

人追従を利用した移動ロボットのナビゲーション

東京大学 ○山口 祐樹, 田村 雄介, 寺田 善貴, 熊原 渉, 山下 淳, 浅間 一

Navigation of Mobile Robot Following Pedestrians

The University of Tokyo Yuki Yamaguchi, Yusuke Tamura, Yoshitaka Terada, Wataru Kumahara, Atsushi Yamashita, Hajime Asama

When a robot works in a crowded environment with pedestrians, it is difficult that a robot moves smoothly to a destination. To solve this problem, we propose a method that a robot follows a pedestrian who conforms to some conditions and the robot changes the pedestrian at any time. A following algorithm when a robot moves is proposed and some conditions when a robot follows a pedestrian are established. Next, we propose a method that a robot avoids a collision with pedestrians and controls its velocity. A computer simulation to validate superiority of this method is experimented. Finally, it is shown that a robot can reach a destination safely and efficiently in a crowded environment by following some pedestrians.

1. 序論

近年, 少子高齢化による社会環境の変化や, 生活レベルの向上への関心の高まりによって, 人と共存するサービスロボットの需要が高まってきている. また, ロボットが自律的に移動することは人と共存していく上で重要な要素である. その時周囲の歩行者や, 障害物との衝突を回避しなければならない. ロボットには安全かつ効率的な移動が求められるが, 歩行者が多数存在する環境で歩行者を回避しながら移動するのは簡単なことではない. 歩行者が複数存在する環境の中で自律的に移動するロボットの研究は多く行われているが, 人数が数人であったり[1], 限られた環境でしか利用できなかったり[2], 効率的でない[3]ことが多い.

人間が混雑状況で移動する場合, 向かいから歩いてくる人の流れの中を歩こうとすると衝突の危険性が上がり, 回避行動を多くしなければならない. そこで人間は, 混雑した状況では他の歩行者と衝突するのを避けるために同じ方向に歩いて歩行者の後ろを歩くことが多い. この行動は衝突を避け, かつ効率的に移動するために行っている. 本研究の提案手法はこの人間の行動を参考にした.

そこで, 歩行者で混雑した環境下で, ロボットが条件を満たす歩行者を追従しながら移動し, 他の歩行者との衝突を避け, 効率的に移動することを本研究の目的とする.

2. 移動ロボットの歩行者追従手法

2.1 追従アルゴリズム

ロボットはある地点から座標のわかっている目的地まで移動する. ロボットは Fig. 1 の追従アルゴリズムに従って移動する. アルゴリズムの概要を以下で説明する.

0. ロボットは最初決められたスタート地点にいる. 1に進む.
1. 追従せずに目的地方向に低速で動き出す. 2に進む.
2. そこが目的地付近であるかどうかを判別する. そうであれば3に, そうでなければ4に進む.
3. 目的地まで追従なしで移動する. 8に進む.
4. 混雑な環境かつ追従条件を満たす歩行者が存在するかどうかを判別する. 条件を満たせば5に進む. 満たさなければ1に戻る.
5. 追従条件を満たす歩行者が複数存在するかどうかを判別する. 複数存在すれば6に進む. 1人だけであれば7に進む.
6. 追従条件を満たす歩行者のうちロボットに近い歩行者を選択する. 7に進む.
7. 条件を満たす歩行者に追従する. 2に戻る.
8. 目的地到達.

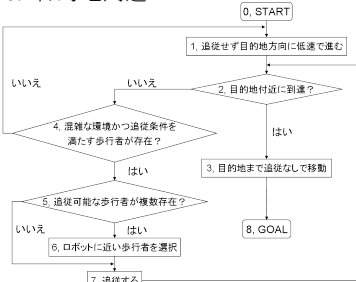


Fig. 1: 追従アルゴリズム

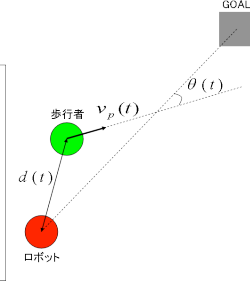


Fig. 2: 追従条件

2.2 追従条件

2.1節で述べた追従条件について述べる. Fig. 2はロボット, 歩行者, 目的地の関係を表した図である. ここで使用するパラメータの定義を下に表す.

- $d(t)$: 時刻 t におけるロボットと歩行者の距離
 - $\theta(t)$: 時刻 t における歩行者の速度ベクトルとロボットの目的地方向のベクトルとの角度
 - $v_p(t)$: 時刻 t における歩行者の速さ
 - d_1 : 追従時に一定に保つ距離
 - d_2 : 追従し始める最大距離
 - θ_1 : 追従する最大角度
 - v_1 : 追従する最大速さ
 - v_2 : 追従する最小速さ
- 追従条件には3つの条件を設定する.

1. ロボットと歩行者の距離, 2. ロボットの目的地方向と歩行者の進行方向との角度, 3. 歩行者の歩く速さ, この3条件がそれぞれ閾値の範囲であれば追従条件を満たすとした. これを式(1), 式(2)に表す.

$$d(t) \leq d_1 \text{ かつ } \theta(t) \leq \theta_1 \text{ かつ } v_1 \leq v_p(t) \leq v_2 \quad (1)$$

式(1)を満たせば歩行者と d_1 の距離を保って追従する.

$$d_1 < d(t) < d_2 \text{ かつ } \theta(t) \leq \theta_1 \text{ かつ } v_1 \leq v_p(t) \leq v_2 \quad (2)$$

式(2)を満たせば歩行者との距離を d_1 まで詰めるように追従する.

式(1), 式(2)どちらも満たさない場合, ロボットは歩行者に追従せずに移動する.

3. 移動ロボットの制御

3.1 衝突判定法

ロボットの制御では障害物との衝突回避は必ず必要である. そのためまずは障害物と衝突するか否かを判断する必要がある. 衝突判定の手法として[1]を参考にした. ここではパーソナルスペースという概念を導入する. パーソナルスペースとは人が他人の侵入を許さない排他的空間のことである. 人は歩行中パーソナルスペースを確保しているとされている. また判定を行いやすくするためにロボット, 歩行者の占有領域を円と仮定した.

衝突判定に用いるパラメータの定義を次に表す.

- $r_r(t)$: 時刻 t におけるロボットの位置ベクトル
- $r_p(t)$: 時刻 t における歩行者の位置ベクトル
- $v_r(t)$: 時刻 t におけるロボットの速度ベクトル
- $v_p(t)$: 時刻 t における歩行者の速度ベクトル
- R_r : ロボットの半径
- R_p : 歩行者の半径
- E_p : 歩行者のパーソナルスペース分の他者排他距離
- R : 衝突領域円の半径

Fig. 3の上の図は絶対座標, 下の図は相対座標での歩行者とロボットの関係を表している. 相対座標で考える時歩行者を原点とし, ロボットを点として扱う. まず障害物周囲の衝突領域を計算する. 式(3)に示すように衝突領域円の半径は歩行者, ロボットの半径, パーソナルスペース分の他者排他距離を足したものとなる.

$$R = R_p + E_p + R_r \quad (3)$$

この衝突領域円と, 相対速度ベクトルを延長した半直線が交わるか否かで衝突判定を行う.

この判定条件式は式(4)のようになる.

$$\frac{(\mathbf{r}_r(t) - \mathbf{r}_p(t)) \cdot (\mathbf{v}_r(t) - \mathbf{v}_p(t))}{\|\mathbf{v}_r(t) - \mathbf{v}_p(t)\|} > \sqrt{\|\mathbf{r}_r(t) - \mathbf{r}_p(t)\|^2 - R^2} \quad (4)$$

式(4)を満たせばロボットと歩行者はこのまま直進した場合衝突するという判定が行われる。

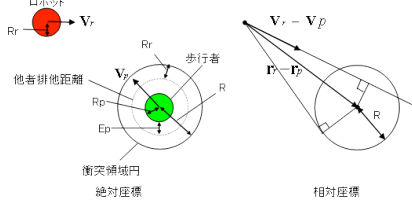


Fig. 3: 衝突判定手法

3.2 衝突回避手法

衝突回避の制御手法には social force model[4]を利用する。social force model は一般的には人の歩行モデルを表すのに用いるが、本手法ではロボットの衝突回避行動に適用する。これはロボットも周囲の歩行者と同様の動きをすることで環境に適応することができると考えたからである。衝突判定が行われた時ロボットにかかる力を表すパラメータを下で定義する。

- $\mathbf{F}(t)$: 時刻 t におけるロボットにかかる力
- τ_r : ロボットの目的地からの引力定数
- v_r^0 : ロボットの理想速さ
- $\mathbf{e}_r(t)$: 時刻 t におけるロボットの単位理想速度ベクトル
- N : ロボットが力を受ける歩行者の人数
- $\mathbf{r}_{rp_i}(t)$: 時刻 t におけるロボットから見た力を受ける i 番目の歩行者の相対位置ベクトル

- $\omega(\mathbf{v}_r(t), \mathbf{r}_{rp_i}(t))$: 時刻 t におけるロボットの視野を考慮した重み付け変数
- U_r^1, U_r^2 : ロボットの緩衝定数
- $d_{rp_i}^r(t)$: 時刻 t におけるロボットと力を受ける i 番目の歩行者との距離

式(5)に受ける力を表した式を示す。

$$\mathbf{F}(t) = \frac{1}{\tau_r} (v_r^0 \cdot \mathbf{e}_r(t) - \mathbf{v}_r(t)) + \sum_{i=1}^N (\omega(\mathbf{v}_r(t), \mathbf{r}_{rp_i}(t)) \cdot \mathbf{r}_{rp_i}(t) \cdot U_r^1 \cdot e^{-\frac{d_{rp_i}^r(t)}{U_r^2}}) \quad (5)$$

視野を考慮に入れた重み付け変数 $\omega(\mathbf{v}_r(t), \mathbf{r}_{rp_i}(t))$ は以下のようなになる。

a) ロボットが歩行者に追従していない場合

$$\omega(\mathbf{v}_r(t), \mathbf{r}_{rp_i}(t)) = \begin{cases} 1 & \mathbf{v}_r(t) \cdot \mathbf{r}_{rp_i}(t) \geq \|\mathbf{r}_{rp_i}(t)\| \cdot \cos \varphi_1 \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (6)$$

b) ロボットが歩行者に追従している場合

$$\omega(\mathbf{v}_r(t), \mathbf{r}_{rp_i}(t)) = \begin{cases} 0 & \text{条件(*)の時} \\ \cos \varphi_2 - \frac{\mathbf{v}_r(t) \cdot \mathbf{r}_{rp_i}(t)}{\|\mathbf{r}_{rp_i}(t)\|} & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (7)$$

条件(*)は以下である。

$$\mathbf{v}_r(t) \cdot \mathbf{r}_{rp_i}(t) \geq \|\mathbf{r}_{rp_i}(t)\| \cdot \cos \varphi_2 \text{ 又は } \mathbf{v}_r(t) \cdot \mathbf{r}_{rp_i}(t) \leq \|\mathbf{r}_{rp_i}(t)\| \cdot \cos \varphi_1$$

3.3 速度制御

ロボットは周囲から得た情報を元に一定間隔ごとに速度制御を行っている。以下で使う変数の定義について述べる。

- v_r^1 : ロボットが非追従時に低速で移動する際の速さ
 - v_r^2 : ロボットが追従時に追従する歩行者と距離がある場合に一定距離まで追いつく時の速さ
 - k : ロボットが歩行者と一定距離を保って追従する時の変数
1. 歩行者との衝突回避の必要がなく、追従していない場合
$$\mathbf{v}_r(t+1) = \mathbf{v}_r(t) \quad (\|\mathbf{v}_r(t)\| = v_r^1) \quad (8)$$
 2. 歩行者との衝突回避の必要がなく、 $d_1 < d(t) < d_2$ で歩行者に追従している場合

$$\mathbf{v}_r(t+1) = v_r^2 \cdot \frac{\mathbf{r}_{rp}(t)}{\|\mathbf{r}_{rp}(t)\|} \quad (9)$$

3. 歩行者との衝突回避の必要がなく、 $d_1 \leq d(t)$ で歩行者に追従している場合

$$\mathbf{v}_r(t+1) = k(\mathbf{r}_{rp}(t)) \quad (10)$$

この時

$$k = 1 + \frac{(\mathbf{r}_{rp}(t) \cdot \mathbf{v}_p(t) \cdot \Delta t - \sqrt{d_1^4 - \|\mathbf{v}_p(t) \cdot \Delta t\|^2 d_1^2 + ((\mathbf{r}_{rp}(t) \cdot \mathbf{v}_p(t) \cdot \Delta t)^2)}{d_1^2} \quad (11)$$

4. 歩行者との衝突回避をしなければならない場合

$$\mathbf{v}_r(t+1) = \mathbf{v}_r(t) + \mathbf{F}(t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

4. シミュレーション実験

4.1 実験設定

前章までで提案した手法を用いてシミュレーション実験を行った。Fig. 4 のように 20m 四方の開放空間を想定し、スタートは Fig. 4 の左下、ゴールは右上とする (直線距離約 28m)。歩行者は 40 人 (密度 0.1 人/m²)、平均速度は 1m/s、衝突回避行動以外は直進運動をする。

ロボットの各パラメータ

$$d_1 = 0.9\text{m}, d_2 = 4\text{m}, \theta_1 = 30^\circ$$

$$v_1 = 0.5\text{m/s}, v_2 = 1.5\text{m/s}$$

$$R_r = 0.25\text{m}, R_p = 0.25\text{m}$$

$$E_p = 0.3\text{m}$$

$$\tau_r = 0.1, v_r^0 = 0.6\text{m/s}$$

$$U_r^1 = 2, U_r^2 = 0.4$$

$$\varphi_1 = 270^\circ, \varphi_2 = 90^\circ$$

$$v_r^1 = 0.6\text{m/s}, v_r^2 = 1.2\text{m/s}$$

$$\Delta t = 0.05\text{s}$$

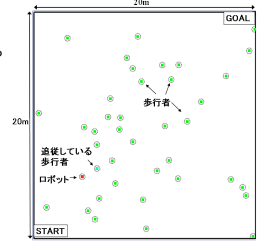


Fig. 4: シミュレーション画像

シミュレーションは追従を行って移動する場合、追従せず 0.6m/s で移動する場合、1.0m/s で移動する場合の 3 パターンをそれぞれ 100 回行った。

4.2 実験結果

結果は Fig. 5 のようになった。追従して移動した場合が追従なしの場合よりも到達時間が早かった。また衝突回数も追従して移動した場合がもっとも少なかった。追従しない場合は、速度が上がると衝突回数も増えた。

シミュレーション実験からロボットは歩行者に追従しながら移動したほうが追従せずに移動した場合に比べて安全かつ効率的であることが言える。

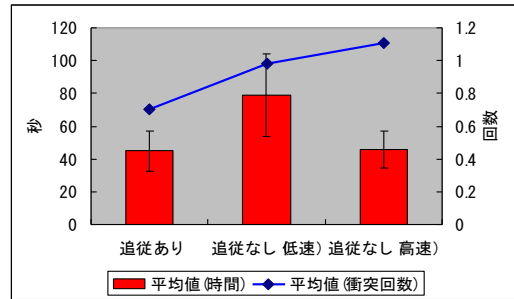


Fig. 5: 平均到達時間と平均衝突回数の比較

5. 結論と今後の展望

本研究では歩行者で混雑した環境下で、ロボットが条件を満たす歩行者を追従しながら移動し、他の歩行者との衝突を避け、効率的に移動するロボットの実現を目指した。提案手法と実験によって追従を行いながら移動することの優位性を示した。

今後の展望としてはより混雑した状況での適用、衝突回避の際の制御手法の改善が必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 細田 祐司, 山本 健次郎, 一野瀬 亮子, 柄川 索, 玉本 淳一, 坪内 孝司, 人間共生ロボットの衝突回避制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 775, pp. 1051-1061, 2011.
- [2] 園浦 隆史, 十倉 征司, 田崎 豪, 周辺環境に適応するロボパスタなロボット移動技術, 東芝レビュー, Vol. 64, No. 1, pp. 19-23, 2009.
- [3] 荒井 亮磨, 丁 明, 竹村 裕, 溝口 博, 構内環境で動的障害物への衝突回避が可能な自律移動ロボットの研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会'11, No. 11-5, 1P1-K15, 2011.
- [4] Dirk Helbing, Peter Molnar, Social force model for pedestrian dynamics, Phys. Rev. E 51, 4282-4286 1995.