

# 非線形感覚運動写像ロボットの対面流

## – 1 方向走行流への転移と流量のコース幅依存性 –

李 方正<sup>1</sup>, 橋爪 晋平<sup>2</sup>, 本田 泰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系専攻

<sup>2</sup> 室蘭工業大学 工学部 情報電子工学系学科

<sup>3</sup> 室蘭工業大学大学院 しゅくみ解明系領域

### 概要

昆虫の群れ行動や混雑した状況での人間の歩行など、自己駆動粒子の対面流 (Counter flow) は広く存在する現象である。そこでは、レーン形成など自己組織化的な興味深い現象が観察される。

本研究では、われわれは非線形関数 (双曲線関数) による感覚運動写像ロボットを開発し、障害物回避可能な自己駆動粒子とみなす。そのロボットを使って、擬楕円コースでいくつかのコース幅の対面走行実験を行った。対面流から 1 方向走行流への自律的な転移現象が観測された。

ロボットの速度、流量および 1 方向走行流になるまでの時間を測定した。

## Counter flow of robots based on non-linear sensorymotor mapping

### – Dependence on the course width of transition to one-direction flow and flow rate –

Li Fangzheng<sup>1</sup>, Shimpei Hashizume<sup>2</sup>, Yasushi Honda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Division of Information and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

<sup>2</sup> Department Information and Electronic Engineering, School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

<sup>3</sup> College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology, Japan

### Abstract

Counter flow of self-driving particles which include insect herd behavior and human walking in crowded situations is a widespread phenomenon.

In this study, we have developed sensorimotor-mapping robot which can avoid obstacles using nonlinear function (hyperbolic function) and we regard those robots as self-driving particle.

Then we have carried out experiments in which these robots start from a counter flow in some oval-course, and we found a transition phenomenon from counter flow to one-direction flow. We have measured the flow rate and the transition time to one-direction flow.

## 1 はじめに

実世界で、蜂、アリなどの昆虫が簡単な行動メカニズムによって、複雑な群れ行為ができる。また、大きな交差点などにおいて、人間は密度が高くて、会話なしで、ぶつからないようにスムーズに対面歩行ができる。

池田ら [1] は、非常に密度の高い自己駆動粒子の対面流において異方性を考慮することによってレーン形成が生成することを見出した。

本論文では、我々は原生物レベルの反応行動のための知能を持つ走行ロボットを開発した。コース幅が限られたコースにおける、その走行ロボットの対面走行を実験的に観察する。

今回、最大 8 台使われるロボットを時計回りと反時計回りの 2 つグループを分けて楕円コースでの対面走行を実験を行った。コース幅を変化させ、ロボットの振舞いを観察した。ロボットが、1 方向走行流になるまでの時間と流量などロボットの基本的な走行情報を測定した。

## 2 非線形感覚運動写像ロボット

### 2.1 ロボットの身体性

今回使っているのは 4 輪走行ロボットである、人間や昆虫の走行特徴に近似するため、その場で曲がり、方向転換が可能である。距離センサーが赤外線反射で距離を測るので、超音波より測る範囲が狭いが、体積が小さく、精度が高くて、複数ロボットの場合、ロボット同士間の妨害も減少できる。

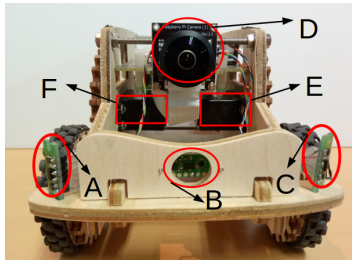


図 1: 正面図, A,B,C:右, 中央, 左の距離センサー; D:カメラ (今回使っていない); E,F:左右のモーター; 左右センサー角度:45°; ロボット幅:13.5cm; ロボット長さ:20.2cm; ロボット高さ:12.2cm;

### 2.2 ロボット駆動アルゴリズム

感覚運動写像とは、センサー値を変数とする関数によってモーターの出力を決定することであり、そ

の瞬間のセンサー値だけを使う、最も単純な反応行動のための知能の一つである [2]。本研究では、非線形感覚運動写像モデルが使われている。

### 2.3 距離データの加重相乗平均

中央のセンサーによる距離データを  $d_C$ 、また、左のセンサーによる距離データを  $d_L$  とする。それらを用いて、左の感覚運動写像の入力  $x_L$  を加重相乗平均によって求める (式 (1))。同じように、 $d_C$  と右のセンサーから得られた距離データ  $d_R$  を用いて右の感覚運動写像の入力  $x_R$  を求める (式 (2))。

$$x_L = d_C^\gamma \times d_L^{(1-\gamma)} \quad (1)$$

$$x_R = d_C^\gamma \times d_R^{(1-\gamma)} \quad (2)$$

$\gamma$  は重みであり、本研究においては  $\gamma = 0.33$  とする。 $\gamma = \frac{1}{3}$  とすることにより、左のセンサー、中央のセンサーおよび右のセンサーがそれぞれ、 $\frac{2}{3}$  の等加重となる。

### 2.4 非線形感覚運動写像

本研究においては、式 (1) と式 (2) で得られた  $x_L$  と  $x_R$  を式 (3) と式 (4) に代入して、ロボットの右モーターの出力 ( $m_R$ ) と左モーターの出力 ( $m_L$ ) を計算する。係数  $\alpha$  がロボットの最大速度を制御する、係数  $\beta$  が  $\tanh$  の傾きを制御する。係数  $b$  が関数の変曲点の位置である。係数  $c$  は関数の縦軸上の位置を制御する。

$$m_R = \alpha \tanh(\beta_1(x_L - b_L)) + \alpha \tanh(\beta_2(x_L - b_L)) + c \quad (3)$$

$$m_L = \alpha \tanh(\beta_1(x_R - b_R)) + \alpha \tanh(\beta_2(x_R - b_R)) + c \quad (4)$$

本研究の実験のパラメーターは  $\alpha = 30\%$  とする。すなわちロボットは最高速度の 60% の速度で走行する。また、 $\beta_1 = 0.004$ ,  $\beta_2 = 10$ ,  $c = 0$  とする。

8 台のロボット ( $N = 8$ ) を 4 台ずつ以下の 2 グループに分けて走行実験を行った。ロボットグループ 1 では  $b_L = 160\text{mm}$ ,  $b_R = 260\text{mm}$ 、また、ロボットグループ 2 では  $b_L = 260\text{mm}$ ,  $b_R = 160\text{mm}$  とする。

### 2.5 $b$ の値と右左折方向の関係

たとえば、 $b_R = 160\text{mm}$  (図 2 の A 点)、 $b_L = 260\text{mm}$  (図 2 の B 点) の場合 (ロボットグループ 2) を

考える．左右の距離データ  $d_L = d_R$  の場合,  $x_L = x_R$  である．図 2 から分かる通り, 右のモーター出力 ( $m_R$ ) が左のモーター出力 ( $m_L$ ) より小さくなる．したがって, このロボットグループ 2 は右に曲がりやすい傾向を持つ．

逆にロボットグループ 1 は左に曲がりやすい傾向を持つ．

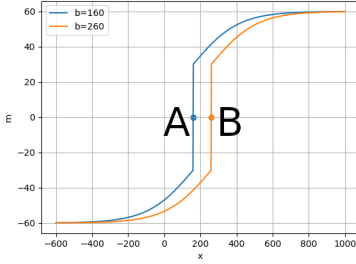


図 2:  $b = 160\text{mm}$  と  $b = 260\text{mm}$  の  $\tanh$  関数の曲線

### 3 走行実験

本研究では, 直線と円形のコース組み合わせ, 擬楕円コースで実験する．図 3 に示したコースの中の青い部分にロボットをランダムに配置する．半数のロボットが時計回り残りのロボットが反時計回りの向きで, 速度 0 からほぼ同時にスタートし, 約 8 分間走行する．

ロボットは距離センサーでコース内の障害物 (コースの壁と他のロボット) までの距離を検出し, 非線形感覚運動画像モデルにより走行する．

レーンのセンターライン (図 3 黒い線) でコースの長さ ( $L = 7.32\text{m}$ ) を規定する．ロボットの線密度は  $\rho = \frac{N}{L} = 1.09(\text{台}/\text{m})$  である．

内側と外側の両側の壁を移動させ, コースの幅 ( $w$ ) を  $43\text{cm}$ ,  $49.5\text{cm}$ ,  $56\text{cm}$ ,  $62.5\text{cm}$  および  $69\text{cm}$  へ変化させ, 実験する．

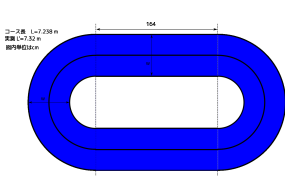


図 3: コースレイアウト

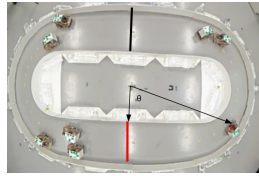


図 4: 実験の様子と  $\theta$  の説明

図 4 の赤い線を計測ラインとして, ロボットが左

から右へ線を通ったら通過台数を  $+1$ , 右から左へ線を通したら通過台数を  $-1$  とみなす．図 4 において, ロボットが赤い線から反時計回りで黒い線まで移動して,  $\theta$  が  $0$  から  $\pi$  に変わる．赤い線から時計回りで黒い線まで移動して,  $\theta$  が  $0$  から  $-\pi$  に変わる．

対面走行流における全通過台数を  $n_i$  とする．なお, 本研究では, 対面走行流の性質を調べるため, 1 方向走行流における通過台数は  $n_i$  に加算していない．

$T_{1d}$  は走行開始から 1 方向走行流状態になるまでの時間 (分),  $w$  がコースの幅 (単位:m) を表す．流量  $Q_i$  を式 (5) で定義し, その平均値を式 (6) で計算する．

$$Q_i = \frac{|n_i|}{wT_{1d}} \quad (5)$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{N_{\text{exp}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} Q_i \quad (6)$$

$i$  は実験回数を, また  $N_{\text{exp}}$  は全実験回数を表す．本研究では,  $w = 43\text{cm}$  の実験では  $N_{\text{exp}} = 4$ , それ以外のコース幅の実験においては,  $N_{\text{exp}} = 30$  である．

### 4 実験結果

#### 4.1 $T_{1d}$ の測定

図 5 の 8 個グラフは一回の実験での, 8 台ロボット毎の  $\theta$  (図 4 参照) と時間の測定結果である, ある 1 回の実験における, 8 台のロボット毎の走行結果を示している．横軸は時間 (秒), 縦軸は角度  $\theta(\text{rad})$  である．

$T_{1d}$  とは全てのロボットが方向転換せず, 同じ向きで走る (1 方向走行流) 状態になるまでの時間である, 図 5 中の黒い線はロボットが方向転換しなくなるまでの時間, その中で一番長いものを  $T_{1d}$  とする．

#### 4.2 幅による $T_{1d}$ と流量の測定

$w = 43\text{cm}$  のコース幅で 4 回 (毎回 8 分間),  $49.5\text{cm}$ ,  $56\text{cm}$ ,  $62.5\text{cm}$ ,  $69\text{cm}$  のコース幅で 30 回 (毎回 8 分間) 実験する．1 実験毎に, ランダムにロボットを 2 つグループを分ける． $T_{1d}(\text{分})$  と  $Q_i(\text{台}/(\text{m 分}))$  を計測して, 平均値と標準偏差を計算する．図 6 はコース幅 ( $w$ ) による,  $T_{1d}$  の平均値  $\bar{T}_{1d}$  の変化曲線である．図 7 がコース幅による, 平均流量 ( $\bar{Q}$ ) の変化曲線である．オレンジ色の縦線は標準偏差をエラーバーとして示した．

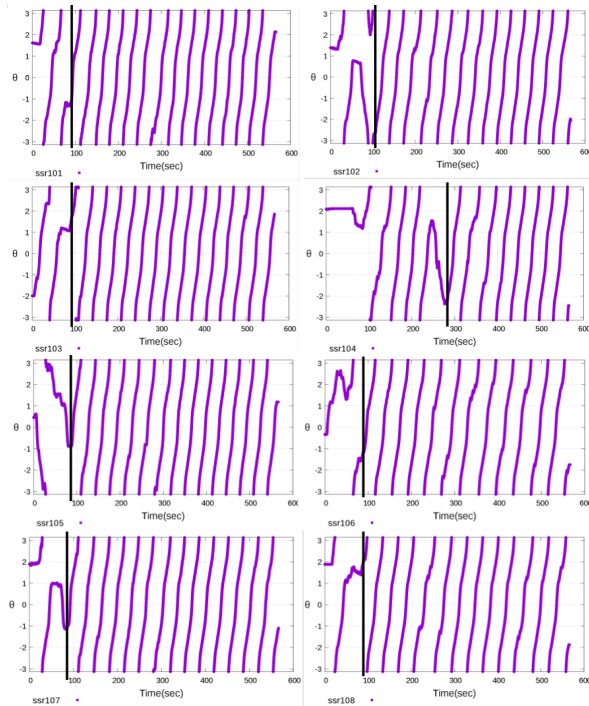


図 5: コース中心から見たロボットの角度  $\theta$  の時間変化

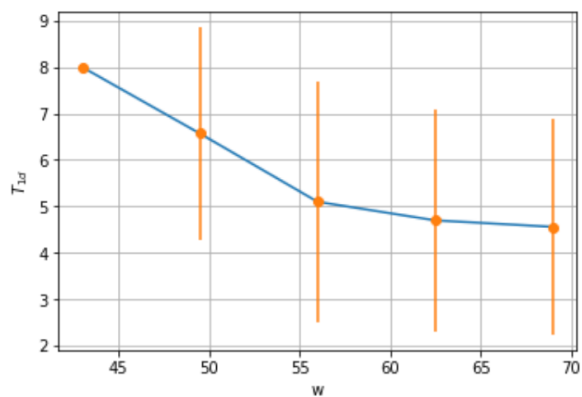


図 6: コース幅  $w$  と  $T_{1d}$  の関係

幅が狭すぎる ( $43cm$ ) と、長時間の渋滞が発生したことを観測した。ロボット同士のすれ違い、方向転換ができず、1 方向走行流の状態にならなかった。大渋滞なので、流量もほとんどない。

$49.5cm$  の場合、渋滞も発生したので、1 方向走行流になる時間 ( $T_{1d}$ ) も長かったが、ロボットが方向転換できたので、流量も多少増えた。 $56cm$  から渋滞の発生が急激に減少し、ロボットの方向転換もしやすくなり、 $T_{1d}$  が減少した。以降コース幅が拡大して、 $T_{1d}$  がだんだん減少した。

流量については、 $56cm$  まで平均流量が増えて、

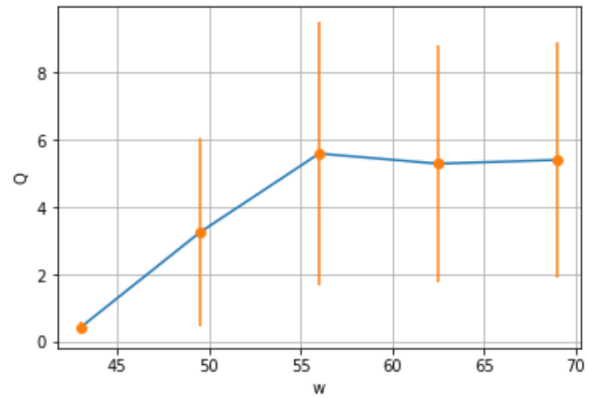


図 7:  $Q$  とコース幅の関係

$69cm$  まで流量に明らかな変化が見られなくなった。

## 5 まとめ

本研究で用いたロボットは最適速度ロボット [3] のような、他のロボットを追いかける機能はない。それにもかかわらず、単純な障害物回避アルゴリズムによって、対面走行流は最終的に 1 方向走行流に転移することがわかった。

その転移時間はコース幅が大きくなるにつれて減少していく傾向を見出した。

また、コース幅が十分に大きくなると流量も一定になる傾向があることを観測した。

実世界のアリ、蜂などの昆虫の匂いで作られたコースのような空間の中、単純な障害物を避ける行為で自動的にレーン形成したと類似の現象が観測されたと考えられる。

今後の実験で、ロボットの線密度を増やすことによって、より実世界の人間などの対面流行動と類似の行動が観測されると予測される。

## 参考文献

- [1] 池田光佑, 金鋼「対向する自己駆動粒子系におけるレーン形成とその動的な転移の解明」第 22 回交通流と自己駆動粒子シンポジウム論文集 (2016).
- [2] 浅田稔, 国吉康夫「ロボットインテリジンス」(2006).
- [3] 山田将司, 大園章宏, 本田泰「2 次元最適速度ロボットの多様な集団紐状走行」第 25 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集 (2019).