



## 経路生成形レギュレータによる必要に応じ経路を修整可能な観測データ収集車両の誘導制御

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本機械学会 公開日: 2019-12-18 キーワード (Ja): キーワード (En): Car-like robot, Environment survey, Mobile robot, Navigation, Path-generating regulator, Prediction model 作成者: 大谷, 充人, 花島, 直彦, 吉田, 英樹 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00010095">http://hdl.handle.net/10258/00010095</a>

# 経路生成形レギュレータによる必要に応じ経路を修整可能な 観測データ収集車両の誘導制御

大谷 充人<sup>\*1</sup>, 花島 直彦<sup>\*2</sup>, 吉田 英樹<sup>\*3</sup>

## Path-generating regulator for a car-like robot navigation considering necessity of observation

Shuto OTANI<sup>\*1</sup>, Naohiko HANAJIMA<sup>\*2</sup> and Hideki YOSHIDA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Division of Production System Engineering, Muroran Institute of Technology  
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido 050-8585, Japan

<sup>\*2</sup> College of Design and Manufacturing Technology, Muroran Institute of Technology  
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido 050-8585, Japan

<sup>\*3</sup> College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology  
27-1 Mizumoto-cho, Muroran-shi, Hokkaido 050-8585, Japan

Received: 19 July 2016; Revised: 19 March 2017; Accepted: 17 May 2017

### Abstract

In this study, we discuss a problem to collect observation data with one mobile robot in extensive investigation field. When the measurement of observation data is carried out by the mobile robot, the setting of running-path and navigation are important for appropriate measurement. Usually reciprocating straight paths at even interval are employed to collect data with spatially uniform density. However it is possible that some area between the straight paths requires detailed measurement. The method proposed in this paper makes it possible that in ordinary situation the robot follows the straight path, in the proximity of the area with need of observation it leaves the straight path toward the area, after that returns to the preceding straight path. Recently the path-generating regulator (PGR) has been applied to a tracking problem along a straight passage for car-like robots. The PGR is a control method for a vehicle so as to orient its heading toward a tangent to one of the curves belonging to a family of path functions. In this paper, we append a property to the PGR tracking the straight passage to modify the target heading angle in accordance with necessity of observation and to realize the motion toward the area with need of observation. To confirm the efficiency of the proposed method, two types of simulations are performed. The first simulation shows how a level of necessity of observation and a range to the area changes the locus of the mobile robot. In the second simulation, the mobile robot is satisfactorily guided by the level of necessity of observation obtained from actual measured data in a survey site.

**Key words** : Car-like robot, Environment survey, Mobile robot, Navigation, Path-generating regulator, Prediction model

## 1. 緒 言

近年、様々な場所が環境調査の対象となっている (Hayes et al., 2002)(Marques et al., 2005) . リモートセンシングが普及している現在でも、観測地によっては人手で行われる場合もあり、一般に調査地は広大な不整地であることから調査に多大な労力や時間を要する。また、調査環境によっては人体に有害なガスの発生 (大迫, 金, 2000) やケガなど調査者の健康被害が懸念される場合もある。本研究で想定する調査地である廃棄物最終処分場は焼却処理さ

れた廃棄物が地中に埋め立てられる図 1 に示すような不整地である．埋立層内の廃棄物は分解される過程で硫黄やメタンなどの人体へ有害なガスを生成することもある．環境調査として環境内のガスの成分分析や地中の温度計測などのために，広大な土地を人間が歩き回らなければならない．また，定期的に同じ場所のデータを蓄積するニーズもある．これらの問題を解決するために，人間に代わり自動で環境調査を行うロボットの開発が望まれる．



Fig. 1 An example of survey field. The terrain is uneven and covered with plants.

本研究では，広大な調査地を 1 台の移動ロボットが走行しながら観測値を収集する問題を取り扱う．移動ロボットは定期的に調査地を巡回し観測データを蓄積するものとする．環境調査の観測地点は移動ロボットの走行経路上に配置されるため，移動ロボットの走行経路の設定とその誘導が重要になる．安全な走行のために速度制限が設けられ，移動ロボットが一日に移動可能な距離に限られる場合，広大な面積の調査を行うには，基本となる定期的な計測は低分解能かつ広域に行い，詳細なデータが必要な場合に高精度・高分解能な計測を行うのが現実的であろう．そこで，広域な領域を均一な密度で走行する場合は等間隔往復直進経路を採用し，詳細な計測が必要な領域にさしかかったら，直進経路から一時離脱して寄り道走行し，その後，元の直進経路に戻るような走行経路が生成できれば実用上有用であると考えられる．本論文では，経路生成レギュレータ (以下，PGR) を用いて，このような経路に移動ロボットを自動的に誘導する制御手法を提案する．その際，過去の観測データから構築された予測モデルなどがある場合，予測値と直近の観測データとの乖離の度合いから観測の必要性を調べ，これを考慮して誘導が実現できるように制御則を構成する．

移動ロボットの目的地への誘導に関する研究は古くから多くされている．障害物回避を行いながら目的地に車両を誘導する方法としてポテンシャル法がよく知られている．例えば，ポテンシャル法による目的地に引力場を設置して誘導する方法 (Rimon and Kodirshchek, 1992) や，斥力場を発生する仮想障害物の設置による車両の誘導 (植野, 2015)，ラプラス微分方程式の解から空間上にポテンシャル場を設置する方法 (Connolly et al., 1990) などが挙げられる．これらの手法は目的地への誘導を目的としており，ここで扱う経路への追従には直接適用することは難しい．一方，走行すべき経路をあらかじめ設定し，その経路に車両を追従させる手法もある．例えば，イメージセンサを使って道路を判別し，ビジュアルサーボにより追従する手法 (Wallace et al., 1985)，厳密な線形化 (De Luca et al., 1998) やリアプノフ関数を用いた安定化 (Kanayama and Fahroo, 1997)，全状態トラッキング (Wang and Xu, 2003) などの非線形フィードバック制御を用いる手法などが提案されている．多くの手法は車両の位置や姿勢を予め設定した経路上のある点に収束させることを規範としているが，PGR は目的地あるいは目標経路に収束する経路関数群を設定し，その接線方向に車両の姿勢角を追従させることを規範としている．この目標となる車両姿勢角は走行座標系上のすべての点において定められることから，PGR は前述のポテンシャル法に類似している側面もある．同じような手法として Huang らの操舵角ポテンシャル法 (Huang, 2006) などがある．PGR は独立二輪駆動型車両を対象に開発された後 (高島他, 2004)，四輪車両への拡張が行われた (樽海他, 2013)．また，通路環境の走行を目指して直線経路 (Yang et al., 2013)(Hanajima et al., 2014) や円弧経路 (羅他, 2015) への追従や，障害物回避を考慮した方法 (大竹他, 2016) も提案されている．

ここでは，前述した等間隔往復直進走行においては直線経路追従 PGR を基本とし，詳細な計測が必要な領域への誘導については PGR の目標姿勢角を修正する手法を提案する．目標姿勢角の修正については大竹らの方法を参考にし，観測点の位置情報や観測の必要性を表す尺度を活用する．これにより，PGR によるシームレスな走行制

御が可能となる．環境調査を行う他の移動ロボットにおいては，蓄積された，あるいは，取得中の観測値に基づいて，どの方向に車両を誘導すべきかどうかの判断を行うため，観測値の空間導関数を利用することが多い．例えば，確率モデル (Chang et al., 2013) や，カルマンフィルター (Zhang and Leonard, 2010)(Marques et al., 2005)，ベイズ推定 (Busby et al., 2007)，勾配の利用 (Fabbiano et al., 2014) などが挙げられる．空間導関数を求めるためには，注目する領域のデータが密に取得できているか，あるいは数式モデルで表現できている必要があり，その適用範囲が限られることもある．本手法では，観測点の位置情報と観測の必要性を表す尺度を直接用いることから，これらの方法とは異なり勾配などを求める必要はない．

提案手法の有効性について確認をするために 2 種類の計算機シミュレーションを行う．本手法を適用するためには，観測点への誘導のために，いくつかのパラメータを設定する必要がある．1 つめのシミュレーションでは，それらのパラメータが車両の誘導にどのように影響するかを考察する．2 つめのシミュレーションでは，使用を想定する環境調査地において計測した温度データを用いて，実際にどのような誘導が行われるかを考察する．実測値から予測モデルを作成し，その予測値と直近の計測値の差が大きい場所を，密な観測が必要な場所であるとす．予測モデルにはデータベースモデル (豊田他, 2006)(田中他, 2011) を適用し，蓄積したデータからモデルの構築を行う．

以下では第 2 章で想定している環境調査の流れの大きな説明を行う．第 3 章で車両の誘導のための制御理論について説明した後，第 4 章でシミュレーションを用いて制御側の確認を行う．複数ある重み関数中のパラメータを変更し，車両の軌跡の変化を比較することで，実際の使用時の適用可能性を検討する．第 5 章では実際の計測値を利用したシミュレーションにより具体的な適用例を示す．第 6 章で結論をまとめる．

## 2. 問題設定

本研究では，前輪操舵・後輪駆動の車両を扱う．左右のタイヤ特性に差がないと仮定し，前後の左右輪が各車軸の中央にそれぞれ集中しているとみなすと，四輪車両を二輪車両に近似することができる (図 2) ．

車両の走行路面に直交座標系  $O-xy$  を定義し，後輪の中心に車両の座標  $(x, y)$  を， $x$  軸から見た車両の姿勢角を  $\theta$  とする．車両が横滑りせず，車軸方向の速度が 0 であることを仮定すると，車両の運動学方程式は次のように定められる．

$$\dot{x} = u_1 \cos \theta \tag{1}$$

$$\dot{y} = u_1 \sin \theta \tag{2}$$

$$\dot{\theta} = \frac{\tan u_2}{L} u_1 \tag{3}$$

ここで， $u_1$  は車両の直進速度， $u_2$  は前輪の操舵角， $L$  はホイールベースである．車両の走行制御においては  $u_1$ ， $u_2$  を操作量とする．

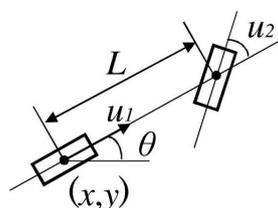


Fig. 2 A two-wheeled vehicle model which is equivalent to a four-wheeled vehicle

次に車両の走行経路についてであるが，広域な領域を均一な密度で走行するために，等間隔往復直進経路を採用する．これは，複数の直線経路の集合とみなすことができる．そこで，その時点で追従したいある直線経路上に，前述の  $O-xy$  の  $x$  軸を重ねあわせ，車両を直進させたい方向を  $x$  軸の正の向きとする．原点  $O$  の位置は任意でよいが，例えば，直線経路の端点とする．ある直線経路から次の直線経路に進む場合は，その時点で  $O-xy$  を定義

し直す．直線経路追従 PGR においては通路幅  $W$  を指定する必要がある．そこで， $W$  は等間隔往復直進経路の間隔とする．なお，等間隔往復直進経路の測定位置は毎回固定しても良いが，新たな観測点を得たい場合は，回ごとに変更するとよい．

一般に，観測点の座標は調査地のグローバルな座標系で表されると考えられるが，車両の走行制御を行う場合には  $O-xy$  での座標に変換されているものとする．そして，その時点の直線経路において対象とする観測点の個数を  $n$  とおき， $O-xy$  上での  $i$  番目の観測点座標を  $(x_i, y_i)$  ，その観測点における詳細な計測の必要性を表す尺度を要測度  $\kappa_i$  とする．車両が走行をしているときには，対象とする観測点の  $(x_i, y_i)$  および  $\kappa_i$  は常に得られるものと仮定する．

本稿で想定する典型的な自律走行車両による環境調査の流れを以下に示す．なお，「1. 観測データの蓄積と要測度の算出」の部分は，ここに記載した以外の方法で取得しても，本論文で提案する走行制御手法を適用できる．

1. 観測データの蓄積と要測度の算出

- (a) 既定の経路に沿って走行しながら，広域な範囲から連続的に環境データ  $f_i$  を計測する
- (b) 蓄積した観測データから予測モデルを構築する
- (c) 直前の観測点  $(x_i, y_i)$  における観測値  $f_i$  と，予測モデルから算出した予測値  $\bar{f}_i$  を比較し，その差の大きさを要測度  $\kappa_i$  とする．

2. 等間隔往復直進経路と要測度に応じた寄り道走行

- (a) 最初の直線経路に  $O-xy$  を設定する
- (b)  $O-xy$  に対応した  $(x_i, y_i)$  ,  $\kappa_i$  を算出する
- (c) 直線経路追従 PGR にて走行し， $\kappa_i$  に応じて車両の目標姿勢角を修正する
- (d) 経路の修正により詳細なデータが必要な地点へと誘導される
- (e) 直線経路の終点に達し，それが最後の直線経路ならループを抜ける
- (f) 次の直線経路に  $O-xy$  を設定し，2.(b) へ戻る

3. 走行中は常に環境データを記録・蓄積する

4. 次回の走行に備えて 1 に戻る

次章では，上記の 2.(c) 走行制御手法について説明する．

3. 要測度を考慮した 4 輪車両の直線追従制御

3.1 直線経路追従 PGR

まず，等間隔往復直進走行に用いる，直線経路追従 PGR について説明する．直線経路追従 PGR は  $O-xy$  の  $x$  軸への追従を目的とする (Hanajima et.al, 2014) , (羅他, 2015) . 経路関数群として，以下に示すシグモイド関数を用いる．

$$y = \pm \frac{W}{1 + e^{ax+b}} \tag{4}$$

ここで， $a$  は曲線の傾きを調整する正定数， $b$  は曲線の位置を平行移動する実数， $W$  は通路幅である．複号は，車両が  $x$  軸よりも上にあるときは  $+$  を，下にあるときは  $-$  をとる．図 3 に経路関数群を示す．式 (4) の  $y$  を  $x$  で微

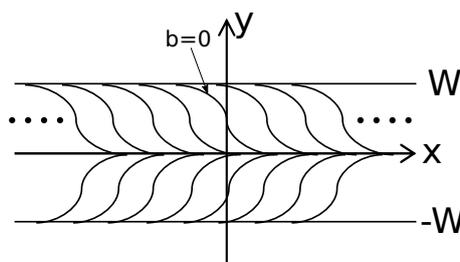


Fig. 3 Function group of sigmoid

分することにより曲線の傾きを求めると、目標姿勢角  $\theta_r$  は次式のように得られる。

$$\theta_r = \tan^{-1} \left( -\frac{a}{W} y(W - |y|) \right) \quad (5)$$

車両の姿勢角  $\theta$  と目標姿勢角  $\theta_r$  の偏差  $e$  を次式で定義する。

$$e = \theta - \theta_r \quad (6)$$

$e$  に関する偏差システムが 1 次遅れ系  $\dot{e} = -\lambda e$  となるように、式 (6) の両辺を時間微分し、式 (1)、式 (2)、式 (3) を用いると操舵入力  $u_2$  は、次のように得られる。

$$u_2 = \tan^{-1} \left\{ \frac{L}{u_1} \left( -\lambda e + \frac{\partial \theta_r}{\partial x} \cos \theta u_1 + \frac{\partial \theta_r}{\partial y} \sin \theta u_1 \right) \right\} \quad (7)$$

ここで  $\lambda$  は正の定数である。

### 3.2 要測度を考慮した目標姿勢角の修正

式 (5) の目標姿勢角は、 $x$  軸への直線経路追従の機能を持つ。この目標姿勢角を修正することで、要測度の値が大きい場所にさしかかったら、直線経路から一時離脱し要測度の高い地点へ寄り道走行し、その後、元の直線経路に復帰させることを目指す。図 4 に走行経路のイメージを示す。青で塗りつぶされた丸が要測度の値が小さい地点、赤で塗りつぶされた丸が要測度の値が大きい地点である。 $y = 0$  が直線経路となる  $x$  軸、上下の実線が経路幅、T 字の太い実線が車両の初期位置と姿勢、赤い実線が車両が通った軌跡である。最初、車両は  $x$  軸に漸近するが、左から 3、4 列目の赤印に寄り道し、再び  $x$  軸に収束した後、右から 1、2 列目の赤印に寄り道する。

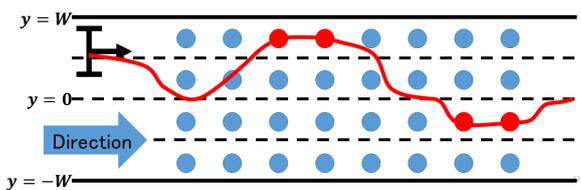


Fig. 4 Conceptual diagram of a vehicle's resultant locus

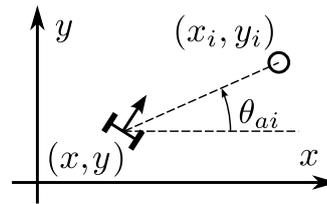


Fig. 5 Offset angle  $\theta_{ai}$  toward  $(x_i, y_i)$

大竹らは PGR に障害物回避の機能を持たせるために、障害物を避けるためのオフセット角と目標姿勢角  $\theta_r$  の加重和をとる方法を示した。これを参考にし、本研究では誘導したい点  $(x_i, y_i)$  に向かうようなオフセット角  $\theta_{ai}$  と目標姿勢角  $\theta_r$  の加重平均をとることを提案する。図 5 に  $\theta_{ai}$  の取り方を示す。大竹らが用いた目標姿勢角は次式のような形式であった。

$$\theta_f = \sum_{i=1}^n (1 - t_i) \theta_{ai} + \prod_{i=1}^n t_i \theta_r$$

ここで、 $\theta_r$  と  $\theta_{ai}$  の係数が重み関数であり、 $t_i$  は  $0 < t_i < 1$  の値をとる。大竹らの方法では、回避の対象となる障害物はある瞬間ではたいてい 1 つに絞られることから、その瞬間での重み関数の総和は近似的に 1 になっていた。ところが、本研究ではある瞬間に複数の観測点を参照することから、大竹らと同じ重み関数を用いると、その総和が必ずしも 1 にならない。そこで、重み関数の総和で除する加重平均を採用する。修正後の目標姿勢角  $\theta_f$  を次式で定義する。

$$\theta_f = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) \theta_{ai} + \prod_{i=1}^n m_i \theta_r}{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) + \prod_{i=1}^n m_i} \quad (8)$$

ここで、 $\theta_{ai}$  を車両の位置  $(x, y)$  からみた  $(x_i, y_i)$  の角度、 $m_i$  をシグモイド型の関数でそれぞれ次のように定義する。

$$\theta_{ai} = \tan^{-1} \frac{y_i - y}{x_i - x} \quad (9)$$

$$m_i = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-b_m(\kappa_i - c_m - q_m L_i^2))} \quad (10)$$

$m_i$  において  $b_m, c_m, q_m$  は正の定数である .  $L_i$  は車両の位置  $(x, y)$  から  $(x_i, y_i)$  までの距離 , すなわち ,  $L_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$  である . 全ての  $i$  について  $L_i$  が大きい , あるいは  $\kappa_i$  が小さくなると ,  $m_i$  は 1 に近づき ,  $\theta_f$  は  $\theta_r$  の項が優勢になって直線経路追従 PGR となる . 逆に , ある  $i$  において  $L_i$  が小さい , あるいは  $\kappa_i$  が大きいと ,  $m_i$  は 0 に近づき ,  $\theta_f$  において  $\theta_r$  の項が抑制されて ,  $\theta_{ai}$  の項が優勢になる .  $n$  は ROI (Region of interest, 関心領域) に含まれる観測点の数である . 遠方にある観測点は小さな重みとなり , 実際には計算結果に大きな影響を与えないので , 計算負荷を下げる意味で適切に ROI を定める .

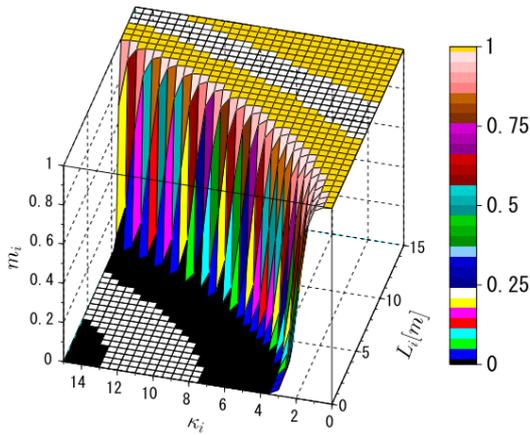


Fig. 6 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 3.5, c_m = 2$ , and  $q_m = 0.1$ .

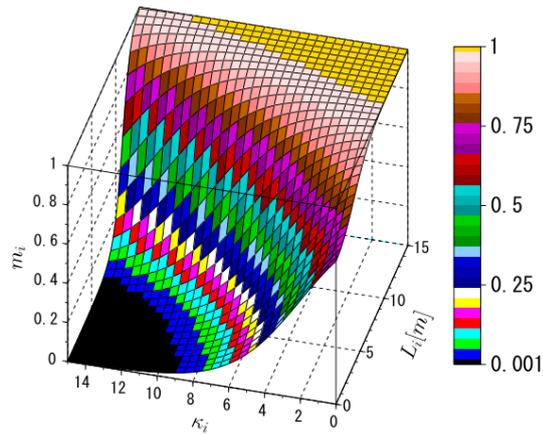


Fig. 7 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 0.5, c_m = 2$ , and  $q_m = 0.1$ .

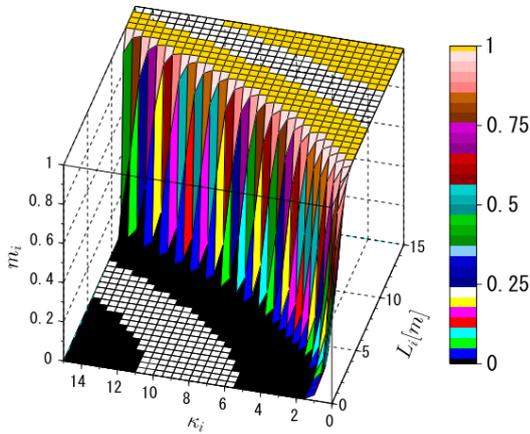


Fig. 8 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 3.5, c_m = 0.1$ , and  $q_m = 0.1$ .

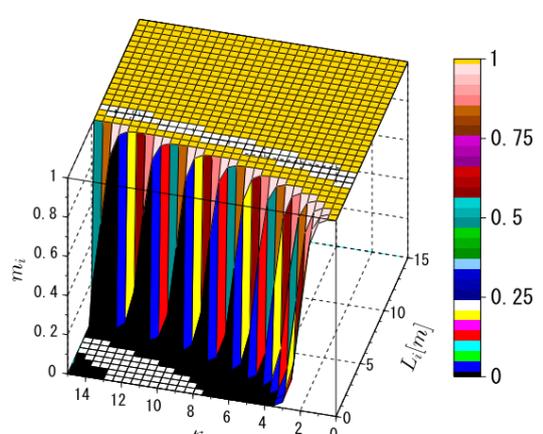


Fig. 9 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 3.5, c_m = 2$ , and  $q_m = 0.7$ .

$b_m, c_m, q_m$  の値と  $m_i$  の関係を説明するために ,  $b_m = 3.5, c_m = 2, q_m = 0.1$  を基準にそれぞれの値を変化させた場合の ,  $\kappa_i$  と  $L_i$  に対する  $m_i$  のグラフを図 6, 図 7, 図 8, 図 9 に示す .  $b_m$  を変化させた図 6 と図 7 の比較より ,  $b_m$  を小さくすると  $m_i$  の傾きが緩やかになることがわかる . 走行中に車両の目標姿勢角が  $\theta_r$  や  $\theta_{ai}$  の加重平均によって変化するが ,  $b_m$  を大きくするとその切り替えが急に起こり , 小さくすると緩やかになる .  $c_m$  を変化させた図 6 と図 8 の比較より ,  $c_m$  を大きくすると , グラフ全体が  $\kappa_i$  の正の方向に平行移動するのがわかる . 例えば , 図 6 だと  $\kappa_i < 2$  であれば常に  $m_i \approx 1$  となることから ,  $\kappa_i < 2$  である地点は寄り道走行の対象にならない . 逆に図 8 では ,  $\kappa_i < 2$  の点でも車両の近くにあれば目標姿勢角の計算で考慮される .  $q_m$  を変化させた図 6 と図 9 の比較より ,  $q_m$

を大きくすることで  $m_i = 0$  を表す黒い部分が,  $L_i$  の方向に狭まることわかる. これより,  $q_m$  を大きくすることで, より遠くにある点は目標姿勢角の計算に含まれにくくなる.

式(11), 式(12)のように  $\theta_f$  をそれぞれ  $x, y$  により偏微分し, 式(7)の  $\frac{\partial \theta_r}{\partial x}, \frac{\partial \theta_r}{\partial y}$  にそれぞれ代入することで操舵入力  $u_2$  を得る.

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial x} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) \left( 2b_m q_m (x - x_i) \left( m_i (\theta_f - \theta_{ai}) - \prod_{j=1}^n m_j (\theta_f - \theta_r) \right) - \frac{y - y_i}{L_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) + \prod_{i=1}^n m_i} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial y} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) \left( 2b_m q_m (y - y_i) \left( m_i (\theta_f - \theta_{ai}) - \prod_{j=1}^n m_j (\theta_f - \theta_r) \right) + \frac{x - x_i}{L_i^2} \right) + \frac{-aW(W - 2|y|)}{W^2 + a^2 y^2 (W - |y|)^2} \prod_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n (1 - m_i) + \prod_{i=1}^n m_i} \quad (12)$$

### 3.3 速度指令値 $u_1$

直線経路追従 PGR の速度指令値  $u_1$  は, 次式で与えられており, 本論文ではこれを踏襲する.

$$u_1 = -(1 - Q) \frac{1 - e^{c y \sin \theta}}{1 + e^{c y \sin \theta}} V_m + Q V_m \quad (\text{where } Q = e^{-c_q y^2}) \quad (13)$$

$Q$  は重み関数で, 車両が  $x$  軸上にある  $y = 0$  のときに  $Q = 1$ ,  $x$  軸から離れると値が小さくなる関数である.  $c_q$  は  $y$  に対する  $Q$  の傾きを調整する正の定数である. 第一項目は  $x$  軸への収束性を保証する制御則, 第二項目は  $x$  軸上での前進を保証するための制御則である.  $V_m$  は速度の上限を示す.  $c$  は  $x$  軸への収束速度を調整するパラメータである.

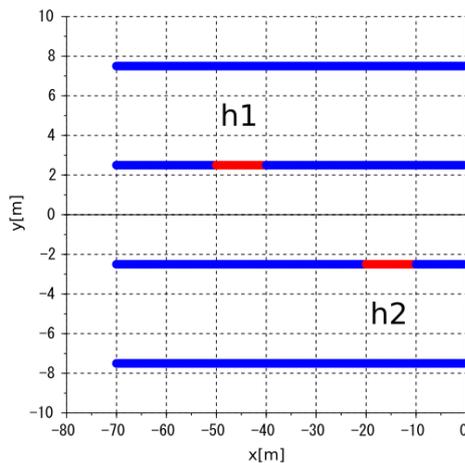


Fig. 10 Filed A: A passage for the vehicle's driving simulation with a length of 70m and a half width of 10m. The line of  $y = 0$  is a standard driving path. Blue and red dots are observation points with the  $\kappa_i$ 's value of 0.5 and 5, respectively. The red dots locate only on the line of  $y = \pm 2.5$  in Filed A, which are designated by  $h1$  and  $h2$ .

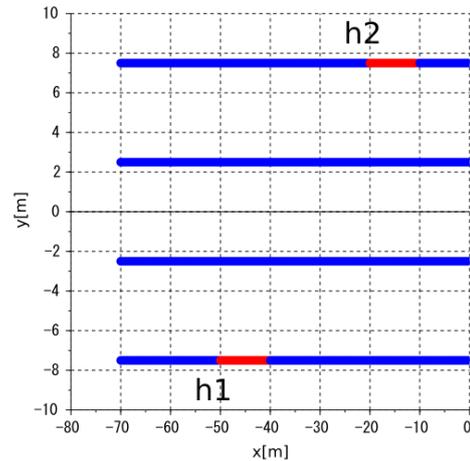


Fig. 11 Filed B: A passage for the vehicle's driving simulation with a length of 70m and a half width of 10m. The line of  $y = 0$  is a standard driving path. Blue and red dots are observation points with the  $\kappa_i$ 's value of 0.5 and 5, respectively. The red dots locate only on the line of  $y = \pm 7.5$  in Filed B, which are designated by  $h1$  and  $h2$ .

### 3.4 競合状態と蛇行状態について

さて, 前節までで本手法の制御則を説明した. ここでは, 本手法による車両の誘導制御によって生じ得る特殊な状況について説明する.

観測点の位置と要測度および  $m_i$  のパラメータが決まると, 走行座標系上の全ての点において車両の目標姿勢角が定まる. ある点には目標姿勢角がそれぞれ1つずつ定義されるので, その点の周辺に局所的に要測度が高い領域が複数あっても, それぞれに向かうような目標姿勢角にはならず, それら全体を総合した目標姿勢角になる. し

たがって、車両が局所的に要測度が高い領域を無視して走行するような軌跡をとることもあり得る。要測度が高い複数の観測点が競合してこのような状況となるため、これを競合状態と呼ぶことにする。実例を5章のシミュレーションにて示す。

また、要測度が高い複数の観測点が、車両の正規の進行方向（ $x$ 軸の正の方向）に連なって並んでいるとき、その付近では連なりの中心に向かうような目標姿勢角が設定され得る。その場合、車両が連なりの右に進めば、連なりの中心に戻すような左向きの操舵が、逆に左に進めば右向きの操舵が切られることになる。そうすると車両は連なりを中心に左右に蛇行するような動きを見せる。このような状況を蛇行状態と呼ぶことにする。実例を4章のシミュレーションにて示す。

#### 4. シミュレーション

提案手法の有用性と  $m_i$  中のパラメータの役割をシミュレーションにより検証する。シミュレーションは SciLab5.52 で行う。図10と図11に2つの走行環境 Field A と Field B を示す。双方の通路とも片幅  $W$  が 10m、長さが 70m であり、通路中央の  $x$  軸が、車両が追従すべき直線経路である。 $y = 7.5, 2.5, -2.5, -7.5$  の位置に 0.5m 間隔で観測点を設け、説明の便宜上、 $y = \pm 2.5$  を近い小経路、 $y = \pm 7.5$  を遠い小経路と呼ぶ。図中の青い観測点には  $\kappa_i = 0.5$ 、赤い観測点には  $\kappa_i = 5$  の要測度を設定した。それぞれの図で、赤い観測点が集中している部分が2箇所あり、これらを  $h1$  と  $h2$  で示してある。 $h1$  と  $h2$  は、Field A では近い小経路上に、Field B では遠い小経路上にある。

走行シミュレーションにおける制御則のパラメータは、 $a = 1, \lambda = 0.5, L = 1.27, c_q = 0.01, c = 0.005$  とし、車両の初期位置と姿勢角は  $(x, y, \theta) = (-80, 5, 0)$  とした。初期位置を、 $y$  軸方向において近い小経路と遠い小経路の間という位置どりとしたのは、 $m_i$  中のパラメータが  $x$  軸への収束性に及ぼす影響を調べるためである。ROI を車両位置の  $x$  座標から  $x$  軸の正方向に 10m までの範囲とした。シミュレーションにおける車両の走行目標は、基本的には  $x$  軸上を走行し、 $h1$  と  $h2$  に近づいたら、そちらに寄り道走行をすることである。それぞれの走行環境で  $b_m, c_m, q_m$  の値を変えて走行させ、走行軌跡の変化を調べる。さらに、 $h1$  と  $h2$  における車両の追従誤差を考察する。ここで、車両の追従誤差はそれぞれの  $y$  座標の二乗平均誤差である。また、3.4節で述べた蛇行状態についても4.1節において実例を示す。

Table 1 A parameter list of the simulation in Field A, and root mean square error at  $h1$  and  $h2$ .

Case	$b_m$	$c_m$	$q_m$	Error at $h1$ [m]	Error at $h2$ [m]
A1	3.5	2.0	0.1	0.13	0.11
A2	0.5	2.0	0.1	0.003	2.86
A3	3.5	0.1	0.1	0.003	3.42
A4	3.5	2.0	0.7	1.72	1.72

##### 4.1 近い小経路への誘導

$x$  軸から近い小経路に  $h1$  と  $h2$  がある図10の Field A でシミュレーションを行った。表1にそれぞれのシミュレーションで用いた  $b_m, c_m, q_m$  の値とともに、 $h1, h2$  における車両の追従誤差を示す。表1の4つの場合における走行軌跡を、図12、図13、図14、図15に示す。

まず、Case A1 の図12では、適切なパラメータ設定により、意図した走行軌跡が得られた。 $b_m = 3.5$  とすることにより  $\theta_r$  と  $\theta_{ai}$  の切り替えが明確に行われ、 $c_m = 2$  とすることにより  $\kappa_i = 0.5$  である青い観測点はほとんど無視され、 $\kappa_i = 5$  である赤い観測点のみが目標姿勢角に反映された。図6からもわかるように、 $\kappa_i = 5$  であれば  $m_i = 0$  となるのは  $L_i < 4$  の範囲であり、 $h1$  と  $h2$  は  $x$  軸からその範囲にある。 $q_m = 0.1$  とすることにより、ちょうどそのような範囲に設定ができた。追従誤差も 0.1m 程度に収まっている。

Case A2 の図13と Case A3 の図14では、近い小経路に拘束され  $x$  軸への追従ができていない。これは、Case A3 の場合、 $c_m = 0.1$  としたため、赤い観測点だけでなく、 $\kappa_i = 0.5$  である青い観測点も目標姿勢角に反映されたためである。実は、 $b_m$  を 0.5 に小さくした Case A2 の場合もこれと同様の状況になっている。図7のグラフで  $\kappa_i = 0.5$  の付近をみると、 $m_i$  の値が 0.7 程度に下がっている。観測点が複数ある場合、式(8)の  $\theta_r$  の重みにある  $\prod_{i=1}^n m_i$  の

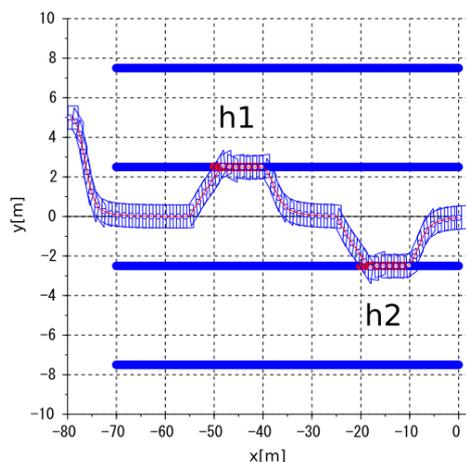


Fig. 12 Locus of the vehicle in Case A1,  $b_m = 3.5$ ,  $c_m = 2$ ,  $q_m = 0.1$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

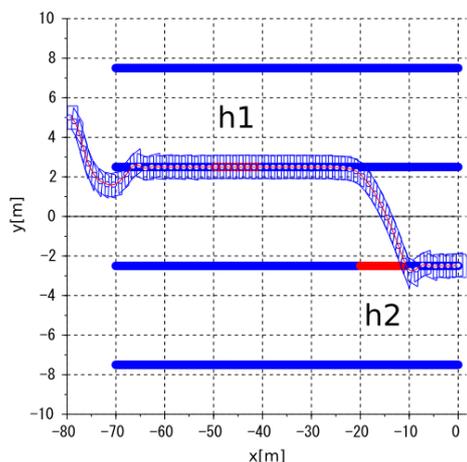


Fig. 13 Locus of the vehicle in Case A2,  $b_m = 0.5$ ,  $c_m = 2$ ,  $q_m = 0.1$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

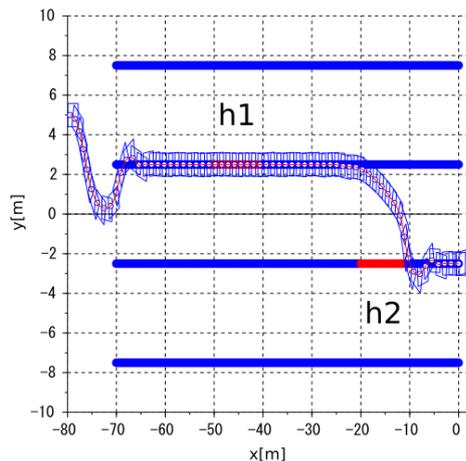


Fig. 14 Locus of the vehicle in Case A3,  $b_m = 3.5$ ,  $c_m = 0.1$ ,  $q_m = 0.1$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

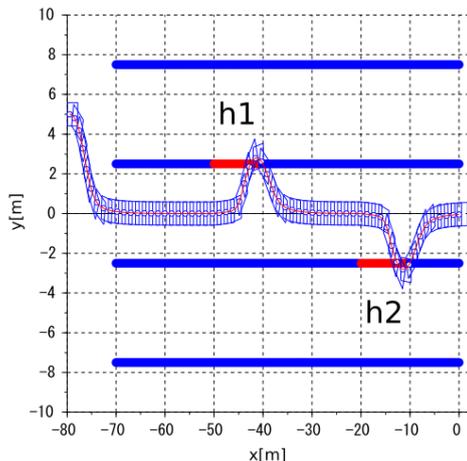


Fig. 15 Locus of the vehicle in Case A4,  $b_m = 3.5$ ,  $c_m = 2$ ,  $q_m = 0.7$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

値はかなり小さくなってしまい、直線追従の目標姿勢角は無視される状況となる。初期状態から出発して一度は  $x$  軸に向かうものの、 $x = -70$  付近から青い観測点に近づいて追従するのはそのためである。もともと  $h1$  のある小経路に追従しているため、 $h1$  への追従誤差は非常に小さい。一方、 $h1$  のある小経路上を走行し、 $h2$  が近づいてからようやく  $h2$  のある小経路に向けて操舵するため、 $h2$  を通過してからその小経路に到達しているようすがわかる。このため、 $h2$  への追従誤差は 3m 前後と大きい。

Case A4 の図 15 では、 $x$  軸への追従性については Case A1 と同様の軌跡になっている。一方、 $q_m$  の値を Case A1 の 7 倍にしたため、車両が  $\kappa_i$  が大きい赤い観測点により接近するまで寄り道走行に移行しなくなった。そのため、 $h1$  と  $h2$  に遅れて追従している。追従誤差も Case A1 に比べて大きくなっている。

最後に蛇行状態について確認する。3.4 節で述べたように要測度が高い複数の観測点が連なって並んでいる  $h1$  と  $h2$  において蛇行状態が生じる可能性がある。実際、図 12 の  $h1$  や  $h2$ 、図 13 の  $h1$  を含む青い観測点において、車両の軌跡が若干上下に変動していることが観察できる。図 13 においては  $x = -70$  から  $x = -50$  にかけて見られた変動が  $x > -50$  では減衰して見られなくなっていることもわかる。

4.2 遠い小経路への誘導

$x$  軸から遠い小経路に  $h1$  と  $h2$  がある図 11 の Field B でシミュレーションを行った．表 2 にそれぞれのシミュレーションで用いた  $b_m, c_m, q_m$  の値とともに,  $h1, h2$  における車両の追従誤差を示す．表 2 の 4 つの場合における走行軌跡を図 16, 図 17, 図 18, 図 19 に示す．

Table 2 A parameter list of the simulation in Field B, and root mean square error at  $h1$  and  $h2$ .

Case	$b_m$	$c_m$	$q_m$	Error at $h1$ [m]	Error at $h2$ [m]
B1	3.5	2.0	0.01	0.56	0.57
B2	0.5	2.0	0.01	6.12	6.2
B3	3.5	0.1	0.01	8.31	5.49
B4	3.5	2.0	0.1	7.50	7.50

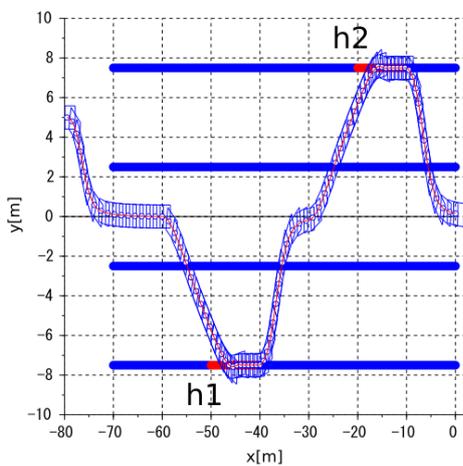


Fig. 16 Locus of the vehicle in Case B1,  $b_m = 3.5, c_m = 2, q_m = 0.01$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

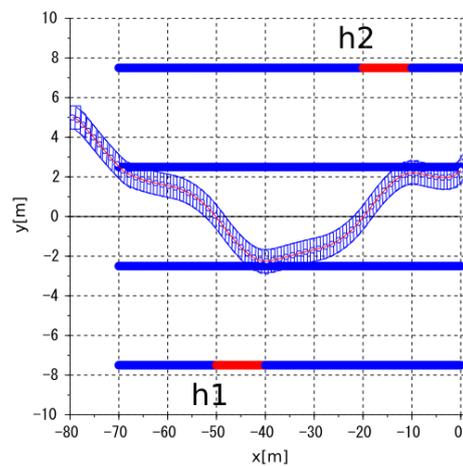


Fig. 17 Locus of the vehicle in Case B2,  $b_m = 0.5, c_m = 2, q_m = 0.01$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

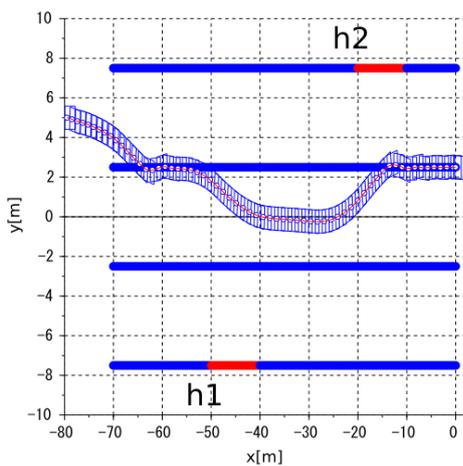


Fig. 18 Locus of the vehicle in Case B3,  $b_m = 3.5, c_m = 0.1, q_m = 0.01$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

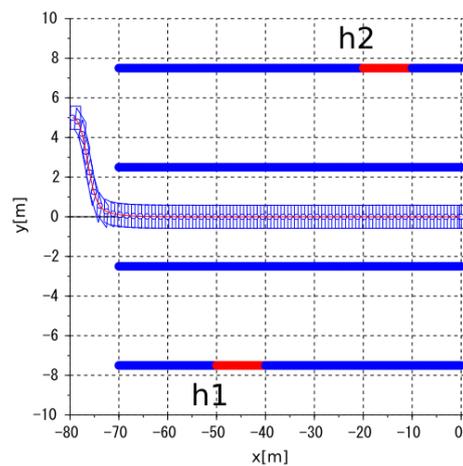


Fig. 19 Locus of the vehicle in Case B4,  $b_m = 3.5, c_m = 2, q_m = 0.1$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

これまでの考察から、 $x$  軸から遠い  $h1$  と  $h2$  に車両を向けるには、 $q_m$  を前節の値よりも小さくする必要があると推測できる。前節の Case A1 と同じパラメータとした Case B4 の図 19 では、車両は全ての観測点を無視して  $x$  軸の直線経路に追従している。 $h1$  と  $h2$  が  $x$  軸から遠いため、これに関する  $m_i$  の値が 1 に近く、観測点に向かう操舵がなされなかったためである。

Case B1 では  $q_m$  を Case B4 の 0.1 倍とした。これにより図 16 に示す通り、意図した走行軌跡が得られている。追従誤差も 0.6 m 程度に抑えられている。

Case B2 と Case B3 も Case A2 と Case A3 と同様に、 $\kappa_i = 0.5$  である青い観測点に目標姿勢角が影響を受け、近い小経路に追従していることが図 13 と図 14 よりわかる。また、 $x = -50$  付近では  $h1$  の方向に引きつけられて下方に、 $x = -20$  付近では  $h2$  に引きつけられて上方に向かっている。しかしながら、 $h2$  に到達する前に  $h2$  のあった地点を通り越しており最終的に  $h1$  や  $h2$  に到達しておらず、追従誤差は 5m 以上となっている。

以上の例から、本制御則は要測度が高い観測点へ常に到達することを優先するものではなく、正規の経路に沿って進むことを基調としながら、その時点の車両の状態と、周囲の観測点の位置や要測度に応じて、寄り道走行を実現する手法であることがわかる。このことから、正規の経路からどの程度離れた観測点までを寄り道走行の対象にするか、対象とする観測点の要測度の大きさなどを事前に検討する必要がある。その結果を踏まえて、式 (10) の  $m_i$  のグラフなどを確認しながら、 $b_m, c_m, q_m$  の値を決定する。

### 5. 実際の使用を想定したシミュレーション

前章までで自律走行車両の誘導方法について適用可能性を検討した。本章では実際の使用を想定した適用例をシミュレーションにより示す。利用する観測データは先行研究において車両を走行させて取得した地表温度  $f_i$  であり、これと車両位置  $(x_i, y_i)$  を組み合わせて観測値の予測モデルを構築する(大谷他, 2015)。要測度  $\kappa_i$  はこの予測モデルの出力  $\hat{f}_i$  と直近の観測値  $f_i$  の差から算出する。これは直近の観測値が、これまでの観測から得られた傾向とどのくらい異なるかを表している。実測値を用いるため、要測度は 4 章と異なり、観測位置によって様々な値をとる。これらをシミュレーション環境内に実装し、提案手法により車両の走行シミュレーションを行い、結果を考察する。また、3.4 節で述べた競合状態についても実例を示す。

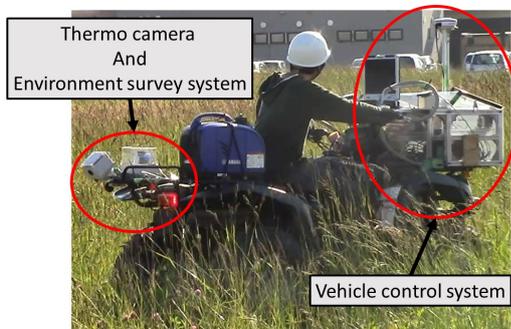


Fig. 20 An all terrain vehicle employed to measure ground temperatures. A thermo camera, an environment survey system, and a vehicle control system were installed in it.

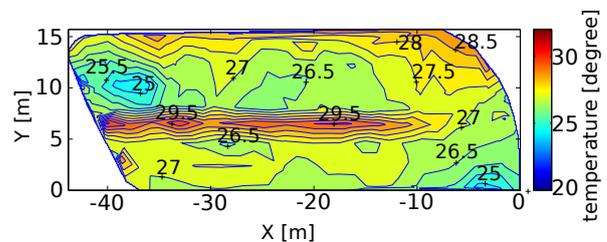


Fig. 21 One of the contour maps of measured ground temperatures. The size of surveyed site was 40m in length and 15m in width. The survey line was a reciprocating straight path at even interval.

#### 5.1 地表温度計測と予測モデルの構築

地表温度の計測は、図 20 に示す四輪バギー車の後部荷台に搭載したサーモカメラ(株式会社チノー, TP-L0255EN)により行った。バギー車の後方地表に向けたサーモカメラから温度画像を取得し、全画素の平均温度を計算し、D-GPS(株式会社ヘミスフィア, A100)の測位データと同期させて記録した(大谷他, 2015)。

計測環境は約  $15m \times 40m$  の開けた土地であった。車両をマニュアル運転により等間隔往復直進走行させて計測した地表温度のコンター図の一例を図 21 に示す。雨が降った後に日が差したため、 $y = 7$  のあたりに日射により

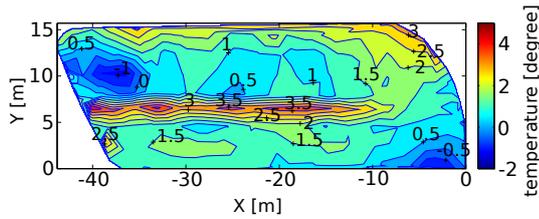


Fig. 22 The contour map of values of  $f_i$ , which was obtained by subtracting a offset temperature from the measured ground temperatures. The ground temperature at (0,0) coordinate was chosen as the offset temperature.

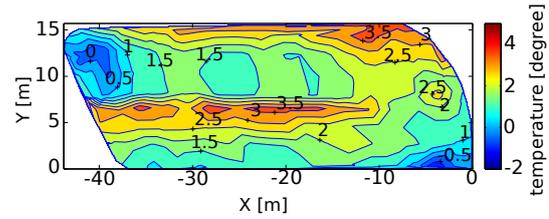


Fig. 23 The contour map of values of  $\hat{f}_i$ , which was predicted by the database model method. The database model was constructed from the ground temperatures obtained by the precedence measurements.

温度の高い部分が、 $(x,y) = (-40, 10)$  のあたりに水たまりで温度の低い部分が見られる。 $(x,y) = (0,0)$  の付近は丈長の雑草が日光を遮っていた部分である。

これらの観測データから、データベースモデルという手法を用いて予測モデルを構築した。詳細は付録に示す。データベースモデルは化学プラントの異常状態検出のために提案された、正常状態を予測するための非線形モデリング手法である(豊田他, 2006)(田中他, 2011)。今回、予測モデルを構築するために使用するデータは、地表温度の生データから、 $(x,y) = (0,0)$  における地表温度をオフセットとして減じたものとする。これは、日照など計測環境全体に影響する要因による地表温度の変動を補償するためである。構築した予測モデルに、観測地点の位置座標  $(x_i, y_i)$  を入力すると、その地点での予測値  $\hat{f}_i$  が導出される。オフセットを除去した直近の観測値  $f_i$  と  $\hat{f}_i$  の差の絶対値を、車両の誘導のための要測度として用いる。

$$\kappa_i = |f_i - \hat{f}_i| \tag{14}$$

図 22 にオフセットを除去した観測値から描画したコンター図の一例を、図 23 にデータベースモデルにより求めた予測結果のコンター図を示す。すなわち、この両者が大きく異なる場所へ、車両を寄り道走行により誘導することになる。

## 5.2 適用例

前節で示した予測モデルを用いて走行シミュレーションを行う。直近の計測値として図 22 に、予測モデルの出力値として図 23 に示したものをを用いる。走行制御のために、観測領域の中央を走行するように  $x$  軸をとり直し、 $W = 7.5$  とした。観測値を取得した点とその地点の要測度を色分けして表したグラフを図 24 に示す。青、緑、赤はそれぞれ  $\kappa_i$  の値が  $\kappa_i = 0 \sim 1$ ,  $1 \sim 1.5$ ,  $1.5$  以上の範囲であることを示す。

図 24 には  $\kappa_i$  の値が大きい領域が大きく 4 つあり、それぞれ  $h_1 \sim h_4$  で示してある。それぞれの特徴は次のとおりである。

- $h_1$  は  $x$  軸に近く、要測度の高い点が孤立している。
- $h_2$  は要測度の高い点が横方向に集まっている。
- $h_3$  は走行経路から離れている。
- $h_4$  は孤立しているが、ほぼ  $x$  軸上にある。

$h_1$  や  $h_2$  は 4.1 節で示した近い小経路への誘導に、 $h_3$  は 4.2 節で示した広い範囲への誘導に類似すると考えられる。 $h_1$  や  $h_3$  は孤立しているので、式 (8) の第 1 項目が大きくなりやすく、要測度の高い領域に向かう操舵が効きにくいと予想される。

次に式 (10) のパラメータの候補を次のように選んだ。 $b_m$  は  $m_i$  の  $\kappa_i$  に対する傾きを決めるはたらきがある。 $\kappa_i$  の値の変動幅は、4 章ではおよそ 5 であったが、本例ではおよそ 2 未満であり、 $1/2$  以下である。そこで、 $b_m$  は 4 章の 2 倍以上の  $b_m = 10$ 、そしてさらに大きい変化率を持たせた  $b_m = 20$  を採用する。 $c_m$  については、図 24 の色分けに用いた  $\kappa_i$  の区切りの値である  $c_m = 1$  と  $c_m = 1.5$  の 2 つを採用する。 $q_m$  は車両からどの程度離れた観測点までを操舵に考慮するかを決めるはたらきがある。考慮する範囲を広くしすぎると、遠方にある高要測度の観測点に影響を受ける可能性があるため、ここでは、 $q_m = 0.01$  と  $q_m = 0.001$  の 2 つの値を採用する。

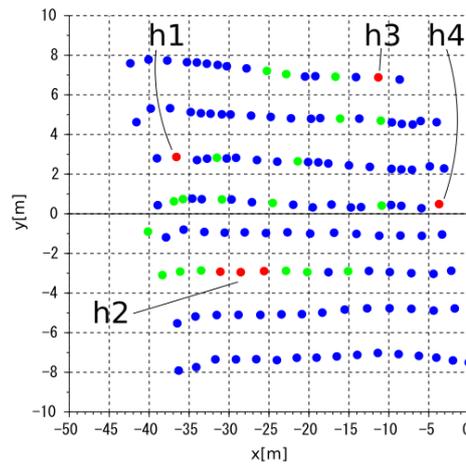


Fig. 24 Simulation field with  $\kappa_i$  obtained from an actual measurement experiment data. The line of  $y = 0$  is a standard driving path. Blue, green and red dots are observation points with the  $\kappa_i$ 's value of 0 to 1, 1 to 1.5, and above 1.5, respectively. There are four area with red dots which are designated by  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ , and  $h_4$ .

車両の初期位置と姿勢を  $(x, y, \theta) = (-50, 5, 0)$  として走行シミュレーションを行った。候補をあげたパラメータのうち、違いが顕著である  $b_m = 10, c_m = 1.5, q_m = 0.001$  の組 (Case C) と  $b_m = 20, c_m = 1.0, q_m = 0.01$  の組 (Case D) について説明する。Case C の走行軌跡と  $m_i$  を図 25, 図 26 に, Case D のそれを図 27, 図 28 にそれぞれ示す。

図 26 と図 28 を見ると, Case C と Case D で  $m_i$  の違いが顕著であることがわかる。Case C は要測度の高い観測点のみをより遠くまで考慮するような形状であるが, Case D は要測度が中程度より高い観測点を, 車両に近い範囲で考慮する形状である。これを念頭において, 図 25 と図 27 を見ると, Case C では青や緑の観測点には惑わされず, 赤い観測点に近づくような走行軌跡になっている。一方, Case D では車両の近くにある緑や赤の観測点をたどるような走行軌跡となっている。このように, 適切にパラメータを選ぶことで, 要測度に応じた寄り道走行による車両の誘導ができることがわかる。

次に  $h_1 \sim h_4$  への誘導という観点から考察をする。 $h_1$  については Case C と Case D のどちらも車両が通過していない。これは, Case C では  $h_2$  に赤い点があるが, Case D では  $h_1$  の下方に緑の点が集集中であり,  $\theta_{ai}$  の加重平均によって  $\theta_f$  がこれらの方向に向いたためである。特に Case C の  $x = -40$  から  $x = -35$  の付近の走行軌跡は, 軌跡上側の  $h_1$  や軌跡下側の緑と赤の観測点のどれも無視するようになっており, 3-4 節で述べた競合状態が観測できる。 $h_2$  には赤い点が集集中であり, Case C と Case D のどちらも車両が通過した。 $h_3$  は  $h_1$  と同じく孤立点であり, Case C では途中まで近づくと途中で  $h_4$  に進路を変えている。一方, Case D は  $h_2$  の周辺にある緑の点に誘われて  $x = -15$  付近から  $h_3$  へ向かうが,  $h_3$  が ROI からはずれると  $x = -12$  付近から  $x$  軸に向かい, その途中で  $h_4$  を通過している。以上のように, 要測度の高い点が孤立しているところよりも, それらが集中しているところに誘導される傾向があることがわかる。

## 6. 結 言

本論文では, 広大な調査地を 1 台の移動ロボットが観測値を収集しながら走行することを想定し, 観測結果を考慮して車両を誘導できる手法を提案し, シミュレーションによりその特徴を示した。広域な領域を均一な密度で走行する場合は直線経路追従 PGR により等間隔往復直進走行し, 詳細な計測が必要な領域にさしかかったら, 車両の目標姿勢角を修正することで, この経路から一時離脱し寄り道走行を行う。車両の目標姿勢角を修正する手法として要測度および重み関数を導入し, それらに含まれるパラメータのはたらきをシミュレーションを通して明らかにしたことが, 本論文の主な主張である。重み関数中のパラメータを適切に設定することで詳細なデータが必要な地点へと車両を誘導できること, 要測度の算出にデータベースモデルを利用した予測モデルが適用可能であること, 要測度の高い点が孤立しているよりも密集しているところに車両が誘導されやすいことなども明らかにした。

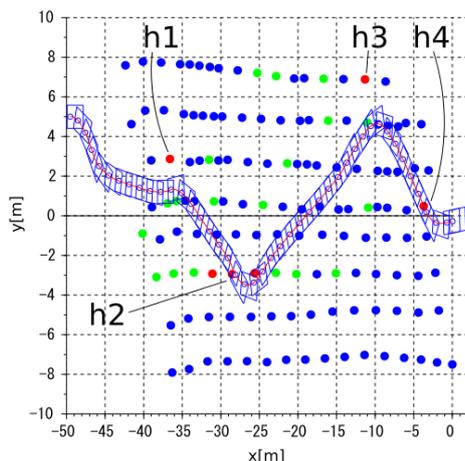


Fig. 25 Locus of the vehicle in Case C,  $b_m = 10$ ,  $c_m = 1.5$ ,  $q_m = 0.001$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

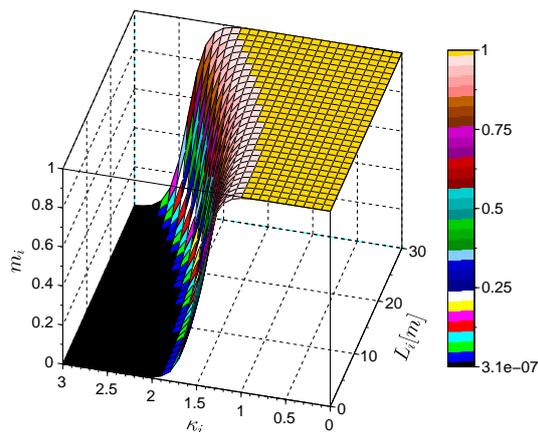


Fig. 26 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 10$ ,  $c_m = 1.5$ , and  $q_m = 0.001$ .

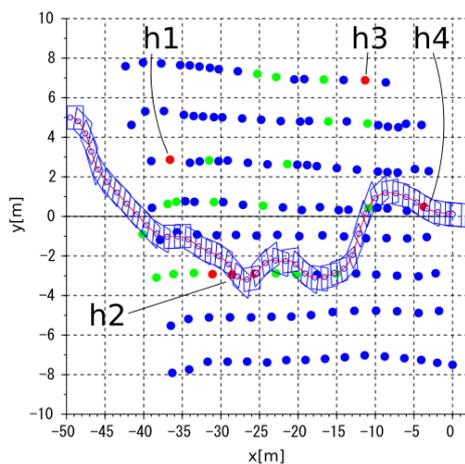


Fig. 27 Locus of the vehicle in Case D,  $b_m = 20$ ,  $c_m = 1.0$ ,  $q_m = 0.01$ . The locus is represented by a red line. A series of blue rectangles designate the shape of the vehicle at successive moments.

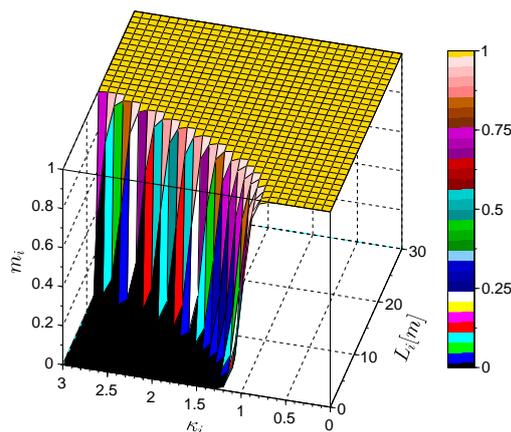


Fig. 28 A 3-D shaded surface plot of  $m_i$  with respect to  $\kappa_i$  and  $L_i$  when  $b_m = 20$ ,  $c_m = 1.0$ , and  $q_m = 0.01$ .

今後は、実際に自律走行車両を利用したデータ収集や走行実験などを行い、実問題への本手法の適用可能性を検討することが望まれる。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、室蘭工業大学環境科学・防災研究センターの支援を受けました。また、使用した機材の一部はスズキ株式会社から貸与を受けました。ここに記して感謝いたします。

### 文 献

Busby, D., Farmer, C. L. and Iske, A., Uncertainty evaluation in reservoir forecasting by Bayes linear methodology, Algorithms for Approximation (2007), pp.187–196, Springer.

- Chang, D., Wu, W., Webster, D. R., Weissburg, M. J. and Zhang, F., A bioinspired plume tracking algorithm for mobile sensing swarms in turbulent flow, IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), pp.921–926.
- Connolly, C. I., Burns, J. B. and Weiss, R., Path planning using Laplace's equation, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (1990), pp.2102–2106.
- De Luca, A., Oriolo, G. and Samson, C., Feedback control of a nonholonomic car-like robot, in Robot Motion Planning and Control, Lectures Notes in Control and Information Sciences 229, Springer (1998).
- Fabbiano, R., Canudas de Wit, C. and Garin, F., Source localization by gradient estimation based on Poisson integral, Automatica, Vol.50, Issue 6 (2014), pp.1715–1724.
- Hanajima, N., Yang, B., Luo, W., Dai, J. and Takashima, A., Path-generating regulator along a straight passage for car-like robots, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control (2014), pp.1B15-1–1B15-12.
- Hayes, A. T., Martinoli, A. and Goodman, R. M., Distributed odor source localization, IEEE Sensors Journal, Vol.2, Issue 3 (2002), pp.260–271.
- Huang, W. H., Fajen, B. R., Fink, J. R. and Warren, W. H., Visual navigation and obstacle avoidance using a steering potential function, Robotics and Autonomous Systems, Vol.54, Issue 4 (2006), pp.288–299.
- Kanayama, Y. J. and Fahroo, F., A new line tracking method for nonholonomic vehicles, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1997), pp.2908-2913.
- 羅威, 花島直彦, 代軍, 大竹亘, 経路生成形レギュレータによる四輪型車両の直線・円弧追従, 第47回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集 (2015), pp.21–22.
- Marques, L., Martins, A. and De Almeida, A. T., Environmental monitoring with mobile robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2005), pp.3624–3629.
- 大迫政浩, 金容珍, 最終処分場における難分解性有機汚染物質の実態—ダイオキシン類の挙動を中心にして, 環境技術, Vol.29, No.12 (2000), pp.927-933.
- 大竹亘, 花島直彦, 羅威, 代軍, 高島昭彦, 経路生成形レギュレータを用いた自律移動車両の障害物回避, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.1 (2016), pp.40–47.
- 大谷充人, 花島直彦, 吉田英樹, 自律走行車両を用いた環境計測のための走行経路生成 要調査地判別のための予測モデルの検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集 (2015), 2P1-D05(1)–(4)
- Rimon, E. and Koditschek, D. E., Exact robot navigation using artificial potential functions, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.8, Issue 5 (1992), pp.501-518.
- 高島昭彦, 橋本幸男, 堀勝博, 花島直彦, 疋田弘光, 山下光久, 経路生成形レギュレータによる非ホロノミック車両のフィードバック制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.689 (2004), pp.120-126.
- 田中耕平, 藤原朱実, 木村直樹, 柘植義文, 異常検知のためのデータベースモデルを用いた正常状態予測法の予測精度の事前評価, 電子情報通信学会技術研究報告 R, 信頼性, Vol.111, No.253 (2011), pp.1–6.
- 樽海靖孝, 花島直彦, 代軍, 高島昭彦, 経路生成形レギュレータによる四輪車両の走行制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.801 (2013), pp.1693-1708.
- 豊田洋平, 一本洋平, 木村直樹, 柘植義文, データベースモデルを利用したボイラープラントの正常状態の予測, 電子情報通信学会技術研究報告 R, 信頼性, Vol.106, No.306 (2006), pp.7–12.
- 植野健太郎, 自律移動ロボットにおけるポテンシャル法を用いた安定した経路生成法の開発, 法政大学大学院紀要 (理工学・工学研究科編), Vol.56 (2015), (CD-ROM, online), available from <<http://repo.lib.hosei.ac.jp/handle/10114/10594>>, (参照日 2017年5月9日).
- Wallace, R., Stentz, A., Thorpe, C. E., Moravec, H., Whittaker, W. and Kanade, T., First results in robot road-following, Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.1 (1985), pp.66–71.
- Wang, D. and Xu, G., Full-state tracking and internal dynamics of nonholonomic wheeled mobile robots, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.8, No.2, (2003) pp.203-214.
- Yang, B., Hanajima, N., Yamamoto, A., Ayamura, M. and Dai, J., Path-generating regulator along a straight passage for two-wheeled mobile robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2013 (2013), pp.4837–4844.
- Zhang, F. and Leonard, N. E., Cooperative control and filtering for cooperative exploration, IEEE Transactions on

Automatic Control, Vol.55, No.3 (2010), pp.650–663.

### References

- Busby, D., Farmer, C. L. and Iske, A., Uncertainty evaluation in reservoir forecasting by Bayes linear methodology, *Algorithms for Approximation* (2007), pp.187–196, Springer.
- Chang, D., Wu, W., Webster, D. R., Weissburg, M. J. and Zhang, F., A bioinspired plume tracking algorithm for mobile sensing swarms in turbulent flow, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), pp.921–926.
- Connolly, C. I., Burns, J. B. and Weiss, R., Path planning using Laplace's equation, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1990), pp.2102–2106.
- De Luca, A., Oriolo, G. and Samson, C., Feedback control of a nonholonomic car-like robot, in *Robot Motion Planning and Control, Lectures Notes in Control and Information Sciences* 229, Springer (1998).
- Fabbiano, R., Canudas de Wit, C. and Garin, F., Source localization by gradient estimation based on Poisson integral, *Automatica*, Vol.50, Issue 6 (2014), pp.1715–1724.
- Hanajima, N., Yang, B., Luo, W., Dai, J. and Takashima, A., Path-generating regulator along a straight passage for car-like robots, *The 12th International Conference on Motion and Vibration Control* (2014), pp.1B15-1–1B15-12.
- Hayes, A. T., Martinoli, A. and Goodman, R. M., Distributed odor source localization, *IEEE Sensors Journal*, Vol.2, Issue 3 (2002), pp.260–271.
- Huang, W. H., Fajen, B. R., Fink, J. R. and Warren, W. H., Visual navigation and obstacle avoidance using a steering potential function, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.54, Issue 4 (2006), pp.288–299.
- Kanayama, Y. J. and Fahroo, F., A new line tracking method for nonholonomic vehicles, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1997), pp.2908-2913.
- Luo, W., Hanajima, N., Dai, J. and Otake, W., The straight and circle/arc passage tracking of four wheeled car-like robot by path-generating regulator , *Proceedings of 47th SICE Hokkaido branch conference* (2015), pp.21–22 (in Japanese).
- Marques, L., Martins, A. and De Almeida, A. T., Environmental monitoring with mobile robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2005), pp.3624–3629.
- Osako, M. and Kim, Y., The actual condition of persistent organic pollutants in final disposal sites - With a focus on behavior of Dioxins, *Journal of Environmental Conservation Engineering*, Vol.29, No.12 (2000), pp.927-933 (in Japanese).
- Otake, W. , Hanajima, N., Wei, L., Jun, D. and Takashima, A., Obstacle avoidance of autonomous ground vehicle using path-generating regulator, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.34, No.1 (2016), pp.40–47 (in Japanese).
- Otani, S., Hanajima, N. and Yoshida, H., Path generation for environment survey using UGV -Feasibility study of prediction model for discrimination of survey spots-, *Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2015), 2P1-D05(1)–(4) (in Japanese).
- Rimon, E. and Koditschek, D. E., Exact robot navigation using artificial potential functions, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.8, Issue 5 (1992), pp.501-518.
- Takashima, A., Hashimoto, Y., Hori, K., Hanajima, N., Hikita, H. and Yamashita, M., Feedback control of non-holonomic mobile robots by path-generating regulator , *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C* , Vol.70, No.689 (2004), pp.120–126 (in Japanese).
- Tanaka, K., Fujihara, A., Kimura, N. and Tsuge, Y., Advance estimate of accuracy of predicting normal state by using DB model for fault detection, *IEICE Technical Report R*, Vol.111, No.253 (2011), pp.1–6 (in Japanese).
- Taruumi, Y. , Hanajima, N. , Dai, J. and Takashima, A., Driving control of car-like robots by path-generating regulator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C* , Vol.79, No.801, (2013), pp.1693-1708 (in Japanese).
- Toyoda, Y., Ichimoto, Y., Kimura, N. and Tsuge, Y., Prediction of normal states of boiler plant using database model , *IEICE Technical Report R*, Vol.106, No.306 (2006), pp.7–12 (in Japanese).
- Ueno, K., Development of robust path planning algorithm for autonomous mobile robot via virtual obstacle, *Bulletin of graduate studies, Hosei University (Graduate school of Science and Engineering / Graduate school of Engineering)*,

Vol.56 (2015), (CD-ROM, online), available from <http://repo.lib.hosei.ac.jp/handle/10114/10594>, (accessed on 9 May, 2017) (in Japanese).

Wallace, R., Stentz, A., Thorpe, C. E., Moravec, H., Whittaker, W. and Kanade, T., First results in robot road-following, Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.1 (1985), pp.66–71.

Wang, D. and Xu, G., Full-state tracking and internal dynamics of nonholonomic wheeled mobile robots, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol.8, No.2, (2003) pp.203–214.

Yang, B., Hanajima, N., Yamamoto, A., Ayamura, M. and Dai, J., Path-generating regulator along a straight passage for two-wheeled mobile robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2013 (2013), pp.4837–4844.

Zhang, F. and Leonard, N. E., Cooperative control and filtering for cooperative exploration, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.55, No.3 (2010), pp.650–663.

## 付 録

5章におけるデータベースモデル(豊田等, 2006)(田中他, 2011)の適用について説明する。履歴データとして  $L$  組のデータ群が保存されているとする。ある  $p$  組目のデータにおいて,  $k$  番目の計測における位置ベクトル  $(x_{p,k}, y_{p,k})$  を入力ベクトル  $U(p, k)$ , 計測された環境データ  $f_{p,k}$  を出力ベクトル  $Y(p, k)$ , これらの組み合わせをレコード  $Z(p, k)$  とすると, 次式のように表せる。

$$U(p, k) = [x_{p,k}, y_{p,k}] \quad (15)$$

$$Y(p, k) = f_{p,k} \quad (16)$$

$$Z(p, k) = [Y(p, k-1), U(p, k)] \quad (17)$$

ここで, オリジナルのデータベースモデルでは, ある時刻  $t$  における  $Y(t)$  の予測値を  $\bar{Y}(t)$  とし,  $U(t)$  と 1 時刻前の予測出力変数ベクトル  $\bar{Y}(t-1)$  の組み合わせであるモデル入力  $S(t)$  を次のように定義している。

$$S(t) = [\bar{Y}(t-1), U(t)] \quad (18)$$

本論文では,  $Y(t)$ ,  $U(t)$  には, 2章で示した, 最新データ中の  $f_i$ ,  $[x_i, y_i]$  をそれぞれ用いた。インデックス  $i$  はデータを取得した順序である。また, 1 時刻前の予測値  $\bar{Y}(t-1)$  の代わりに観測値  $f_{i-1}$  を用いた。 $i$  をオリジナルのデータベースモデルの記法に合わせて  $t$  で表せば, 本研究で用いたモデル入力  $S(t)$  は次のようになる。

$$S(t) = [f_{t-1}, x_t, y_t] \quad (19)$$

次に,  $S(t)$  と  $Z(p, k)$  の類似度を次のユークリッド距離  $d(t, p, k)$  により評価する。

$$d(t, p, k) = \|S(t) - Z(p, k)\| = \sqrt{\{f_{t-1} - f_{p,k-1}\}^2 + \{x_t - x_{p,k}\}^2 + \{y_t - y_{p,k}\}^2} \quad (20)$$

$d(t, p, k)$  がある値よりも小さいものを  $S(t)$  の類似レコード  $Z(p_j, k_j)$  として採用する。 $p_j, k_j$  は類似レコードのインデックスであり,  $j = 1, \dots, M$  である。類似レコードの出力変数ベクトルの加重平均により予測値となるモデル出力  $\bar{Y}(t)$  を求める。

$$\bar{Y}(t) = \sum_{j=1}^M w_j Y(p_j, k_j) \quad (21)$$

この  $\bar{Y}(t)$  が, 本論文で用いる予測値  $\hat{f}_i$  である。ここで,  $w_j$  は次式で求められる加重係数であり, 出力に対する類似度の影響を決定する。

$$w_j = \frac{1 - \frac{d(t, p_j, k_j)}{\sum_{j=1}^M d(t, p_j, k_j)}}{\sum_{j=1}^M \left\{ 1 - \frac{d(t, p_j, k_j)}{\sum_{j=1}^M d(t, p_j, k_j)} \right\}} \quad (22)$$