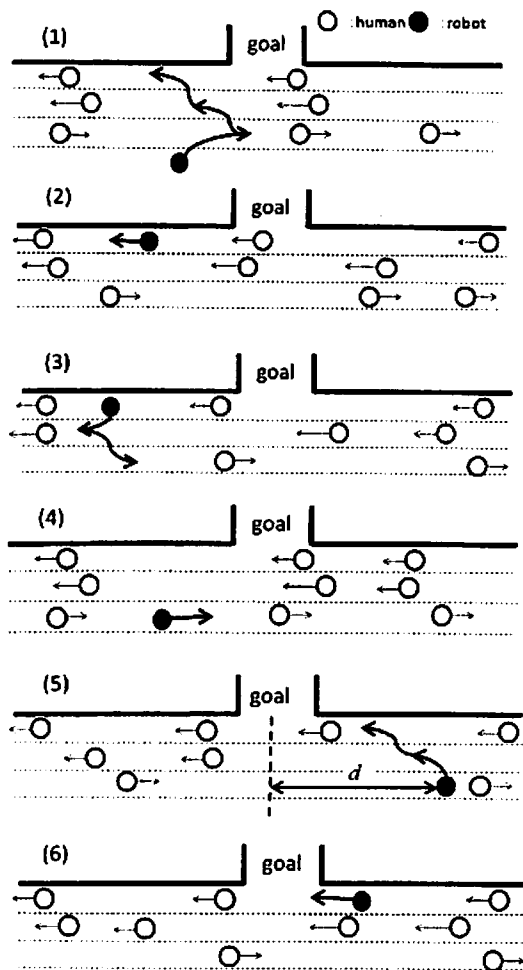


Fig.3 Algorithm of Moving in Crowded Environment

地へと容易に到着できる (Fig.3-(6))。もし Fig.3-(5) から Fig.3-(6)までのレーン間の移動に時間がかかり、レーンが目的地方向に向かっていない状態 (Fig.3-(2)) ならば再び目的地に最も近い目的地方向のレーンに戻り迂回することでゴールに向かうこととする (Fig.3-(2) ~ (6))。

### 3.2 レーン内の追従運動

レーン内の追従はレーン内の人間と適切な距離を保つ必要と、レーンからはみ出さずに移動する必要がある。つまり、レーンの進行方向の制御とその垂直方向の制御を行う必要がある。仮想的なバネやダンパで表現された仮想的な外力に従って移動ロボットが行動することを考える。

#### 3.2.1 レーン内の追従運動

レーンの進行方向の制御では、前後の人間に合わせた距離と速度を保つ必要がある。本稿では、仮想的なバネとダンパを導入し (Fig.4), 移動ロボットの制御を行うことを考える。ここで、仮想的なバネの係数を  $k$ , ダンパ係数を  $c$ , 移動ロボットの座標を  $x$ , 前の人間の座標を  $x_0$ , ロボットの質量を  $m$  とおく。目標とする移動ロボットと人間の距離を  $l$  とし、目標の速度を前の人

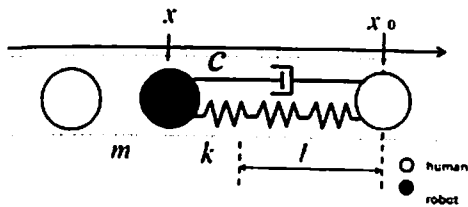


Fig.4 Horizontal Follower Control in Lane

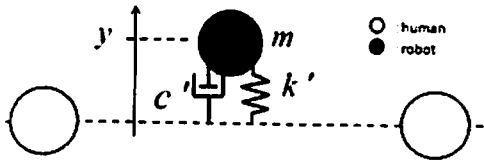


Fig.5 Vertical Follower Control in Lane

間の速度  $\dot{x}_0$  とすると、運動方程式は

$$m\ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{x}_0) - k(x - x_0 - l) \quad (6)$$

と表される。  $z = x - x_0 - l$  とおき、式を整理すると

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z = 0 \quad (7)$$

となる。ここで

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

とした。

レーン内の追従運動は速やかに目標値に収束し、レーン内で振動を起こさないようにするのが良いと思われるため、臨界制動となるように減衰定数  $\zeta = 1$  となるようにバネ係数  $k$ 、ダンパ係数  $c$  を決定する。

移動ロボットと人間の距離  $l$  は、レーン間の移動時に加減速することを予想し、隣のレーンとの相対速度  $v_{ref}$  に応じた距離をとることにする。ここでは前後の人間の中心から  $v_{ref}$  に比例した距離をとるモデルを考える。係数を  $a$ 、前後の人間の中心と前の人間との距離を  $l_{center}$  として

$$l = l_{center} - av_{ref} \quad (8)$$

とする。

進行方向と垂直方向の制御は進行方向の制御と同様に、仮想的なバネとダンパを仮定して制御を行うことを考える(Fig.5)。ここでは適切な位置としてレーン内の前後の人間を結んだ直線との距離が 0 となる位置を目標位置とし、目標速度を前にいる人間の垂直方向の速度とする。移動ロボットの質量を  $m$ 、ここで仮定した仮想的なバネの係数を  $k'$ 、ダンパ係数を  $c'$ 、移動ロボットの座標を  $y$  とおくと、

$$m\ddot{y} = -c'\dot{y} - k'y \quad (9)$$

と表される。ここでも振動を起こさず速やかに収束す

ることが望ましいため、前項の (7) 式と同様に整理し、減衰定数  $\zeta = 1$  となるようにバネ係数  $k'$ 、ダンパ係数  $c'$  を決定する。

### 3.3 レーン間の移動

#### 3.3.1 レーン間の移動タイミング

レーン間の移動が可能であるタイミングとは、移動先のレーンに移動ロボットが入り込み追従運動を行えるだけの間隔が存在していることと、レーン間の移動時に人間との衝突が起こらないことである。移動ロボットが追従運動を行える間隔を  $d_{follower}$ 、レーン間の垂直方向の移動にかかる時間を  $t$ 、移動先レーンの移動ロボットの前方にいる人間の位置を  $x_1$ 、後方にいる人間を  $x_2$ 、移動ロボットの位置を  $x$  とすると(Fig.6)、追従運動が可能な条件は

$$d_{follower} \leq x_1 - x_2 \quad (10)$$

衝突を避けられる条件は

$$x + \dot{x}t < x_1 + \dot{x}_1t \quad (11)$$

$$x_2 + \dot{x}_2t < x + \dot{x}t \quad (12)$$

これらの条件を満たすときレーン間を移動可能とする。

#### 3.2.2 レーン間の移動

ここで求められるのは移動ロボットの位置と速度を移動先のレーン内にいる人間に応じたものに変えることである。前節のレーン内の追従運動と同様に仮想的なバネとダンパを用いて追従する位置と速度を移動先のレーンに合わせてレーン間の移動を行う(Fig.7)。目標とする位置として、移動先のレーンの前後の人間を結んだ直線上の前後の人間の中心とする。中心を選んだのは、移動先のレーンの次に移動するレーンの様子が観測できない場合に備えたものであり、そのレーンが観測できたならば、適切な追従位置に移るものとする。

## 4. シミュレーション実験

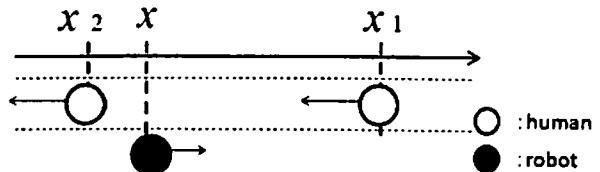


Fig.6 Conditions of Moving to Next Lane

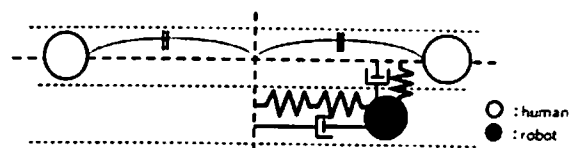


Fig.7 Control in Moving to Next Lane

前章で提案した人間のレーンに従って行動するアルゴリズムを検証するため、人間のレーンを考慮に入れない障害物回避アルゴリズムとシミュレーションで比較検証を行った。比較対象として、アルゴリズムは仮想インピーダンス法[5]を用いた。目的地に対する引力と、壁や人間に対する斥力という仮想的な力を考慮することで、動的に経路を形成する手法である。

#### 4.1 状況設定

このシミュレーションで想定した環境を Fig.8 に示す。レーンの速度の向きは等分にランダムに選ぶが、速度の向きが目的地方向であるレーンが必ず存在するものとした。レーン内の人間の速さは 0.6~1.0[m/s] の範囲で一様な乱数を発生させた。想定する移動ロボットの最大加速度は 9.8[m/s<sup>2</sup>]、最大速度は 1.0[m/s] とした。レーン内の平均の人間の間隔を 1000, 2000, 3000[mm] と変化させ、本稿でのアルゴリズムと比較実験用のアルゴリズムで目的地までの到着時間を各 10 回測定した。目的地に到着するまでに、人間と衝突、もしくは時間が規定時間 (60[s]) 以上かかった場合を失敗と見なした。

#### 4.2 実験結果

本稿での提案手法と比較用の仮想インピーダンス法でのシミュレーション実験 10 回中の成功回数を Fig.9 に示す。提案手法での 2 回の失敗は規定時間の超過で、仮想インピーダンス法の失敗は人間との衝突が 18 回、規定時間の超過が 4 回であった。成功時に目的地到着までかかった時間を Fig.10 に示す。

#### 4.3 考察

本稿での人ごみにおいての提案手法は単純な障害物回避との比較において、目的地にたどり着ける確率が高く、信頼性が高いことがわかった。

仮想インピーダンス法で起こった衝突の主な状況は、複数の人間に対して回避行動を行った結果、回避しきれずに衝突するというケースであった。提案手法では衝突の危険性が高い複数の人間に対する回避行動を避けるため、安全性の点で大きく勝ると考えられる。

提案手法での 2 回の規定時間の超過の原因は付近に移動できる位置がなく、移動先のレーンが現在のレーンと近い速度で動いている場合、ロボットと人間の相対位置の変化が少ないため、次のレーンの移動に時間がかかったことが原因であった。

提案手法では所要時間がレーンの速度や向きに大きく影響するので、ばらつきが大きい。特に所要時間に関して影響が大きいのは目的地付近のレーンが目的地方向に向かっていない場合に行う迂回行動である。迂回行動は隣のレーン以降の情報不足しているため起

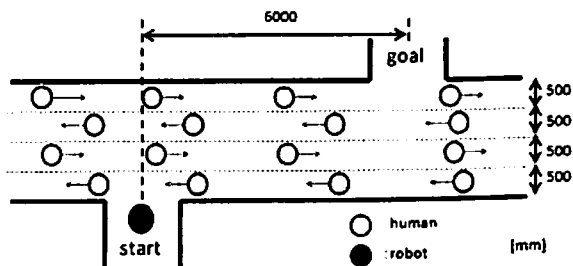


Fig.8 Simulation Environment

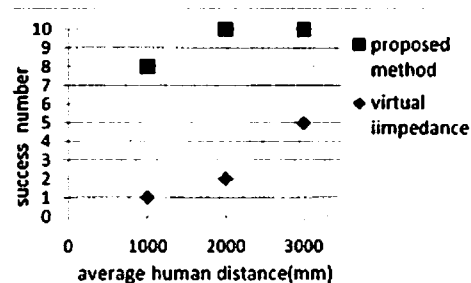


Fig.9 Success Number in Ten Times in Simulation

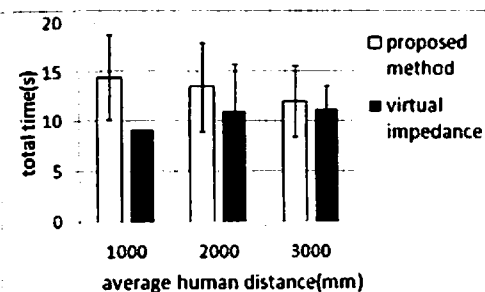


Fig.10 Total Times Spent on Moving in Success Cases in Simulation

こるので、その改善案として現在信頼性が確かではないとして考慮に入れていない隣よりも奥のレーンを取り扱う方法が考えられ、信頼性の低いレーンを確率的に考慮に入れる手法が考えられる。

### 5. 結論と今後の展望

本稿では人ごみが自己組織的にレーンを形成することを利用して、レーンに沿って進みながらレーン間を乗り継ぐことにより、通常手法よりも確実に人ごみの中を移動できるアルゴリズムを提案した。また、シミュレーション上で単純な障害物回避手法と比較を行い、安全性の点で優れていることを確認した。

今後の展望はレーンのモデル化をより複雑にすることが考えられる。レーンが時間により変動する状況やレーンが曲線として形成される状況への拡張などが考えられる。また、実機を用いての検証や、実測した人ごみのデータを用いての検証が必要である。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省技術戦略マップ 2009 ロボット分野, <http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/sys1.pdf>, 2009
- [2] 岡田慧, 青山拓磨, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允: 三次元フローを用いた人込みにおけるロボットの障害物回避, 第5回ロボティクスシンポジウム予稿集ロボティクスシンポジウム予稿集, Vol.5, pp.214-219, 2000.
- [3] 李想侯, Tongpravit Noppharit, 長谷川修: 人の多い複雑な環境下での 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.
- [4] D. Helbing, P. Molnar, I. J. Farkas, K. Bolay: Self-organizing pedestrian movement, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.28, pp.361-383, 2001.
- [5] 新井民夫, 太田順: 仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.7, pp.1039-1045, 1993.

23<sup>rd</sup> SICE Symposium on Decentralized Autonomous Systems  
January 29-30, 2011, Hokkaido

# 第 23 回自律分散システム・シンポジウム

## 資 料

期 日：2011年 1月29日(土), 30日(日)

会 場：北海道大学中央キャンパス総合研究棟1号館

The logo for SICE (The Society of Instrument and Control Engineers) is displayed in a bold, black, sans-serif font. The letters 'S', 'I', and 'C' are connected, and the 'E' is separate. A small registered trademark symbol (®) is located at the bottom right of the 'E'.

企 画：自 律 分 散 シ ス テ ム 部 会  
主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 システム・情報部門  
The Society of Instrument and Control Engineers

協 賛：システム制御情報学会、電子情報通信学会、電気学会、情報処理学会、  
人工知能学会、日本ロボット学会、日本機械学会、精密工学会、  
日本神経回路学会、日本生体医工学会、応用物理学会、  
日本生物物理学会、化学工学会、Japan Chapter of IEEE Control Systems  
Society、Japan Chapter of IEEE Systems, Man, and Cybernetics、  
日本比較生理生化学会、ニューロエソロジー談話会

カタログ番号 11 SY 0002