

# 走行ロボットの操縦データに基づく 2次元最適速度モデルのパラメータ推定

世良田 竜平<sup>1</sup>, 渡辺 創大<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

<sup>2</sup> 室蘭工業大学 理工学部 システム理化学科

<sup>3</sup> 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

## 概要

我々は以前、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台走行ロボットでのひも状走行に成功した [1]。本研究では、人間がロボットを操縦して前方車両への追従走行を行い、その走行データから2次元最適速度モデルのパラメータを推定した。結果として、走行において個性の影響を強く受けるパラメータが明らかとなった。特に感応度  $a$  は、比較的環境の影響を受けにくく、操縦者の性格を表すことが示された。

## Parameter Estimation for a 2D Optimal Velocity Model Based on Mobile Robot Control Data

Ryuuhei Serata<sup>1</sup>, Sota Watanabe<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 of Sciences and Informatics, Faculty of Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

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

## Abstract

We have previously successfully performed string running with multiple robots using the 2D optimal velocity turning algorithm. In this study, a human operator maneuvered a robot to follow a leading robot, and parameters for a 2D optimal velocity turning model were estimated from the resulting driving data. As a result, parameters that are strongly influenced by individual characteristics during driving were identified. In particular, sensitivity  $a$  was found to be relatively unaffected by environmental factors and to reflect the human operator's personality.

## 1 はじめに

人間の行動に必要な最小限の知能を発見するということが、我々の研究背景である。

先行研究 [1] では、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台ロボットでのひも状走行に成功していた。また、先行研究 [2] では、2次元最適速度モ

デルのパラメータを変化させることで、ロボットに4つの性格を付与し、それらの様々な組み合わせを用いて走行実験を試みた。その結果、異なる性格を混ぜた走行の中には、全てのロボットを同じ性格で統一した走行よりも、よりひも状走行になりやすい組み合わせが存在した。

しかし、これらの性格パラメータは様々な走行実

験でのロボットの振る舞いから経験的に決定したものであり、根拠に乏しかった。そのため、本研究では人間の操縦から走行データを取得し、そのデータを元にモデルのパラメータを推定する。

## 2 2次元最適速度旋回アルゴリズム

### 2.1 走行アルゴリズムの説明

2次元最適速度モデルは以下の運動方程式(1)で表される。最適速度 $\vec{V}$ と速度 $\vec{v}$ の差によって、速度の変化率(加速度) $\dot{\vec{v}}$ を求めるモデルである。

$$\dot{\vec{v}} = a(\vec{V} - \vec{v}) \quad (1)$$

ここで $a$ は感応度を表しており、 $a$ は最適速度への反応の強さを決めるパラメータになっている。ロボット自身の進行方向と、自分以外のロボットとの相対角度を $\theta$ とすると、最適速度ベクトル $\vec{V}$ は、以下のように表される。

$$\vec{V} = V \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

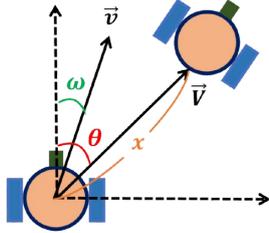


図 1: 進行方向と相対角度のイメージ図

最適速度ベクトルの大きさ $V$ は、ロボット間の距離 $x$ を用いて、以下のように表される。

$$V = \alpha(\tanh \beta(x - b) + c) \cos \theta \quad (3)$$

ここで、パラメータ $\alpha, \beta, b, c$ について説明する。 $\alpha$ は、最適速度関数の変化範囲を決めるパラメータ。 $\beta$ は、最適速度関数の滑らかさを決めるパラメータ。 $b$ は、ロボット間の安全距離を決めるパラメータ。 $c$ は、ロボット間の相互作用タイプを決めるパラメータである。

また、走行ロボットがこの関数を使用するためには、正規化が必要である。そのため実際は(式3)の $\alpha(\tanh \beta(x - b) + c)$ を $\alpha(1 + c)$ で割った $V$ を使用している。

速度ベクトル $\vec{v}$ は

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \sin \omega \\ v \cos \omega \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表される。また、 $v \neq 0$ のとき、

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} V \cos(\theta - \omega) - v \\ (V/v) \sin(\theta - \omega) \end{pmatrix} \quad (5)$$

のようになり、これは $v$ と $\omega$ を用いたOVモデルである。

$v \sim V, \omega \sim \omega$ のとき、左右のモーター出力 $v_L, v_R$ を求めるアルゴリズムをまとめると、最適速度関数(式3)と、式(6-9)より $v_L, v_R$ を更新する。

$$v' = v + a(V - v)\Delta t \quad (6)$$

$$\omega' = \omega + a(\theta - \omega)\Delta t \quad (7)$$

$$v_L = (v' + rg\omega')\text{MaxSpeed} \quad (8)$$

$$v_R = (v' - rg\omega')\text{MaxSpeed} \quad (9)$$

$r$ はロボットの有効半径、また $g$ はホイールのスリップを考慮したゲイン、MaxSpeedは走行ロボットの最大速度で0から100%の値をとる。

### 2.2 モーター値, 相対角度, 車間距離からパラメータを求める手法

本研究では走行において2.1節のアルゴリズムを用いず、人間がロボットを直接操縦する。その操縦結果であるモーター値 $v_L, v_R$ と相対角度 $\theta$ 、車間距離 $x$ から感応度 $a$ と最適速度ベクトルの大きさ $V$ を求める方法を以下に示す。まず $v'$ と $\omega'$ を求める式は

$$v' = (v_L + v_R)/2 \quad (10)$$

$$\omega' = (v_L - v_R)/(2rg) \quad (11)$$

のようになる、そして $v$ と $\omega$ は $\Delta t$ 秒前の $v_L, v_R$ から同様に求められるので

$$a = (\omega' - \omega)/(\Delta t(\theta - \omega)) \quad (12)$$

$$V = (v' - v)/(a\Delta t) + v \quad (13)$$

となり、 $a$ と $V$ が求められる。

## 3 走行実験

車体の正面にカメラを1つ、車体の左右にモーターを2つ搭載したスキッドステアリング走行ロボットを用意し、半径2[m]の円形コース(図2)上で走行実験を行った。

コース内に2台の走行ロボットを配置し、10分の間1台は自由に走行、もう1台はその後方を追従するように人間が操縦した。追従ロボットは0.1秒ご

とに、前方ロボットとの相対角度 とロボット間距離  $x$  と左右モータ出力値  $v_L, v_R$  を取得した。実験終了後、収集したデータから感応度  $a$  および最適速度ベクトルの大きさ  $V$  を算出した。

その後、同じ距離のデータについては中央値を代表値として用いたうえで、最小二乗法によるフィッティングを行い、最適速度モデルのパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $b$ ,  $c$  を推定した。他にも、 $\Delta t$  を 0.1~10 まで 0.1 刻みで変化させた際の、 $a$  の中央値の変化を確認した。なお、フィッティングの初期値には、従来研究 [2] における同調性性格のパラメータ  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 16$ ,  $b = 0.3$ ,  $c = 0.9$  を用いた。

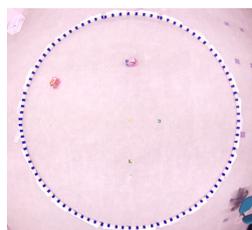


図 2: 半径 2m の実験コース



図 3: 追従ロボットの収集画像

## 4 実験結果

8名の操縦データを収集し、解析した結果、パラメータの差異が認められた。以下に結果を示す。

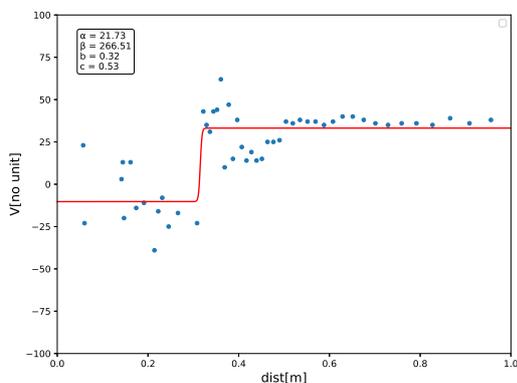


図 4: 操縦者 A の最適速度と車間距離の関係及びフィッティング結果 ( $\Delta t=0.5$ )

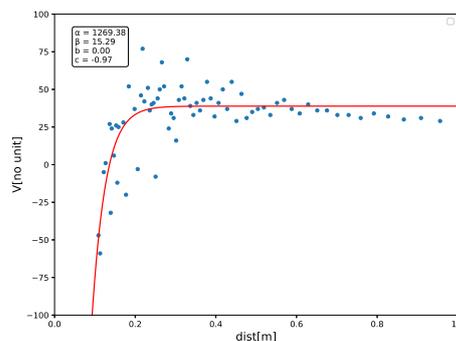


図 5: 操縦者 C の最適速度と車間距離の関係及びフィッティング結果 ( $\Delta t=0.5$ )

表 1:  $V$  をフィッティングして求めた、各操縦者における最適速度モデルのパラメータ ( $\Delta t=0.5$ )

	$\alpha$	$\beta$	$b$	$c$
操縦者 A	21.73	266.51	0.32	0.53
操縦者 B	12.85	8.55	0.49	1.96
操縦者 C	1269.38	15.29	0.00	-0.97
操縦者 D	16.17	3.09	0.40	1.69
操縦者 E	7.03	154.26	0.23	5.44
操縦者 F	16.91	793.40	0.41	0.99
操縦者 G	5.59	20.76	0.48	4.79
操縦者 H	379.35	4.48	0.00	-0.90

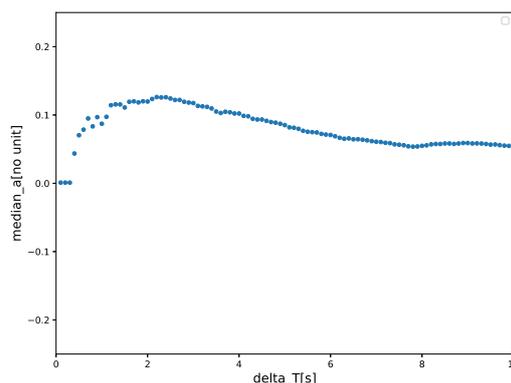


図 6: 操縦者 A における  $\Delta t$  の変化に対する感応度  $a$  の中央値

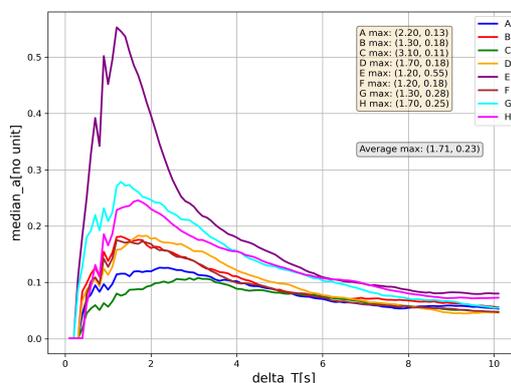


図 7:  $\Delta t$  の変化による各操縦者の感応度  $a$  の中央値

表 1 より、8 名の操縦データにおいて差が特に大きいパラメータは  $\alpha$  と  $\beta$  であることが示された。したがって、これらのパラメータは操縦者の個性を表していると考えられる。操縦者 C および操縦者 H では、 $\alpha$  が極端に大きく、 $b$  が 0 であると推定された。この結果は、これら 2 名の走行が最適速度モデルでは適切にフィッティングできない特性を有していたことを示している。

さらに図 7 に関して、8 人の操縦者の感応度  $a$  は  $\Delta t$  に依存しているが、感応度  $a$  が最大となる  $\Delta t$  や、感応度  $a$  の最大値は操縦者ごとに異なっている。以上より  $a$  の値も操縦者の個性を表していることが示された。例えば実際の走行において、操縦者 E は車体を大きく左右に振る不安定な追従走行を行っていたのに対し、操縦者 C はほとんど左右に振らない安定した追従走行であった。その追従走行の安定性の差が、図 7 に反映されていると考えられる。

ここで、本論文の手法の環境変化に対する耐性を調べるため、追加実験として操縦者 A・B・E を対象に、摩擦力の大きいカーペット状の床で同様の走行実験を行った。以下に結果を示す。

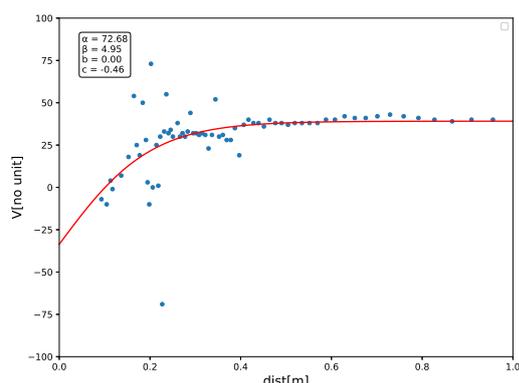


図 8: 摩擦力の高い床における操縦者 A の最適速度と車間距離の関係及びフィッティング結果 ( $\Delta t=0.5$ )

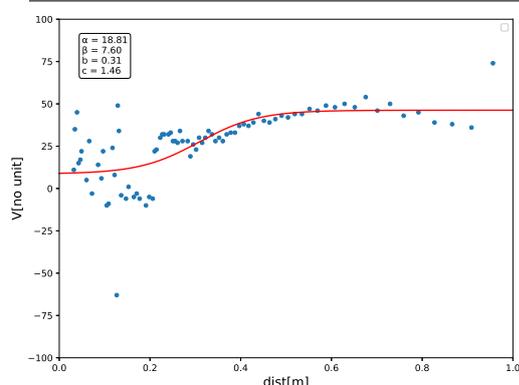


図 9: 摩擦力の高い床における操縦者 B の最適速度と車間距離の関係及びフィッティング結果 ( $\Delta t=0.5$ )

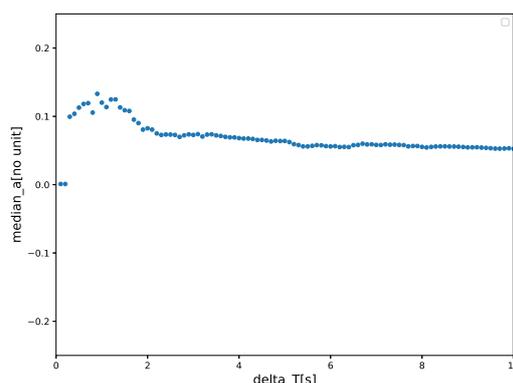


図 10: 摩擦力の高い床における操縦者 A の  $\Delta t$  変化に対する感応度  $a$  の中央値

図 4 と図 8 を比較すると分かるように、床の変更によって  $\alpha$  と  $\beta$  のパラメータが大きく変化し、フィッティング曲線も大きく変形した。また図 6 と図 10 を比較すると、感応度  $a$  の中央値も変化していることが分かるが、最適速度ほどの変化ではなかった。

以上より、感応度  $a$  は  $\alpha$  及び  $\beta$  と比較して環境変化に対する耐性が高く、操縦者の性格がより顕著に現れることが明らかとなった。

## 5 まとめと今後の課題

本研究では、人間の操縦データから 2 次元最適速度モデルのパラメータを推定することで、個性の影響を受けやすいパラメータが  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a$  であることを特定した。また感応度  $a$  は、比較的環境の影響を受けにくく、特に操縦者の性格を表すことを明らかにした。今後、自律走行においてパラメータにより性格の違いを表現する場合には、主に  $\alpha$  と  $\beta$  と  $a$  を変更することで調整したい。

## 参考文献

- [1] 山田将司, 李方正, 本田泰, 最適速度アルゴリズムによるスキッドステアリング 2D ロボットのみも状走行, 第 27 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p47-p50, (2021)
- [2] 世良田竜平, 北原颯一郎, 本田泰, 最適速度巡回アルゴリズムによるヘテロ群ロボットが創発する行動, 第 30 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p13-p16, (2024)