

NAIST-IS-MT1551013

修士論文

照度場制御に基づくロボットナビゲーション

伊藤 涼介

2017 年 2 月 27 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

伊藤 涼介

審査委員：

杉本 謙二	教授	（主指導教員）
安本 慶一	教授	（副指導教員）
松原 崇充	准教授	（副指導教員）
南 裕樹	客員准教授	（副指導教員）
小林 泰介	助教	（副指導教員）

照度場制御に基づくロボットナビゲーション*

伊藤 涼介

内容梗概

本論文では、移動ロボットを任意の位置から目標位置に誘導するための新しいナビゲーション手法を提案する。提案手法は、ロボットが存在する空間の照度場を制御することにより、ロボットを目標位置に到達させるものである。具体的には、まず、画像データをプロジェクタを介してフィールド上に投影し、照度場を生成する。そして、照度場情報を光センサを用いてロボットが取得することで行動を決定する。

本論文では、まず、1台のロボットの誘導問題を対象とし、ロボットに実装するコントローラと画像（照度場）を生成するコントローラの設計問題を定式化した。そして、シンプルなロボットコントローラが与えられたとき、誘導を達成する3種類の最適な画像生成コントローラを導出した。さらに、実験システムを開発し、提案手法の有効性を確認した。最後に、発展問題として複数台のロボットの誘導制御問題に取り組んだ。

本論文の成果は、つぎの二つである。まず、位置情報を必要としない新しいナビゲーションシステムを提案したことである。従来のナビゲーション手法では、ロボットの位置情報を各種センサ（カメラやGPS）を用いて取得し、その情報をもとに目標位置に到達させる制御入力を決定する。そのため、正確な位置情報の取得が鍵となる。これに対して、提案システムでは位置情報を必要としない。これは、システムの低コスト化や単純化に貢献する。つぎに、コントローラの設計法を提案し、ロボットを目標位置に確実に誘導するための条件を理論的に明らかにしたことである。これにより、照度場情報でロボットが誘導可能であることを示した。

キーワード

移動ロボット, 誘導制御, 照度場, 可視光通信, プロジェクションマッピング

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1551013, 2017年2月27日.

Mobile robot navigation by illuminance field control*

Ito Ryosuke

Abstract

This study focuses on the navigation problem of mobile robots. As a novel approach to the problem, we propose an illuminance field control based navigation method. The proposed system is composed of a mobile robot, a projector, a photoelectric sensor, and two controllers; one controller is embedded in the projector and the other is embedded in the robot.

In the proposed method, a binary image is projected on to the field through a projector, then the mobile robot detects the binary data of the projected image by a photoelectric sensor and calculates a control input.

This study first considers the navigation problem of one robot, and formulates the design problem of two controllers: image generation controller and robot controller. Then, for a given simple robot controller, three optimal image generation controllers, which achieve robot navigation, are derived. In addition, an experimental system is developed and the effectiveness of the proposed method is verified by using the system. Finally, the navigation problem of multiple mobile robots is considered as an extension of single robot case.

Keywords:

Mobile Robot, Remote navigation, illuminance field, Visible light communication, Projection Mapping

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1551013, February 27, 2017.

目次

図目次	iv
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 照度場制御型ロボットナビゲーション	4
2.1 照度場制御型ナビゲーションシステム	4
2.2 コントローラ設計問題	4
2.3 実験システム	7
第 3 章 コントローラ設計	9
3.1 移動ロボットのモデル	9
3.2 問題設定	10
3.3 帯モデルでのナビゲーションシステム	14
3.4 円モデルでのナビゲーションシステム	18
3.5 螺旋モデルでのナビゲーションシステム	25
第 4 章 複数台ロボットナビゲーション	38
4.1 2 台同時誘導対応の螺旋モデルでのナビゲーションシステム	38
4.2 格子モデルでのナビゲーションシステム	38
4.3 同心円モデルでのナビゲーションシステム	40
第 5 章 おわりに	45
謝辞	46
参考文献	47

図目次

1	提案する誘導制御システム	2
2	照度場制御型ロボットナビゲーションシステムのブロック線図 . . .	4
3	提案システムにおけるコントローラ的设计イメージ	5
4	検証のために使用した実験装置	8
5	ロボットのパラメータ	9
6	帯モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ	11
7	帯モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ	11
8	円モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ	12
9	円モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ	12
10	螺旋モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ	13
11	螺旋モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ	14
12	帯モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case01	18
13	帯モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case02	18
14	帯モデルでのナビゲーションシステムのコントローラにおける例 外条件	19
15	帯モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	19
16	帯モデルでのナビゲーションシステムの実機検証	20
17	円モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい .	24
18	円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	25
19	円モデルでのナビゲーションシステムの実機検証	34
20	螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるま い case01	35
21	螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるま い case02	35

22	螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case03	36
23	螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラにおける例外条件	36
24	螺旋モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	37
25	螺旋モデルでの 2 台同時ナビゲーションシステムのシミュレーション	39
26	格子モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ	40
27	格子モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	41
28	3 台同時誘導に対応した格子モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	42
29	同心円モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ	43
30	同心円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	43
31	3 台同時誘導に対応した同心円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション	44

第 1 章 はじめに

本論文では，移動ロボットを任意の位置から特定の位置へ到達させる誘導問題を考える．従来の代表的な誘導制御の手法として，遠隔制御方式と自律制御方式がある．遠隔制御方式は目標位置とロボットの絶対位置の情報をもとに，ロボットの制御入力を決定し，それをネットワーク通信路を介してロボットに送信するものである [1][2][3][4]．対して，自律制御方式はロボット自身がオドメトリや SLAM により絶対位置を取得し，指定された目標位置に移動する制御入力を自律的に決定するものである [5][6][7][8][9][10]．両手法ともさまざまなアプローチがあるが，すべてに共通することはロボットの位置をセンサデータから把握し，それをコントローラにフィードバックするという点である．このロボットの位置情報の取得にはカメラや GPS，領域センサ，コンパスセンサといった外界センサやロータリーエンコーダ，ジャイロセンサ，加速度センサといった内界センサが用いられている．しかし，このようなセンサ類が正常に運用できない状況が考えられる．たとえば，

- カメラは，視界不良の環境下やプライバシー問題が発生する環境下では用いることができない
- GPS は，屋内や地下での使用は困難である
- 測域センサは，周囲に物体や障害物がない場合やレーザの反射を吸収する材質が存在する環境下では，有用な情報が取得できない

といった問題である．他のセンサにおいても導入コストの削減に起因して利用ができない場合も考えられる．仮に利用できたとしても，センサノイズや通信遅延などの問題が発生する可能性もあり，何らかの対策が必要となる [11][12][13]．

本論文では，ロボットの位置情報を利用せずに位置情報を達成する新しい遠隔制御方式を提案する．本論文で提案する方法は，図 1 に示すようにロボットが存在するフィールド上に 2 値画像を投影し，照度場を生成する．そして，その照度場の色情報をロボットが光センサを用いて取得することで誘導制御を達成するものである．これは生物の走光性（具体例では蛾やハエなどが光に集まる習性）に着想を得ている [14]．提案手法では，2 値画像を生成する画像生成コントローラと光センサの情報を処理して制御入力を決定するロボットコントローラを組み合わせることで

誘導制御が達成される．たとえば，ライントレースカーのように，ある特定の色の領域内でロボットが動き回るようにロボットコントローラを実装する．そして，画像生成コントローラでその領域を時々刻々と目標位置に向かって移動させるように画像列を生成すれば，誘導制御が達成できると考えられる．

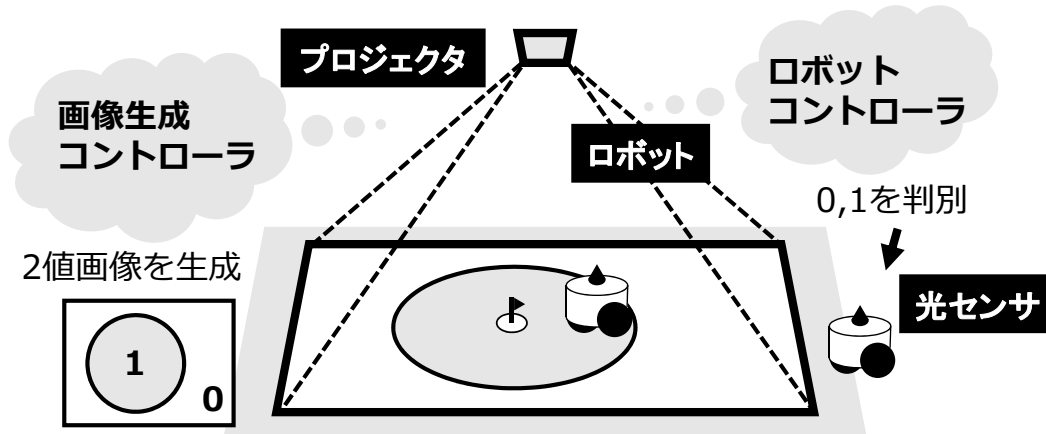


図1 提案する誘導制御システム

本論文は任意の初期位置から目標位置にできるだけ早く到達させるためのコントローラを設計することを目的とする．これにより，図1に示しているロボットコントローラと画像生成コントローラの設計が重要になる．この2つのコントローラの設計には，

1. コントローラ K_R が与えられたとき，コントローラ K_I を設計する
2. コントローラ K_I が与えられたとき，コントローラ K_R を設計する
3. コントローラ K_R と K_I を同時に設計する

の3つの方法が考えられる．本論文では照度場制御に注目し，1のアプローチでコントローラ設計に取り組む．つまり，本論文では，ロボットの動作があらかじめコントローラ K_R によって決められているときに，どのような照度場を生成すれば誘導できるかという問題に対するひとつの答えを与える．

本論文では，2章で提案手法の概要を示して一般的な制御問題を定式化する．3章では，ロボット1台のナビゲーションシステムとして帯モデルと円モデル，螺旋モデルの3種類のシステムを示し，問題設定を行う．そして，問題の解として，最

適な画像生成コントローラを与える．また，シミュレーションと実機実験をとおし
て提案手法の有効性を検証する．4 章では，3 章の発展としてロボットを複数台で
同時誘導を行うシステムを提案する．まず，ロボット 2 台の同時誘導に対応したシ
ステムとして螺旋モデルでのナビゲーションシステムを示す．つぎに，ロボット 3
台以上の同時誘導に対応したシステムとして格子モデルと同心円モデルでの 2 つの
ナビゲーションシステムを示す．

最後に以下の点を強調しておく．

まず，一般的な可視光通信 [15] による制御とは異なっていることである．情報を
光そのものに付加して送信する従来の可視光通信の概念と異なり，光の形状を時々
刻々と変化させることが提案手法である．本論文では光源としてプロジェクタを考
えているが照明機器を利用することも可能であると考えている [16][17]．このこと
から，本論文の成果は，照明システムの新しい形を示す重要なものであるとも考え
られる．

つぎに，光で駆動する分子ロボットの制御へ応用できる可能性があることである．
近年，光エネルギーそのものを動力源とするゲルアクチュエータが開発 [18]，されて
おり，それを用いて分子ロボットを作成することが期待されている．本論文の成果
はこのような光刺激型分子ロボットに対するひとつの制御手法になり得ると考えて
いる．

最後に，画像のプロジェクタ投影によるロボット制御は，プロジェクションマッ
ピング [19] の研究に関連する．しかし，一般的なプロジェクションマッピングは静
的あるいは動的な物体上に画像を投影することを主目的としている．よって，投影
された画像情報でロボットを制御するといった試みはこれまでになかった．

一方で，照度場を制御するというアプローチの関連研究として生物の走性を規範
としたロボット制御の研究がある．しかしこれらの研究は，光の強弱の情報（ポテ
ンシャル情報）を利用するものである．したがって，0 と 1 の情報のみでロボット
を誘導する本論文のアプローチとは異なっている．この意味において，本論文の成
果は新規性があると考えられる．

[表記] $\mathbb{R}, \mathbb{R}_+, \mathbb{N}$ はそれぞれ，実数の集合，正の実数の集合，自然数の集合を表す．
また， I は単位行列である．

第 2 章 照度場制御型ロボットナビゲーション

2.1 照度場制御型ナビゲーションシステム

本論文では，ロボットとプロジェクタ，そして光センサから構成される図 1 のシステムを考える．このシステムでは，まず，2 値画像を生成し，それをプロジェクタでフィールド上に投影する．つぎに，光センサを介してロボットが 2 値情報 (0 または 1) を取得する．そして，取得した 2 値情報をもとに制御入力を決定することでロボットを制御する．

提案するシステムのブロック線図を図 2 に示す． K_I はロボットの目標位置 r をもとに画像 w を生成するコントローラ， K_R は光センサの情報 v をもとに制御入力 u を決定するコントローラである．そして P は画像 w をフィールド上に投影するプロジェクタであり， S は投影された画像 ϕ の輝度値 v を取得するセンサである．図 2 に示すように，ロボットの位置情報を利用せずに誘導制御を実現するシステムとなっている．たとえば，コントローラ K_I, K_R について図 3 を考える． K_I は目標位置を内部に含む図形を生成し，その図形を時間の経過とともに目標位置を含みつつ縮小させるようにする．このとき， K_R はロボットが図形の中で動き続けるようなものを設定する．これらの 2 つのコントローラの組み合わせにより，ロボットを任意の初期位置から特定の目標位置に到達させることができる．

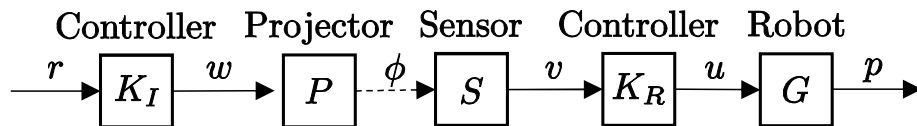


図 2 照度場制御型ロボットナビゲーションシステムのブロック線図

2.2 コントローラ設計問題

以下では，一般的な照度場制御型ロボットナビゲーション問題を定式化する．

まず，ロボットは有限領域 $Q \subset \mathbb{R}^2$ の中で動くとする．そして，ロボットの位置

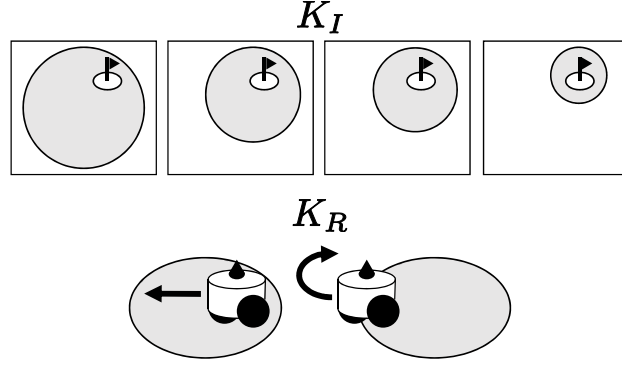


図3 提案システムにおけるコントローラ的设计イメージ

と姿勢を $q = [x, y, \theta]^T \in \mathbb{R}^3, q(0) = q_0 \in \mathbb{R}^3$ としてロボットのダイナミクスを

$$G : q(t+1) = f(q(t), u(t)) \quad (1)$$

とする．このとき，ロボット位置を $p = [x, y]^T, p(0) = p_0 \in \mathbb{R}^2$ と別途定義する． $t \in 0 \cup \mathbb{N}$ は離散時刻， $u \in \mathbb{R}^3$ は制御入力である．初期位置は $q_0 \in \mathbb{R}^n$ によって， $q(0) = q_0$ と与えられる．

つぎに，プロジェクタ P は

$$P : \phi(t) = CDTw(t) \quad (2)$$

として与えられる．ただし， $w \in \{0, 1\}^{MN}$ はコントローラ K_I により生成される $M \times N$ の画像， $\phi \in [0, 1]^{\mu v}$ は $\mathbb{Q}$ 上に投影される $\mu \times v$ の照度場であり， $C \in \mathbb{R}^{MN \times MN}$ はぼけ行列， $D \in \mathbb{R}^{\mu v \times MN}$ はダウンサンプリング行列， $T \in \mathbb{R}^{MN \times MN}$ は変形行列 (pixel と m のスケール変換を含む) を表す．行列 C, D, T は，プロジェクタの性能やプロジェクタの設置方法などによって決まるものであり，あらかじめ取得しておくことができる．

光センサ S は

$$S : s(t) = g(\phi(t), p_s(t)) \quad (3)$$

とする．ただし，関数 $g : [0, 1]^{\mu s} \times \mathbb{Q} \rightarrow \{0, 1\}$ は，プロジェクタ P によって $\mathbb{Q}$ 上に投影された画像情報に対して，ロボット位置での情報 (0 または 1) を取得するものである． g の具体的な形はセンサの性能や輝度値をどのように利用するかという仕様から決まる．また， $p_s(t) \in \mathbb{R}^2$ はセンサ取付位置の座標をさす．

最後にコントローラ K_I, K_R は以下のとおりである．まず，コントローラ K_R は

$$K_R : \begin{cases} \xi(t+1) = h_1(\xi(t), s(t)) \\ u(t) = h_2(\xi(t), s(t)) \end{cases} \quad (4)$$

である．ただし， $h_1 : \mathbb{R}^{n_1} \times \{0, 1\} \rightarrow \mathbb{R}^{n_1}, h_2 : \mathbb{R}^{n_1} \times \{0, 1\} \rightarrow \mathbb{R}^m$ であり，光センサで取得した情報 $s(t)$ を利用してどのようにロボットを動かすかを決定する関数である．コントローラ K_I は

$$K_I : \begin{cases} \zeta(t+1) = h_3(\zeta(t), r) \\ w(t) = h_4(\zeta(t), r) \end{cases} \quad (5)$$

である． $M \times N$ の 2 値画像 w を生成するが，各画素の 0 または 1 を決定するための情報が $\zeta \in \mathbb{R}^{n_2}$ で， $r \in \mathbb{R}^2$ は目標位置である．たとえば，円状の図形を描画する場合， ζ は円の半径 (または，直径)，帯状の図形を描画する場合， ζ は帯の長さに対応する．また，関数 $h_3 : \mathbb{R}^{n_2} \times \mathbb{R}^{n_2} \rightarrow \mathbb{R}^{n_2}$ は変数 ζ の時間発展を与えるものであり， $h_4 : \mathbb{R}^{n_2} \times \mathbb{R}^{n_2} \rightarrow \mathbb{R}^{MN}$ は ζ と目標位置 r の情報から 2 値画像を生成する関数である．

本論文で考える照度場制御型ロボットナビゲーション問題はロボット G ，プロジェクト P ，光センサ S が与えられたときに，ロボットが任意の位置 p_0 から目標位置 r に到達するためのコントローラ K_I, K_R (すなわち，関数 h_1, h_2, h_3, h_4) を求めるというものである．

コントローラ K_I, K_R の組み合わせにより，さまざま解が得られると考えられる．たとえば， K_I と K_R の次数をどのように設定するかや，確定的または確率的のどちらを選択するなどの自由度がある．本論文では 2 次元での問題に対して，次数ができるだけ小さい確定的なコントローラ K_I, K_R を設計することを試みる．この試みとして，1 章で示したように

1. コントローラ K_R が与えられたとき，コントローラ K_I を設計する
2. コントローラ K_I が与えられたとき，コントローラ K_R を設計する
3. コントローラ K_R と K_I を同時に設計する

が考えられる．本論文では第一段階として 1 の方法でコントローラの設計に取り組むものとする．

コントローラの設計において、濃淡画像を投影して、その濃淡を光センサで取得することも可能であると考えられる。しかし、ここでは光センサでは 0, 1 のみが判定できるものとする。これはシンプルな光センサが利用できることを意味する。また、光センサの値を 0,1 に限定すれば、外からの光により、濃淡情報が失われる状況においても正常に動作することが期待できる。このことから、本論文の設定は実用上価値のある設定であると考えている。その一方、濃淡情報ではなく 2 値情報を扱うことにより制御問題が自明でなくなる。実際、濃淡情報であればロボットを進ませる方向を指定することができるが 2 値情報ではそれができないことからコントローラ設計が困難となる。

2.3 実験システム

本論文のために構築した実験環境外観を図 4 に示す。

プロジェクタには SmartBeam を採用し、2 値画像を Processing によって生成している。これを移動ロボット (ZumoRobot) が光センサ (CMUcam5Pixy) を介して制御することができる。これらの諸元は表 2.1 にまとめる。

また、2 値画像を投影するプロジェクタはフィールドから 1200[mm] の距離 (投影距離) にあり、投影されるフィールドの大きさは 750[mm]x570[mm]、このフィールド上を移動するロボットは 70[mm]x65[mm] の大きさである。

表 1 各種仕様

名称	項目	数値 [単位]
SmartBeam	解像度	640x480[pixel]
	投影距離	0.2 3.0[m]
ZumoRobot	移動速度	0.065[m/s]
Arduino	動作周波数	16[MHz]
CMUcam5Pixy	センサ解像度	640x400[pixel]
	フレームレート	50[fps]

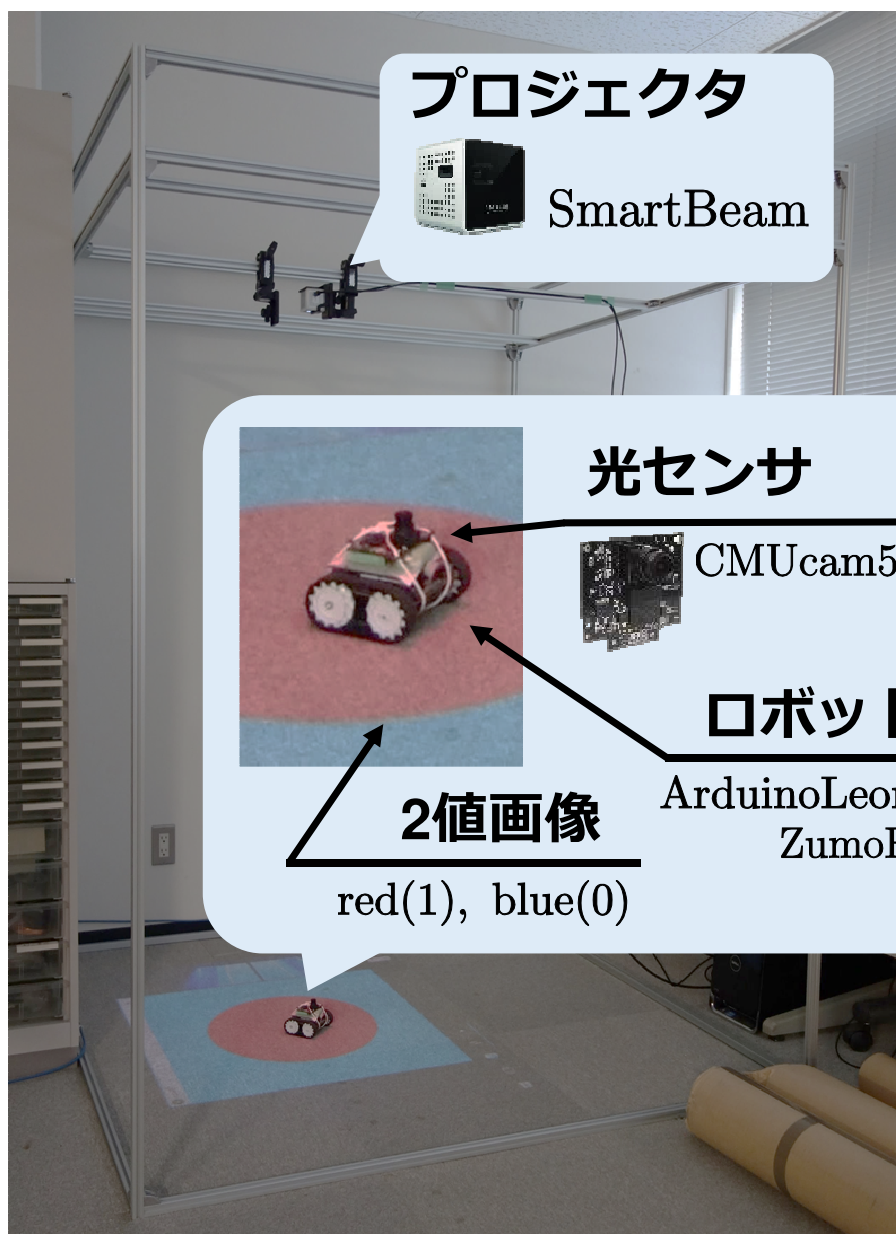


図 4 検証のために使用した実験装置

第 3 章 コントローラ設計

3.1 移動ロボットのモデル

本論文で考える移動ロボットのモデル（独立駆動輪型）は図 5 のように表すことができる．ロボットは (x, y) 平面に置かれているとし，図 5（右）に示すように， $p(t) = [x(t), y(t)]^\top \in \mathbb{R}^2$ がロボットの位置， $\theta(t) \in \mathbb{R}$ がロボット本体の姿勢であり， $V \in \mathbb{R}_+$ と $\Omega (= \pi/q) \in \mathbb{R}_+$ はそれぞれ単位時間当たりのロボットの並進速度と旋回速度である．加えて，図 5 の右側で示している $p(t)$ と $p_s(t) = [x_s(t), y_s(t)]^\top \in \mathbb{R}^2$ の座標は光センサの取付位置の座標であり，相対距離を $L \in \mathbb{R}_+$ とする．

また，本論文では，ロボットのダイナミクスは

$$\begin{aligned} q(t+1) &= q(t) + u(t) \\ \begin{bmatrix} x(t+1) \\ y(t+1) \\ \theta(t+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} + u(t) \end{aligned} \quad (6)$$

となる． $u(t) \in \mathbb{R}^3$ は入力である．ロボットは独立駆動輪型なので，実際は 2 入力であるが，あとに示すように，ロボットの運動を並進とその場での旋回に限定する．これを踏まえ，それらの運動を実現する 3 入力を考えることにする．

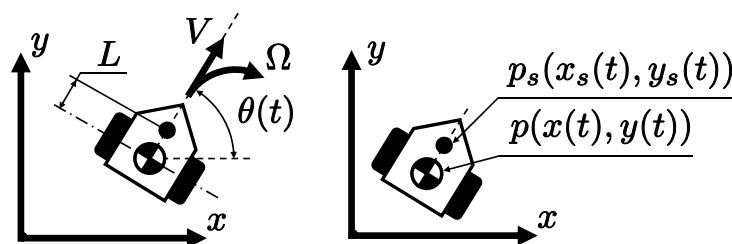


図 5 ロボットのパラメータ

3.2 問題設定

まず，2章で示したプロジェクタ P とセンサ S は，それぞれ，

$$P : \phi(t) = Tw(t) \quad (7)$$

$$S : s(t) = \phi_{p_s}(t) \quad (8)$$

とする．このとき，式 (7) の T は $T = \rho I$ で表され， ρ はスケール変換係数 (pixel $\rightarrow$ m) である．加えて，2章で定義した C (ぼけ行列) や D (ダウンサンプリング行列) は考えないものとして扱う．また，式 (8) の $\phi_{p_s}(t)$ は生成される照度場 $\phi(t)$ の光センサの位置 $p_s(t)$ での値を示す．

つぎに，本論文でロボットに実装するコントローラ K_R を

$$K_R : u(t) = \begin{cases} t_s V \begin{bmatrix} \cos \theta(t) \\ \sin \theta(t) \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } s(t) = 1 \\ t_s \Omega \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

とする．このコントローラによって光センサの2値情報をもとに $s(t) = 1$ の場合は前進， $s(t) = 0$ の場合はその場での旋回を実現する．

以上のシステムを既知として，画像生成コントローラ K_I の設計問題を定式化する．本論文では，ロボット1台を誘導するための画像生成コントローラとして帯状図形（帯モデル），円図形（円モデル），螺旋図形（螺旋モデル）の2値画像を生成する3種類のコントローラを提案する．

まず，最もシンプルな帯モデルでのナビゲーションシステムを考えてみる．問題としては， x 軸方向に伸びる帯状の2値画像を考える．そして，この帯の長さを時々刻々と減少させることで任意の目標位置への誘導を行うものである（図6）．画像生成コントローラ K_I は

$$K_I : \zeta(t+1) = \zeta(t) - \beta(t) \quad (10)$$

となる．式 (10) 中の $\zeta(t)$ が帯の長さ， $\beta(t)$ が単位時間あたりの $\zeta(t)$ の減少幅であり，図7のように示される．なお，2章では，コントローラ K_I に関数 h_4 が含

まれているが，ここでは， $\zeta(t)$ の情報から帯状図形を描画するものに対応する（設計パラメータは含まれないため，以降では省略する）．また，目標位置は簡単のため $r = 0$ とする．ロボットをできるだけ早く目標位置に到達させることを目標とした場合，式 (10) の $\beta(t)$ をできるだけ大きく設定すればよい．しかし， $\beta(t)$ が極端に大きくなってしまうとロボットの行動が追い付かず，帯状の領域から脱落してしまう．したがって，この脱落が発生しないことを保証する最大の $\beta(t)$ を導出する必要がある．そこでつぎの問題を考える．

問題 1 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする．このとき，できるだけ速やかにロボットが目標位置に到達するように，式 (10) の帯状図形画像生成コントローラ K_I のパラメータ $\beta(t) \in \mathbb{R}_+$ を決定せよ．

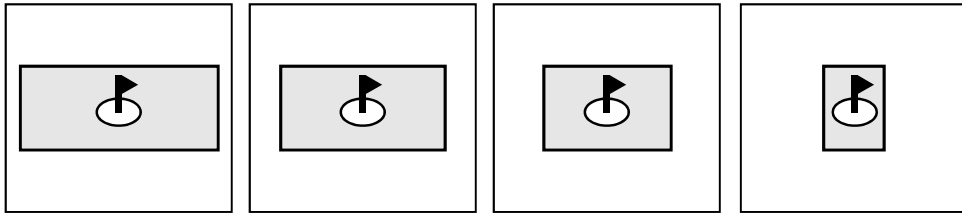


図 6 帯モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ

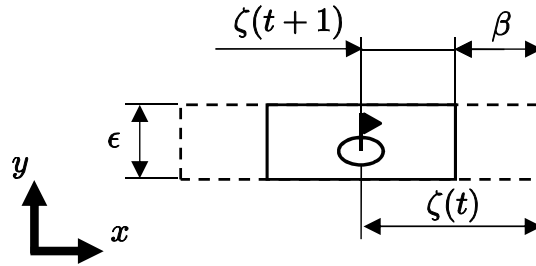


図 7 帯モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ

つぎに円モデルでのナビゲーションシステムを考える．問題としては，円状の 2 値画像を考える．そして，この円の半径を時々刻々と減少させることで円の中心点である目標位置への誘導を可能とする (図 8)．式 (10) 中の $\zeta(t)$ が円の半径， $\beta(t)$

が単位時間あたりの $\zeta(t)$ の減少幅であり，図 9 のように示される．ロボットをできるだけ早く目標位置に到達させることを目標とした場合，式 (10) の $\beta(t)$ をできるだけ大きく設定すればよい．しかし， $\beta(t)$ が極端に大きくなってしまうとロボットの行動が追い付かず，円状の領域から脱落してしまう．したがって，この脱落が発生しないことを保証する最大の $\beta(t)$ を導出する必要がある．そこでつぎの問題を考える．

問題 2 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする．このとき，できるだけ速やかにロボットが目標位置に到達するように，式 (10) の円図形画像生成コントローラ K_I のパラメータ $\beta(t) \in \mathbb{R}_+$ を決定せよ．

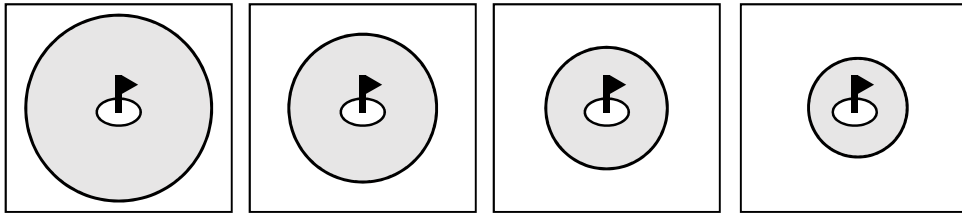


図 8 円モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ

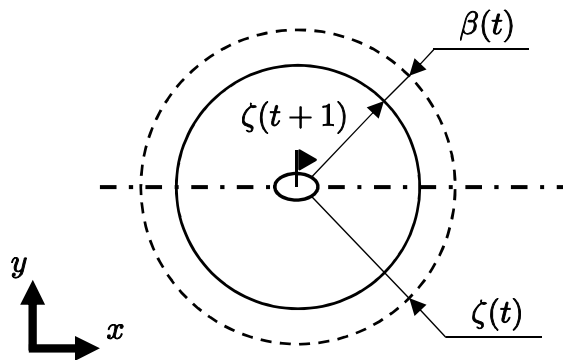


図 9 円モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ

最後に，螺旋モデルでのナビゲーションシステムを考えてみる．問題としては，螺旋状の 2 値画像を考える．そして，この螺旋の長さを時々刻々と減少させること

で螺旋状の領域の上に設定した目標位置への誘導を可能とする (図 10). また, 螺旋を表現する数式はいくつかあるが, 今回は周間の距離が一定となるアルキメデス螺旋を導入した. この方程式は極座標で

$$\gamma(t) = M\zeta(t) \quad (11)$$

のように表される. 式中の $M \in \mathbb{R}$ は定数, $\zeta(t)$ が螺旋状の領域を示す角度である. 式 (10) 中の $\beta(t)$ が単位時間あたりの $\zeta(t)$ の減少幅, $M\zeta(t)$ が角度 $\zeta(t)$ のときの原点からの距離 ($\gamma(t)$) であり, 図 11 のように示される. ロボットをできるだけ早く目標位置に到達させることを目標とした場合, 式 (10) の $\beta(t)$ をできるだけ大きく設定すればよい. しかし, $\beta(t)$ が極端に大きくなってしまうとロボットの行動が追いつかず, 螺旋状の領域から脱落してしまう. したがって, この脱落が発生しないことを保証する最大の $\beta(t)$ を導出する必要がある. そこでつぎの問題を考える.

問題 3 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする. このとき, できるだけ速やかにロボットが目標位置に到達するように, 式 (10) の螺旋図形画像生成コントローラ K_I のパラメータ $\beta(t) \in \mathbb{R}_+$ を決定せよ.

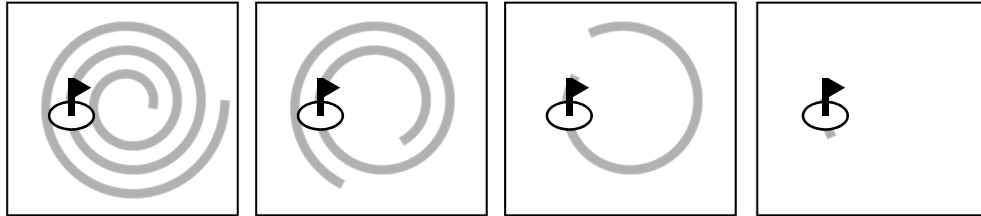


図 10 螺旋モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ

ロボットが領域外に出たあと有限時間で領域内に戻るという条件を $\alpha(t)/\delta(t)$ で表すと, 式 (10) の $\beta(t)$ は,

$$\beta(t) \leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} \quad (12)$$

を満たす必要がある. $\delta(t)$ は領域外にロボットが出たときに再度領域内に突入するために必要な単位時間数, $\alpha(t)$ はその単位時間数の間での $\zeta(t)$ の減少幅である. 以

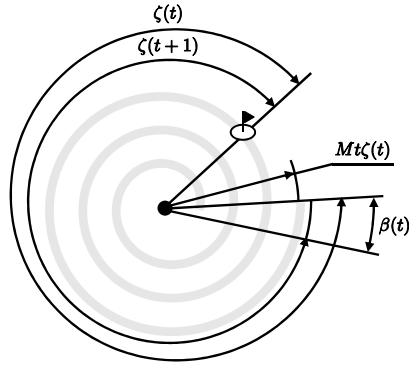


図 11 螺旋モデルにおけるコントローラ K_I のパラメータ

降では，最悪ケース ($\alpha(t)/\delta(t)$ が最小となるケース) を考えることで， $\beta(t)$ が満たすべき条件を導出する．そして，その条件を満たす最大の $\beta(t)$ を決定することで問題の解を与える．

注意 1 各モデルでのナビゲーションシステムではそれぞれ異なる目的で誘導問題を解決している．まず，帯モデルは 1 軸方向の誘導のみを考えており，その帯状の領域はロボットの初期位置と目標位置の 2 点を結ぶ直線上になければ誘導することができない．よって，2 次平面上を自由に誘導できる問題となっていない．この問題を解決するモデルが円モデルと螺旋モデルである．円モデルはロボットの初期位置が円状の領域内にあれば目標値である円の中心に誘導することができるモデルとなっている．これに加えて螺旋モデルを提案しているのは，論文中に発展的課題としている複数台の同時誘導問題を解決するためである．これは円モデルと同様に，一つの螺旋上の領域を投影することで 2 次平面上を自由に誘導できる問題となっているが，この螺旋上の領域に，巻き方向が反対の螺旋状の領域を加えることによって 2 台同時誘導が可能なモデルとなっている．

3.3 帯モデルでのナビゲーションシステム

3.2 節で帯モデルでのナビゲーションシステムにおける問題 1 を設定した．本節では，この問題の解を示す．そして，帯モデルでのナビゲーションシステムを実現

したシミュレーションを示す．また，ロボットの実機実験も行った．この結果も示す．

問題 1 の解は以下の定理で与えられる．

定理 1 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする．そして， $2L > V$ を仮定する．このとき，ロボットを目標位置に最も早く到達させる β は，

$$\beta = \min \left\{ V, \frac{\Omega(2L - V)}{\pi + \Omega} \right\} \quad (13)$$

である．

証明 1 まず，定理 1 の $\beta = V$ を導く．そのため，図 12 に示すように時刻 t において，センサ取付位置座標 $p_s(t)$ が帯状の領域 ($s(t) = 1$) の境界線上にあり，ロボットの姿勢が $\theta(t) = \pi$ のときを考える．このときの $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} x_s(t) = \zeta(t) \\ y_s(t) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

と表すことができる．センサは帯状の領域内に存在するため，コントローラ K_R より時刻 $t + 1$ で $\theta(t)$ 方向に V だけ直進する．このときの $p_s(t + 1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t + 1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) = \zeta(t) - V \\ y_s(t + 1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

である．このときセンサが帯状の領域内に存在するためには時刻 t から時刻 $t + 1$ の間に $\zeta(t)$ を V 以上を減少させるとロボットが帯状の領域に戻ることができなくなる．よって図 12 の状況を考えてとき $\beta(t)$ は領域外にロボットが出たときに再度領域内に突入するために必要な単位時間数 δ とその単位時間数の間での $\zeta(t)$ の減少幅 α から，

$$\beta(t) \leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} = \frac{V}{1} = V \quad (16)$$

となり， $\beta = V$ を導くことができた．

つぎに，定理 1 の $\beta = \Omega(2L - V)/(\pi + \Omega)$ を証明する．図 13 に示すように，センサの取付位置座標 $p_s(t)$ が帯状の領域 ($S(t) = 1$) の境界線上にあり，ロボットの姿勢が $\theta(t) = 0$ のときを考えている．このときの $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} x_s(t) = \zeta(t) \\ y_s(t) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

であり，ロボットの旋回中心座標 $p(t)$ は

$$\begin{cases} x(t) = x_s(t) - L \cos(\theta(t)) = \zeta(t) - L \\ y(t) = y_s(t) - L \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

と表すことができる．センサは帯状の領域内に存在するため，コントローラ K_R より時刻 $t + 1$ では V だけ領域から遠ざかる．このときの $p_s(t + 1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t + 1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) = \zeta(t) + V \\ y_s(t + 1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

であり， $p(t + 1)$ は

$$\begin{cases} x(t + 1) = x(t) + V \cos(\theta(t)) = \zeta(t) - L + V \\ y(t + 1) = y(t) + V \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

となる．このときセンサは帯状の領域外に存在するため，コントローラ K_R よりセンサは $p(t + 1)$ を中心とした半径 L の円を描くセンサ位置が最も帯状の領域に深く侵入するときの座標は

$$\begin{cases} (\bar{x} - x(t + 1))^2 + y^2 = L^2 \\ \bar{y} = y(t + 1) \end{cases} \quad (21)$$

で表される連立方程式の解として与えられる

$$\bar{x} - (\zeta(t) - L + V)\bar{x} + (\zeta(t) - L + V)^2 - L^2 = 0 \quad (22)$$

となる．2 次方程式の解の公式から x は

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{2(\zeta(t) - L + V) \pm \sqrt{4(\zeta(t) - L + V)^2 - 4((\zeta(t) - L + V)^2 - L^2)}}{2} \\ &= \zeta(t) - L + V \pm L \end{aligned} \quad (23)$$

となり，求めたい交点は図 13 の幾何学的関係から $(\zeta(t) - 2L + V, 0)$ とわかる．センサが交点の位置に到達するときの時刻を $t + \delta$ とすれば， α は

$$\alpha = \zeta(t) - \zeta(t + \delta) = \zeta(t) - (\zeta(t) - 2L + V) = 2L - V \quad (24)$$

と表される．また， $p_s(t + \delta)$ は

$$\begin{cases} x_s(t + \delta(t)) = x(t + 1) + L \cos(\theta(t + \delta(t))) = \zeta(t) - 2L + V \\ y_s(t + \delta(t)) = y(t + 1) + L \sin(\theta(t + \delta(t))) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

となる．このとき， $p_s(t + 1)$ と $p_s(t + \delta)$ の位置関係からロボットの姿勢は $\theta(t + \delta) = \pi$ で表される．よって，時刻 $t + \delta$ までのロボットの旋回量は $\theta(t + \delta) - \theta(t) = \pi$ となり，このロボットの旋回にかかる必要単位時間はロボットの単位時間当たりの旋回量 Ω より π/Ω となる．このことから δ は

$$\delta(t) = \frac{\pi}{\Omega} + 1 \quad (26)$$

と導くことができる．センサが帯状の領域に存在するためには時刻 t から時刻 $t + \delta$ の間に $\zeta(t)$ から α 以上を減少させるとロボットが帯状の領域に戻ることはできなくなる．よって図 13 の状況を考えたとき β は

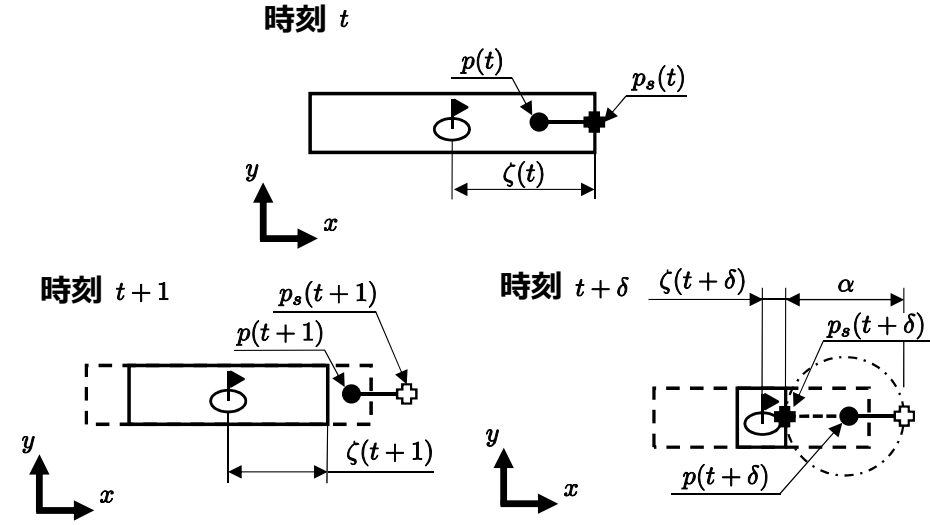
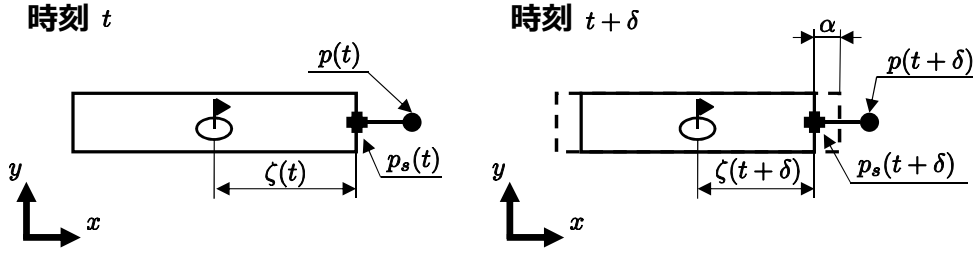
$$\beta \leq \frac{\alpha}{\delta} = \frac{2L - V}{\frac{\pi}{\Omega} + 1} = \frac{\Omega(2L - V)}{\pi + \Omega} \quad (27)$$

となり， $\beta = \Omega(2L - V)/(\pi + \Omega)$ を導くことができた．

最後に， L と V は $2L > V$ の関係にあるのは図 14 に示されるように V が $2L$ より大きくなった場合，時刻 $t + 1$ の状況のようになり領域内に再度突入するのは $\beta(t)$ の定義から幾何学的に不可能となるからである．

以上の問題設定と主結果から帯モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーションを行った．以下にそのスナップショットを図 15 に示す．パラメータは $\zeta(0) = 10, L = 1, V = 1.5, \Omega = \pi, \epsilon = 0.0001$ としてロボットの初期座標は $x = 8$ とした．また，目標値は $x = 0$ としている．

このシミュレーションをもとに各パラメータの値を調整し，実機検証を行った．図 19 に示される通り，シミュレーションで確認できた応答を実機検証でも見ることができた．



注意 2 ここでまとめた諸元には提案手法における誘導問題の定式化と実機検証に使った実機とのパラメータ誤差が生じている．しかし，このような環境下で得られた実機のパラメータを用いても誘導問題を達成できたことは本研究の成果と考えている．ただし，その影響を考慮した β の設計問題は無視すべきでなく，今後の課題として考えている．

3.4 円モデルでのナビゲーションシステム

3.2 節で帯モデルでのナビゲーションシステムにおける問題 2 を設定した．本節では，この問題の解を示す．そして，円モデルでのナビゲーションシステムを実現

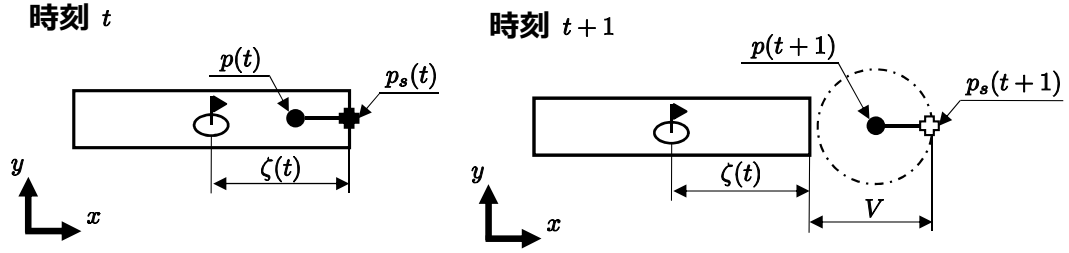


図 14 帯モデルでのナビゲーションシステムのコントローラにおける例外条件

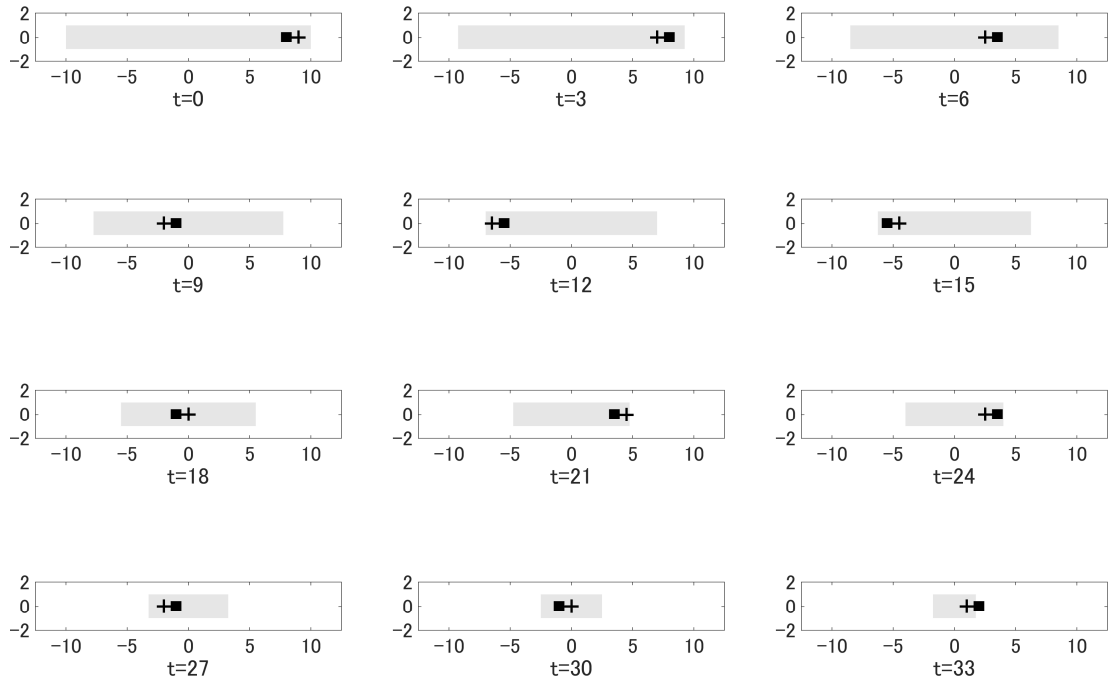


図 15 帯モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

したシミュレーションを示す．また，ロボットの実機実験も行った．この結果も示す．

問題 2 の解は以下の定理で与えられる．

定理 2 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする．そして $2L > V$ を仮定する．このとき，ロボットを目標位置

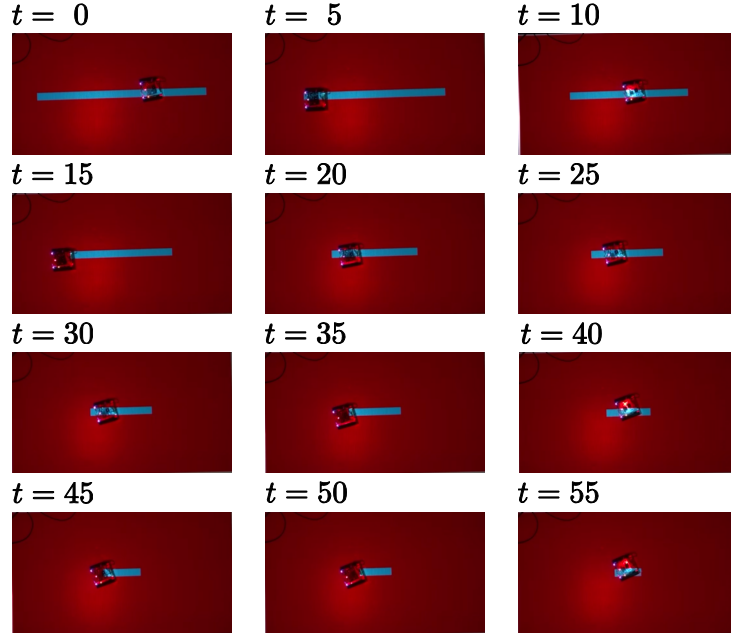


図 16 帯モデルでのナビゲーションシステムの実機検証

に最も早く到達させる $\beta(t)$ は,

$$\begin{aligned}
 \beta(t) &= \min\{\beta_1, \beta_2, \beta_3(t)\} \\
 \beta_1 &= V \\
 \beta_2 &= \frac{\Omega(2L - V)}{\pi + \Omega} \\
 \beta_3(t) &= \frac{\Omega \sqrt{(\zeta(t) + V \cos \theta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + (y_s(t + \delta(t)) - V \sin \theta(t))^2}}{2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t))) + \Omega}
 \end{aligned} \tag{28}$$

である。また, $\beta_3(t)$ の各パラメータは

$$\begin{aligned}
 x_s(t) &= \frac{2\zeta(t)^2 - L^2}{2\zeta(t)} \\
 y_s(t) &= -\sqrt{\zeta(t)^2 - x_s(t)^2} \\
 \theta(t) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan\left(\frac{\zeta(t) - x_s(t)}{-y_s(t)}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_s(t + \delta(t)) &= \sqrt{\frac{\zeta(t)^2}{1 + \frac{V \sin \theta(t)}{\zeta(t) + V \cos \theta(t)}}} \\
y_s(t + \delta(t)) &= \frac{V \sin \theta(t)}{\zeta(t) + V \cos \theta(t)} x_s(t + \delta(t)) \\
\theta(t + \delta(t)) &= \pi - \arctan \left(\frac{y_s(t + \delta(t)) - V \sin \theta(t)}{\zeta(t) + V \cos \theta(t) - x_s(t + \delta(t))} \right) \quad (29)
\end{aligned}$$

で表される.

証明 2 まず, 定理 2 の β_1 と β_2 は帯モデルが半径が無限大の円モデルとして考えることができるので, 定理 1 の証明 1 から示せる. また, L と V は $2L > V$ の関係にあることも証明 1 から証明できる.

つぎに, 定理 2 の $\beta_3(t)$ を証明する. 円モデルは, 先の帯モデルと違い領域の境界線が直線 (半径が無限大) ではなく時系列で変化する曲線であることに注目する. この際の $\beta(t)$ が最小となるような状況を考える必要がある. ここで導かれる $\alpha(t)$ と $\delta(t)$ は図 17 の時刻 t のような状況を考えている. また, $\delta(t)$ は領域外にロボットが出たときに再度領域内に突入するために必要な単位時間数, $\alpha(t)$ はその単位時間数の間での $\zeta(t)$ の減少幅である. この状況は, ロボットの旋回中心座標 $p(t)$ が円状の領域 ($s(t) = 1$) の境界線上にあり, センサの取付位置座標 $p_s(t)$ も同様に円状の領域の境界線上にある状況を考えている. このときの $p(t)$ は

$$\begin{cases} x(t) = \zeta(t) \\ y(t) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

とでき, $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = \zeta(t)^2 \\ (\bar{x} - x(t))^2 + (\bar{y} - y(t))^2 = L^2 \end{cases} \quad (31)$$

で表される連立方程式の解で示される座標であり,

$$\begin{cases} x_s(t) = \frac{2\zeta(t)^2 - L^2}{2\zeta(t)} \\ y_s(t) = -\sqrt{\zeta(t)^2 - x_s(t)} \end{cases} \quad (32)$$

とできる．また，ロボットの姿勢 $\theta(t)$ は

$$\theta(t) = \frac{3}{2}\pi - \arctan\left(\frac{\zeta(t) - x_s(t)}{-y_s(t)}\right) \quad (33)$$

と表すことができる．センサは円状の領域内に存在するため，コントローラ K_R より時刻 $t+1$ で $\theta(t)$ 方向に V だけ直進する．ここから， $p_s(t+1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t+1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) \\ y_s(t+1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) \end{cases} \quad (34)$$

であり， $p(t+1)$ は

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + V \cos(\theta(t)) = \zeta(t) + V \cos(\theta(t)) \\ y(t+1) = y(t) + V \sin(\theta(t)) = V \sin(\theta(t)) \end{cases} \quad (35)$$

となる．このときセンサは円状の領域外に存在するため，コントローラ K_R よりセンサは $p(t+1)$ を中心とした半径 L の円を描くセンサ位置が最も円状の領域に深く侵入するときの座標 $p_s(t+\delta(t))$ は

$$\begin{cases} \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = \zeta(t)^2 \\ \bar{y} = \frac{y(t+1)}{x(t+1)}\bar{x} = \frac{V \sin(\theta(t))}{\zeta(t) + V \cos(\theta(t))}\bar{x} \end{cases} \quad (36)$$

で表される連立方程式の解で与えられる．ここから，センサが交点の位置に到達するときの時刻を $t+\delta(t)$ とすれば

$$\begin{cases} x_s(t+\delta(t)) = \sqrt{\frac{\zeta(t)^2}{1 + \frac{V \sin(\theta(t))}{\zeta(t) + V \cos(\theta(t))}}} \\ y_s(t+\delta(t)) = \frac{V \sin(\theta(t))}{\zeta(t) + V \cos(\theta(t))} x_s(t+\delta(t)) \end{cases} \quad (37)$$

となる．加えて， $p(t+1)$ と $p_s(t+\delta(t))$ の関係から $\alpha(t)$ は

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \sqrt{(x_s(t+1) - x_s(t+\delta(t)))^2 + (y_s(t+\delta(t)) - y_s(t+1))^2} \\ &= \sqrt{(\zeta(t) + V \cos(\theta(t)) - x_s(t+\delta(t)))^2 + (y_s(t+\delta(t)) - V \sin(\theta(t)))^2} \end{aligned} \quad (38)$$

で表される．また， $\theta(t + \delta(t))$ は

$$\theta(t + \delta(t)) = \pi - \arctan \left(\frac{y_s(t + \delta(t)) - V \sin(\theta(t))}{\zeta(t) + V \cos(\theta(t)) - x_s(t + \delta(t))} \right) \quad (39)$$

で表される．よって，時刻 $t + \delta(t)$ までのロボットの旋回量は $2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t)))$ となり，このロボットの旋回にかかる必要単位時間はロボットの単位時間当たりの旋回量 Ω より $(2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t))))/\Omega$ となる．このことから $\delta(t)$ は

$$\delta(t) = \frac{2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t)))}{\Omega} + 1 \quad (40)$$

となる．このときセンサが円状の領域内に存在するためには時刻 t から時刻 $t + \delta(t)$ の間に $\zeta(t)$ から $\alpha(t)$ 以上を減少させるとロボットが円状の領域内に戻ることができなくなる．よって図 17 の状況を考えたとき $\beta(t)$ は

$$\begin{aligned} \beta(t) &\leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} \\ &= \frac{\sqrt{(\zeta(t) + V \cos(\theta(t)) - x_s(t + \delta(t)))^2 + (y_s(t + \delta(t)) - V \sin(\theta(t)))^2}}{\frac{2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t)))}{\Omega} + 1} \\ &= \frac{\Omega \sqrt{(\zeta(t) + V \cos \theta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + (y_s(t + \delta(t)) - V \sin \theta(t))^2}}{2\pi - (\theta(t) - \theta(t + \delta(t))) + \Omega} \end{aligned} \quad (41)$$

となり， $\beta_3(t)$ を導くことができた．

以上の問題設定と主結果から円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーションを行った．そのスナップショットを図 18 に示す．パラメータは $\zeta(0) = 10, L = 2, V = 1.5, \Omega = \pi/5$ としてロボットの初期座標は $x = 8, y = 0$ とした．また，目標値は $x = 0, y = 0$ としている．

このシミュレーションをもとに各パラメータの値を調整し，実機検証を行った．図 19 に示される通り，シミュレーションで確認できた応答を実機検証でも見ることができた．

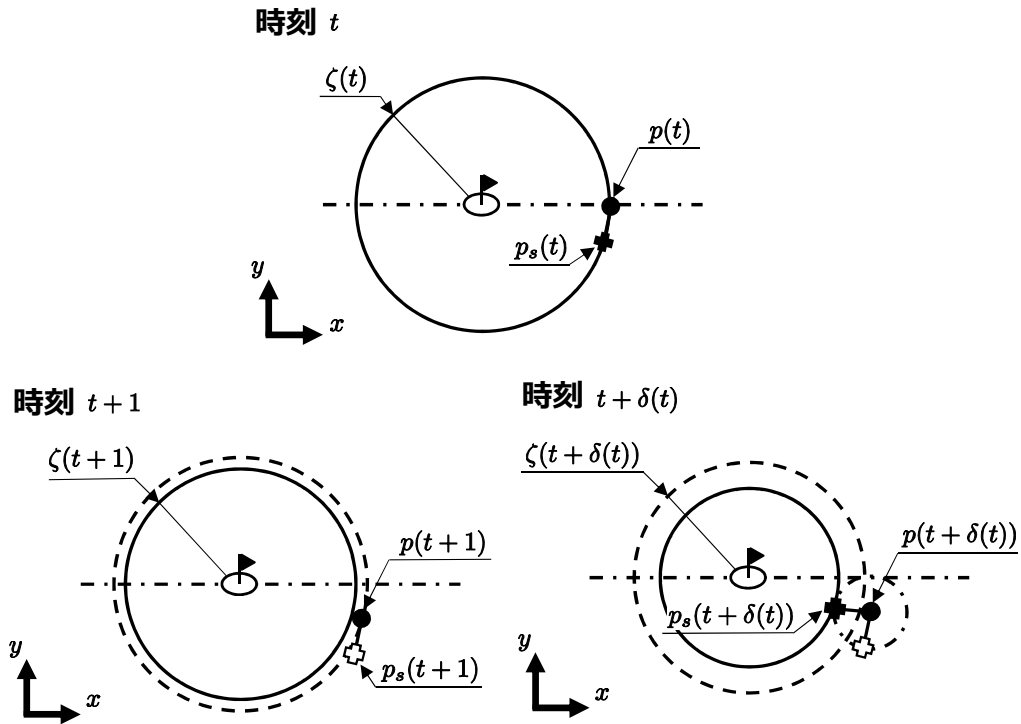


図 17 円モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい

注意 3 問題設定を考える上で、障害物への対処は重要である。提案手法でこれに対応するには、障害物の位置情報が既知であれば、照度場をうまく対応させることで柔軟な目的達成は可能であると考えている。また、障害物感知のためのセンサを搭載するなどしてロボットコントローラの高度化を図ることはひとつの現実的な方法である。

注意 4 もしロボットが照度場の領域から脱落した場合での対策がある。これには、現状のコントローラに、一つ機能を拡張することで可能と考えている。例えば、ロボットが旋回行動をある一定時間し続けた場合は脱落したと判断し、画像生成コントローラに信号を送信する。これをトリガとすることで、画像生成コントローラをリセットし、再度ロボットの誘導を試みることができる。

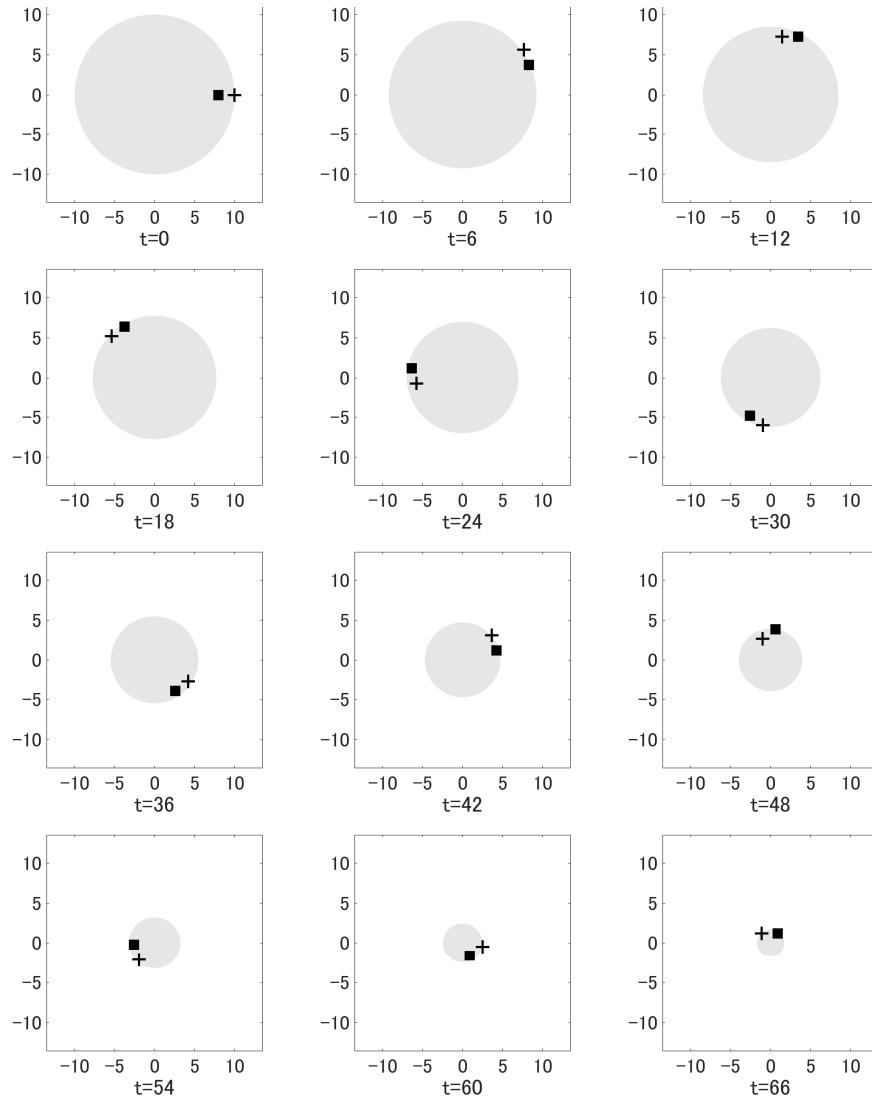


図 18 円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

3.5 螺旋モデルでのナビゲーションシステム

3.2 節で帯モデルでのナビゲーションシステムにおける問題 3 を設定した．本節では，この問題の解を示す．そして，螺旋モデルでのナビゲーションシステムを実現したシミュレーションを示す．

問題 3 の解は以下の定理で与えられる．

定理 3 式 (6) のダイナミクスを有するロボットに式 (9) のコントローラ K_R が実装されているとする. そして, $2L > V$ を仮定する. このとき, ロボットを目標位置に最も早く到達させる $\beta(t)$ は

$$\beta(t) = \max\{\beta_1(t), \beta_2(t), \beta_3(t)\} \quad (42)$$

$$\beta_1(t) \leq \frac{2\Omega \arcsin \left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)} \right)}{\frac{5}{2}\pi - \theta(t + \delta(t)) + \Omega} \quad (43)$$

$$\beta_2(t) \leq \frac{2\Omega \arcsin \left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)} \right)}{\frac{1}{2}\pi + \theta(t + \delta(t)) + \Omega} \quad (44)$$

$$\beta_3(t) \leq \frac{2\Omega \arcsin \left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)} \right)}{\theta(t + \delta(t)) + \Omega} \quad (45)$$

である. また, $\beta_1(t)$ 中の各パラメータは

$$\begin{aligned} y_s(t + \delta(t)) &= -\frac{M\zeta(t)}{V-L}x_s(t + \delta(t)) + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (V-L)^2 - L^2}{2(V-L)} \\ &= Q_1x_s(t + \delta(t)) + Q_2 \\ x_s(t + \delta(t)) &= \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1+Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1+Q_1^2)} \\ \theta(t + \delta(t)) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t))}{V-L-y_s(t + \delta(t))} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

で表される. 同様に, $\beta_2(t)$ 中の各パラメータは

$$\begin{aligned} y_s(t + \delta(t)) &= -\frac{M\zeta(t)}{L-V}x_s(t + \delta(t)) + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (L-V)^2 - L^2}{2(L-V)} \\ &= Q_1x_s(t + \delta(t)) + Q_2 \\ x_s(t + \delta(t)) &= \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1+Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1+Q_1^2)} \\ \theta(t + \delta(t)) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t))}{L-V-y_s(t + \delta(t))} \right) \end{aligned} \quad (47)$$

で, $\beta_3(t)$ 中の各パラメータは

$$\begin{aligned}
y_s(t + \delta(t)) &= -\frac{M\zeta(t)}{M\zeta(t) + V - L}x_s(t + \delta(t)) \\
&\quad + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (M\zeta(t) + V - L)^2 - L^2}{2(M\zeta(t) + V - L)} = Q_1x_s(t + \delta(t)) + Q_2 \\
x_s(t + \delta(t)) &= \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1 + Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1 + Q_1^2)} \\
\theta(t + \delta(t)) &= \pi + \arctan\left(\frac{-y_s(t + \delta(t))}{M\zeta(t) + V - L - x_s(t + \delta(t))}\right) \tag{48}
\end{aligned}$$

で表される.

証明 3 まず, 定理 3 の $\beta_1(t)$ を証明する. ここで導かれる $\alpha(t)$ と $\delta(t)$ は図 20 の時刻 t のような状況を考えている. また, $\delta(t)$ は領域外にロボットが出たときに再度領域内に突入するために必要な単位時間数, $\alpha(t)$ はその単位時間数の間での $\zeta(t)$ の減少幅である. この状況は, センサの取付位置座標 $p_s(t)$ が螺旋状の領域 ($s(t) = 1$) の境界線上にあり, ロボットの姿勢が $\theta(t) = \pi/2$ のときを考えている. このときの $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} x_s(t) = M\zeta(t) \\ y_s(t) = 0 \end{cases} \tag{49}$$

とでき, ロボットの旋回中心座標 $p(t)$ は $p(t)$ と $\theta(t)$ から

$$\begin{cases} x(t) = x_s(t) - L \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y(t) = y_s(t) - L \sin(\theta(t)) = -L \end{cases} \tag{50}$$

とできる. センサは螺旋状の領域内に存在するため, コントローラ K_R より時刻 $t+1$ で $\theta(t)$ の方向に V だけ直進する. ここから, $p_s(t+1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t+1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y_s(t+1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) = V \end{cases} \tag{51}$$

であり, $p(t+1)$ は

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y(t+1) = y(t) + V \sin(\theta(t)) = -L + V \end{cases} \tag{52}$$

となる．このときセンサは螺旋状の領域外に存在するため，コントローラ K_R よりセンサは $p(t+1)$ を中心とした半径 L の円を描くセンサ位置が最も螺旋状の領域に深く侵入するときの座標 $p_s(t+\delta(t))$ は

$$\begin{cases} \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (M\zeta(t))^2 \\ (\bar{x} - x(t+1))^2 + (\bar{y} - y(t+1))^2 = L^2 \end{cases} \quad (53)$$

で表される連立方程式の解として与えられる．ここから，センサが交点の位置に到達するときの時刻を $t+\delta(t)$ とすれば

$$\begin{cases} x_s(t+\delta(t)) = \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1+Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1+Q_1^2)} \\ y_s(t+\delta(t)) = -\frac{M\zeta(t)}{V-L}x_s(t+\delta(t)) + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (V-L)^2 - L^2}{2(V-L)} \\ \quad = Q_1x_s(t+\delta(t)) + Q_2 \end{cases} \quad (54)$$

となる．加えて， $p(t+1)$ と $p_s(t+\delta(t))$ の関係から $\alpha(t)$ は

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(x_s(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + (y_s(t) - y_s(t+\delta(t)))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \\ &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + y_s(t+\delta(t))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \end{aligned} \quad (55)$$

で表される．また， $\theta(t+\delta(t))$ は

$$\begin{aligned} \theta(t+\delta(t)) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{x(t+1) - x_s(t+\delta(t))}{y(t+1) - y_s(t+\delta(t))} \right) \\ &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{M\zeta(t) - x_s(t+\delta(t))}{V-L - y_s(t+\delta(t))} \right) \end{aligned} \quad (56)$$

で表される．よって，時刻 $t+\delta(t)$ までのロボットの旋回量は $5\pi/2 - \theta(t+\delta(t))$ となり，このロボットの旋回にかかる必要単位時間はロボットの単位時間当たりの旋回量 Ω より $(5\pi/2 - \theta(t+\delta(t)))/\Omega$ となる．このことから $\delta(t)$ は

$$\delta(t) = \frac{\frac{5}{2}\pi - \theta(t+\delta(t))}{\Omega} + 1 \quad (57)$$

となる．センサが螺旋状の領域内に存在するためには時刻 t から時刻 $t + \delta(t)$ の間に $\zeta(t)$ から $\alpha(t)$ 以上を減少させるとロボットが螺旋状の領域に戻ることはできなくなる．よって図 20 の状況を考えたとき $\beta(t)$ は

$$\begin{aligned}
\beta(t) &\leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} \\
&= \frac{2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2M\zeta(t)} \right)}{\frac{\frac{5}{2}\pi - \theta(t + \delta(t))}{\Omega} + 1} \\
&= \frac{2\Omega \arcsin \left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)} \right)}{\frac{5}{2}\pi - \theta(t + \delta(t)) + \Omega} \quad (58)
\end{aligned}$$

となり， $\beta_1(t)$ を導くことができた．

つぎに，定理 3 の式 (44) を証明する．ここで導かれる $\alpha(t)$ と $\delta(t)$ は図 21 の時刻 t のような状況を考えている．この状況は，センサの取付位置座標 $p_s(t)$ が螺旋状の領域 ($s(t) = 1$) の境界線上にあり，ロボットの姿勢が $\theta(t) = 3\pi/2$ のときを考えている．このときの $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} x_s(t) = M\zeta(t) \\ y_s(t) = 0 \end{cases} \quad (59)$$

とでき，ロボットの旋回中心座標 $p(t)$ は $p(t)$ と $\theta(t)$ から

$$\begin{cases} x(t) = x_s(t) - L \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y(t) = y_s(t) - L \sin(\theta(t)) = L \end{cases} \quad (60)$$

とできる．このときセンサは螺旋状の領域内に存在するため，コントローラ K_R より時刻 $t + 1$ で $\theta(t)$ の方向に V だけ直進する．ここから， $p_s(t + 1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t + 1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y_s(t + 1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) = -V \end{cases} \quad (61)$$

であり, $p(t+1)$ は

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) \\ y(t+1) = y(t) + V \sin(\theta(t)) = L - V \end{cases} \quad (62)$$

となる. このときセンサは螺旋状の領域外に存在するため, コントローラ K_R よりセンサは $p(t+1)$ を中心とした半径 L の円を描くセンサ位置が最も螺旋状の領域に深く侵入するときの座標 $p_s(t+\delta(t))$ は

$$\begin{cases} \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (M\zeta(t))^2 \\ (\bar{x} - x(t+1))^2 + (\bar{y} - y(t+1))^2 = L^2 \end{cases} \quad (63)$$

で表される連立方程式の解として与えられる. ここから, センサが交点の位置に到達するときの時刻を $t+\delta(t)$ とすれば

$$\begin{cases} x_s(t+\delta(t)) = \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1+Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1+Q_1^2)} \\ y_s(t+\delta(t)) = -\frac{M\zeta(t)}{L-V}x_s(t+\delta(t)) + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (L-V)^2 - L^2}{2(L-V)} \\ \quad = Q_1x_s(t+\delta(t)) + Q_2 \end{cases} \quad (64)$$

となる. 加えて, $p(t+1)$ と $p_s(t+\delta(t))$ の関係から $\alpha(t)$ は

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(x_s(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + (y_s(t) - y_s(t+\delta(t)))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \\ &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + y_s(t+\delta(t))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \end{aligned} \quad (65)$$

で表される. また, $\theta(t+\delta(t))$ は

$$\begin{aligned} \theta(t+\delta(t)) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{x(t+1) - x_s(t+\delta(t))}{y(t+1) - y_s(t+\delta(t))} \right) \\ &= \frac{3}{2}\pi - \arctan \left(\frac{M\zeta(t) - x_s(t+\delta(t))}{L-V - y_s(t+\delta(t))} \right) \end{aligned} \quad (66)$$

で表される．よって，時刻 $t + \delta(t)$ までのロボットの旋回量は $\pi/2 + \theta(t + \delta(t))$ となり，このロボットの旋回にかかる必要単位時間はロボットの単位時間当たりの旋回量 Ω より $(\pi/2 + \theta(t + \delta(t)))/\Omega$ となる．このことから $\delta(t)$ は

$$\delta(t) = \frac{\frac{1}{2}\pi + \theta(t + \delta(t))}{\Omega} + 1 \quad (67)$$

となる．センサが螺旋状の領域内に存在するためには時刻 t から時刻 $t + \delta(t)$ の間に $\zeta(t)$ から $\alpha(t)$ 以上を減少させるとロボットが螺旋状の領域に戻るができなくなる．よって図 20 の状況を考えてとき $\beta(t)$ は

$$\begin{aligned} \beta(t) &\leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} \\ &= \frac{2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2M\zeta(t)} \right)}{\frac{\frac{1}{2}\pi + \theta(t + \delta(t))}{\Omega} + 1} \\ &= \frac{2\Omega \arcsin \left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)} \right)}{\frac{1}{2}\pi + \theta(t + \delta(t)) + \Omega} \end{aligned} \quad (68)$$

となり， $\beta_2(t)$ を導くことができた．

さらに，定理 3 の式 (45) を証明する．ここで導かれる $\alpha(t)$ と $\delta(t)$ は図 22 の時刻 t のような状況を考えている．この状況は，センサの取付位置座標 $p_s(t)$ が螺旋状の領域 ($s(t) = 1$) の境界線上にあり，ロボットの傾きが $\theta(t) = 0$ のときを考えている．このときの $p_s(t)$ は

$$\begin{cases} x_s(t) = M\zeta(t) \\ y_s(t) = 0 \end{cases} \quad (69)$$

とでき，ロボットの旋回中心座標 $p(t)$ は $p_s(t)$ と $\theta(t)$ から

$$\begin{cases} x(t) = x_s(t) - L \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) - L \\ y(t) = y_s(t) - L \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (70)$$

とできる．このときセンサは螺旋状の領域内に存在するため，コントローラ K_R より時刻 $t+1$ で $\theta(t)$ の方向に V だけ直進する．ここから， $p_s(t+1)$ は

$$\begin{cases} x_s(t+1) = x_s(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) + V \\ y_s(t+1) = y_s(t) + V \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (71)$$

であり， $p(t+1)$ は

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + V \cos(\theta(t)) = M\zeta(t) - L + V \\ y(t+1) = y(t) + V \sin(\theta(t)) = 0 \end{cases} \quad (72)$$

となる．このときセンサは螺旋状の領域外に存在するため，コントローラ K_R よりセンサは $p(t+1)$ を中心とした半径 L の円を描くセンサ位置が最も螺旋状の領域に深く侵入するときの座標 $p_s(t+\delta(t))$ は

$$\begin{cases} \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (M\zeta(t))^2 \\ (\bar{x} - x(t+1))^2 + (\bar{y} - y(t+1))^2 = L^2 \end{cases} \quad (73)$$

で表される連立方程式の解として与えられる．ここから，センサが交点の位置に到達するときの時刻を $t+\delta(t)$ とすれば

$$\begin{cases} x_s(t+\delta(t)) = \frac{-2Q_1Q_2 + \sqrt{(2Q_1Q_2)^2 - 4(1+Q_1^2)(Q_2^2 - (M\zeta(t))^2)}}{2(1+Q_1^2)} \\ y_s(t+\delta(t)) = -\frac{M\zeta(t)}{M\zeta(t) - L + V}x_s(t+\delta(t)) \\ \quad + \frac{2(M\zeta(t))^2 + (M\zeta(t) - L + V)^2 - L^2}{2(M\zeta(t) - L + V)} \\ \quad = Q_1x_s(t+\delta(t)) + Q_2 \end{cases} \quad (74)$$

となる．加えて， $p(t+1)$ と $p_s(t+\delta(t))$ の関係から $\alpha(t)$ は

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(x_s(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + (y_s(t) - y_s(t+\delta(t)))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \\ &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t+\delta(t)))^2 + y_s(t+\delta(t))^2}}{2M\zeta(t)} \right) \end{aligned} \quad (75)$$

で表される．また， $\theta(t + \delta(t))$ は

$$\begin{aligned}\theta(t + \delta(t)) &= \frac{3}{2}\pi - \arctan\left(\frac{x(t+1) - x_s(t + \delta(t))}{y(t+1) - y_s(t + \delta(t))}\right) \\ &= \frac{3}{2}\pi - \arctan\left(\frac{M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t))}{L - V - y_s(t + \delta(t))}\right)\end{aligned}\quad (76)$$

で表される．よって，時刻 $t + \delta(t)$ までのロボットの旋回量は $\theta(t + \delta(t))$ となり，このロボットの旋回にかかる必要単位時間はロボットの単位時間当たりの旋回量 Ω より $\theta(t + \delta(t))/\Omega$ となる．このことから $\delta(t)$ は

$$\delta(t) = \frac{\theta(t + \delta(t))}{\Omega} + 1 \quad (77)$$

となる．センサが螺旋状の領域内に存在するためには時刻 t から時刻 $t + \delta(t)$ の間に $\zeta(t)$ から $\alpha(t)$ 以上を減少させるとロボットが螺旋状の領域に戻るができなくなる．よって図 20 の状況を考えたとき $\beta(t)$ は

$$\begin{aligned}\beta(t) &\leq \frac{\alpha(t)}{\delta(t)} \\ &= \frac{2 \arcsin\left(\frac{\sqrt{(M\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2M\zeta(t)}\right)}{\frac{\theta(t + \delta(t))}{\Omega} + 1} \\ &= \frac{2\Omega \arcsin\left(\frac{\sqrt{(\zeta(t) - x_s(t + \delta(t)))^2 + y_s(t + \delta(t))^2}}{2\zeta(t)}\right)}{\theta(t + \delta(t)) + \Omega}\end{aligned}\quad (78)$$

となり， $\beta_3(t)$ を導くことができた．

加えて， L と V は $2L > V$ の関係にあるのは図 23 に示されるように V が $2L$ より大きくなった場合，時刻 $t + 1$ の状況のようになり領域内に再度突入するのは $\beta(t)$ の定義から幾何学的に不可能となるからである．

以上の問題設定と主結果から螺旋モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーションを行った．以下にそのスナップショットを図 24 に示す．

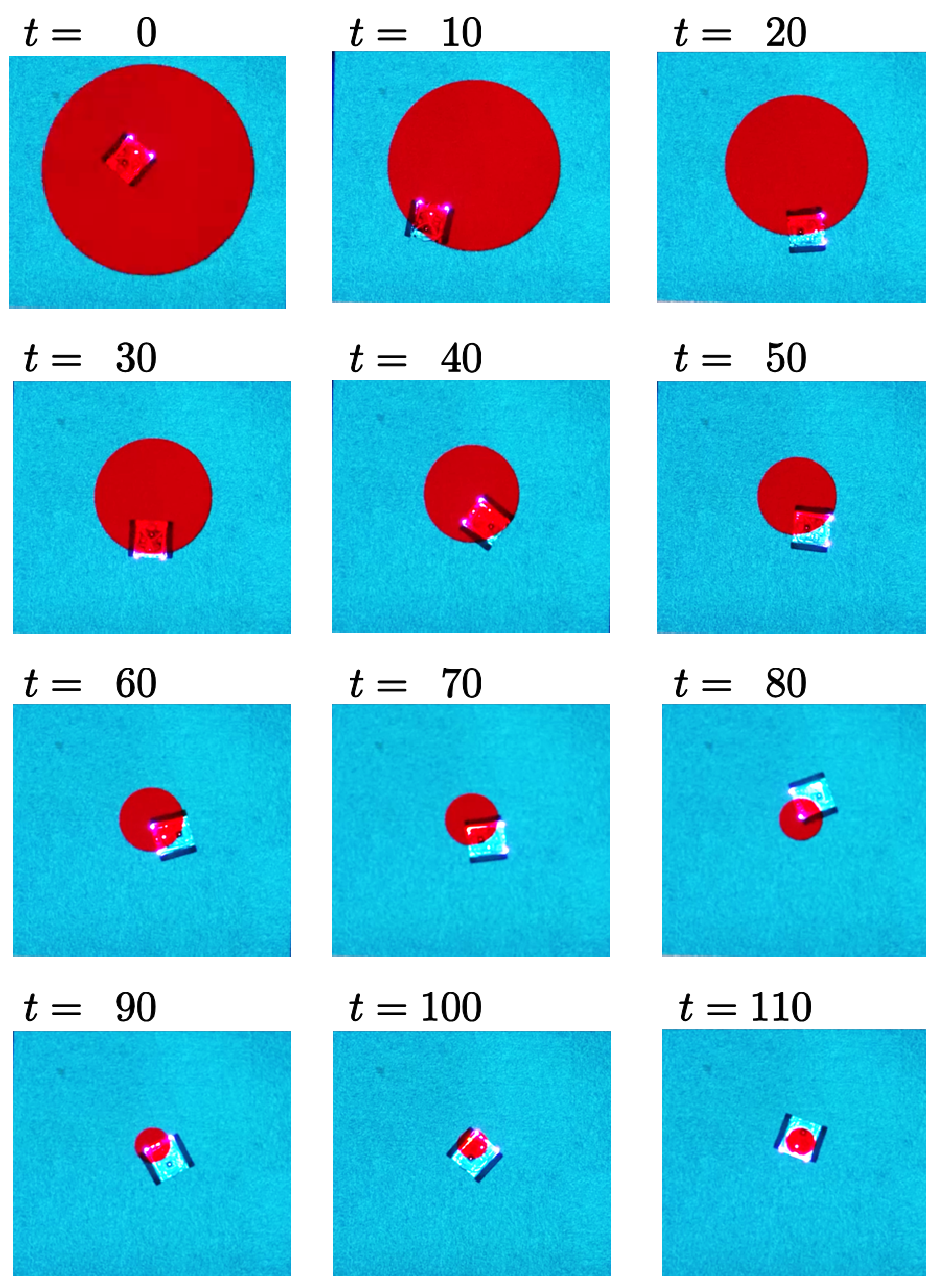


図 19 円モデルでのナビゲーションシステムの実機検証

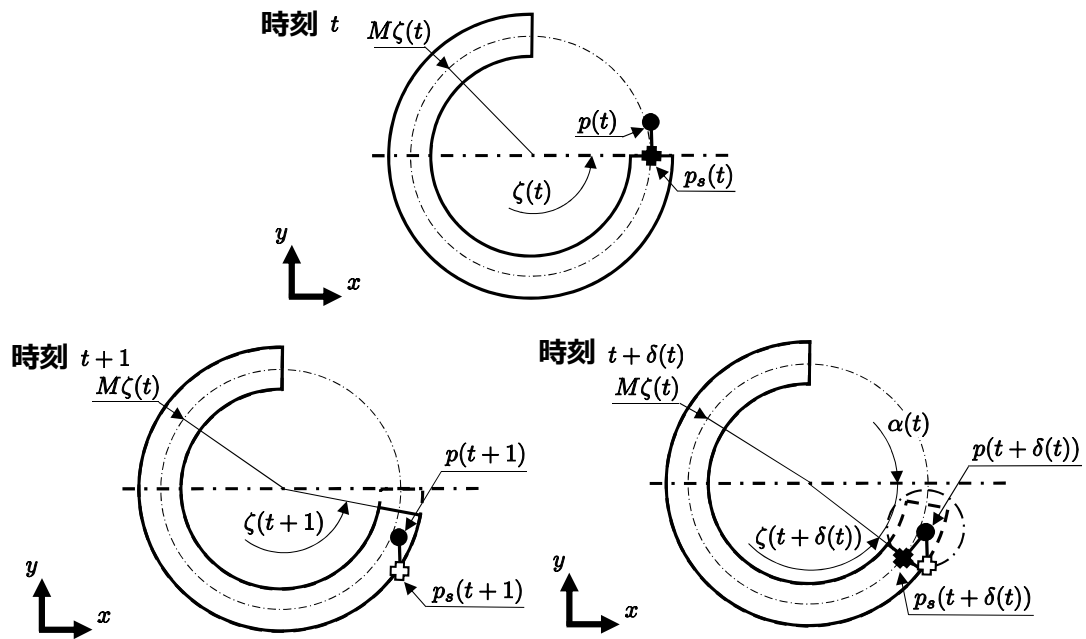


図 20 螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case01

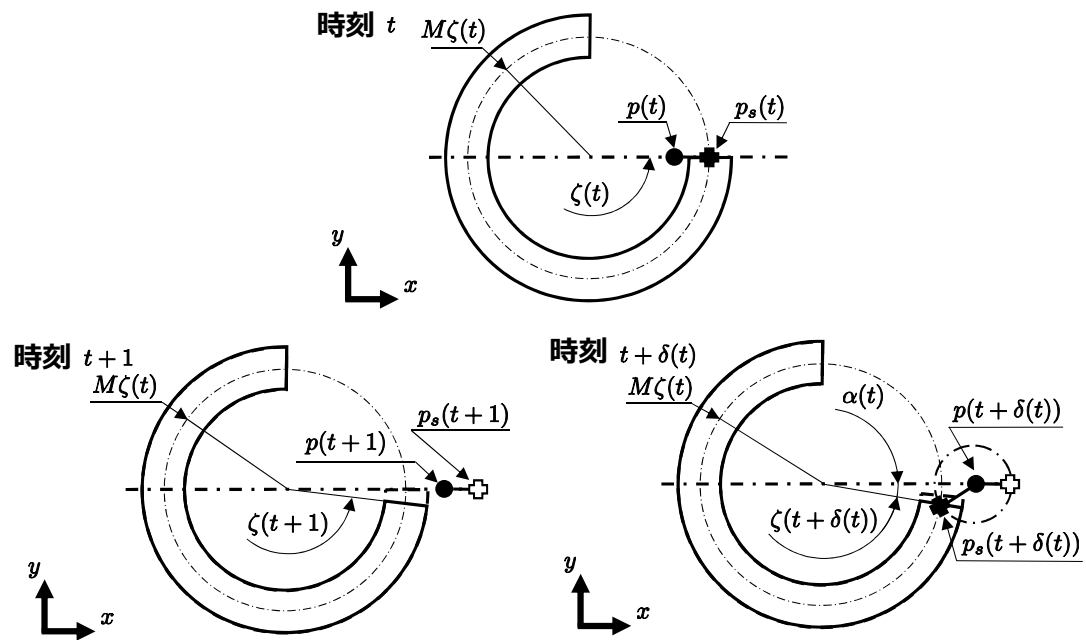


図 21 螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case02

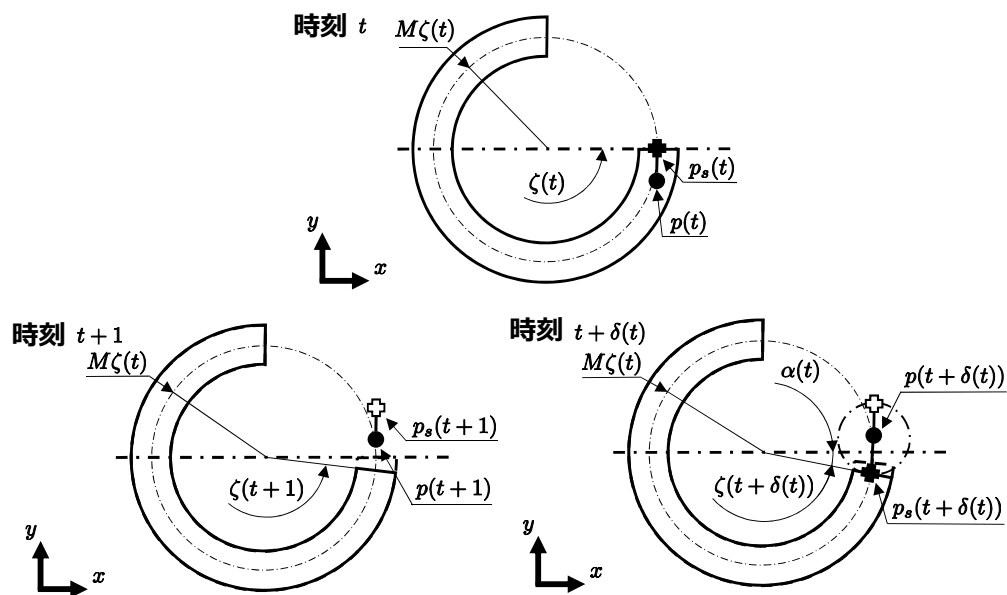


図 22 螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラのふるまい case03

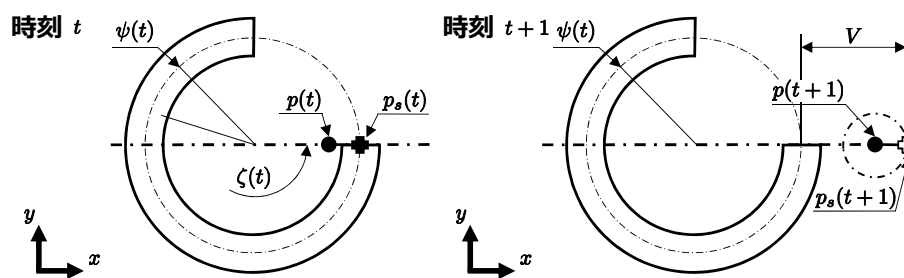


図 23 螺旋モデルでのナビゲーションシステムのコントローラにおける例外条件

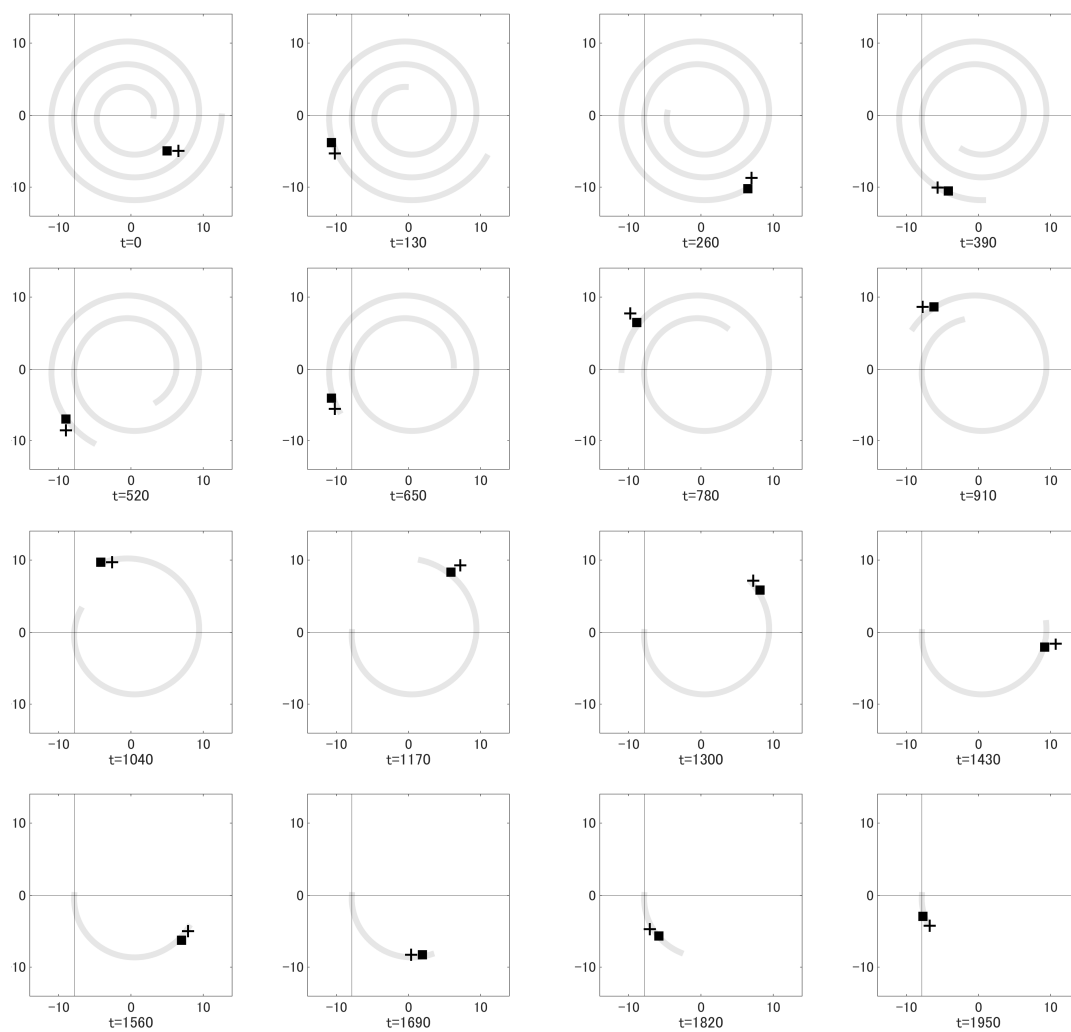


図 24 螺旋モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

第 4 章 複数台ロボットナビゲーション

本章では複数台のロボットの同時誘導を実現するナビゲーションシステムの考え方を示すとともに，シミュレーション例も示す．

4.1 2 台同時誘導対応の螺旋モデルでのナビゲーションシステム

3.5 節ではロボット 1 台でのナビゲーションシステムを考えていたが，螺旋モデルでは 2 台同時誘導が可能である．考え方としては，本論文では螺旋を描く式を式 (42) のように定義している．これを

$$\begin{aligned}\gamma_1(t) &= M\zeta(t) \\ \gamma_2(t) &= -M\zeta(t)\end{aligned}\tag{79}$$

のように定義することで 2 つの螺旋状の領域 ($\gamma_1(t), \gamma_2(t)$) を同一の画像に生成できる．これによって，2 台のロボットがそれぞれ対応する螺旋状の領域に誘導されるように光センサを設定することで 2 台同時誘導に対応した螺旋モデルでのナビゲーションシステムを実現できる．

以上の知見をもとに 2 台同時誘導のシミュレーションを示す (図 25)．図のように各ロボットがそれぞれに対応した螺旋状の領域に追従し，目標位置への誘導に成功しているのが確認できる．

4.2 格子モデルでのナビゲーションシステム

前節の螺旋モデルでは 3 台以上の同時誘導には 3 つ以上の螺旋状の領域を同一の画像に表現できないため対応できない．よって，3 台以上の同時誘導にはまた違った着想のモデルを考える必要がある．

本節では，このロボット 3 台以上の誘導に対応したシステムとして，格子モデルでのナビゲーションシステムを考える．このシステムは，図 26 のように帯状の領域を多数展開し，その領域を時々刻々と減少させることで各ロボットをそれぞれの目標位置にまで誘導するものである．この特徴として，多数の帯状の領域は縦長の形状と横長の形状の 2 種類の領域を逐次的にその長さを時々刻々と減少させる．こ

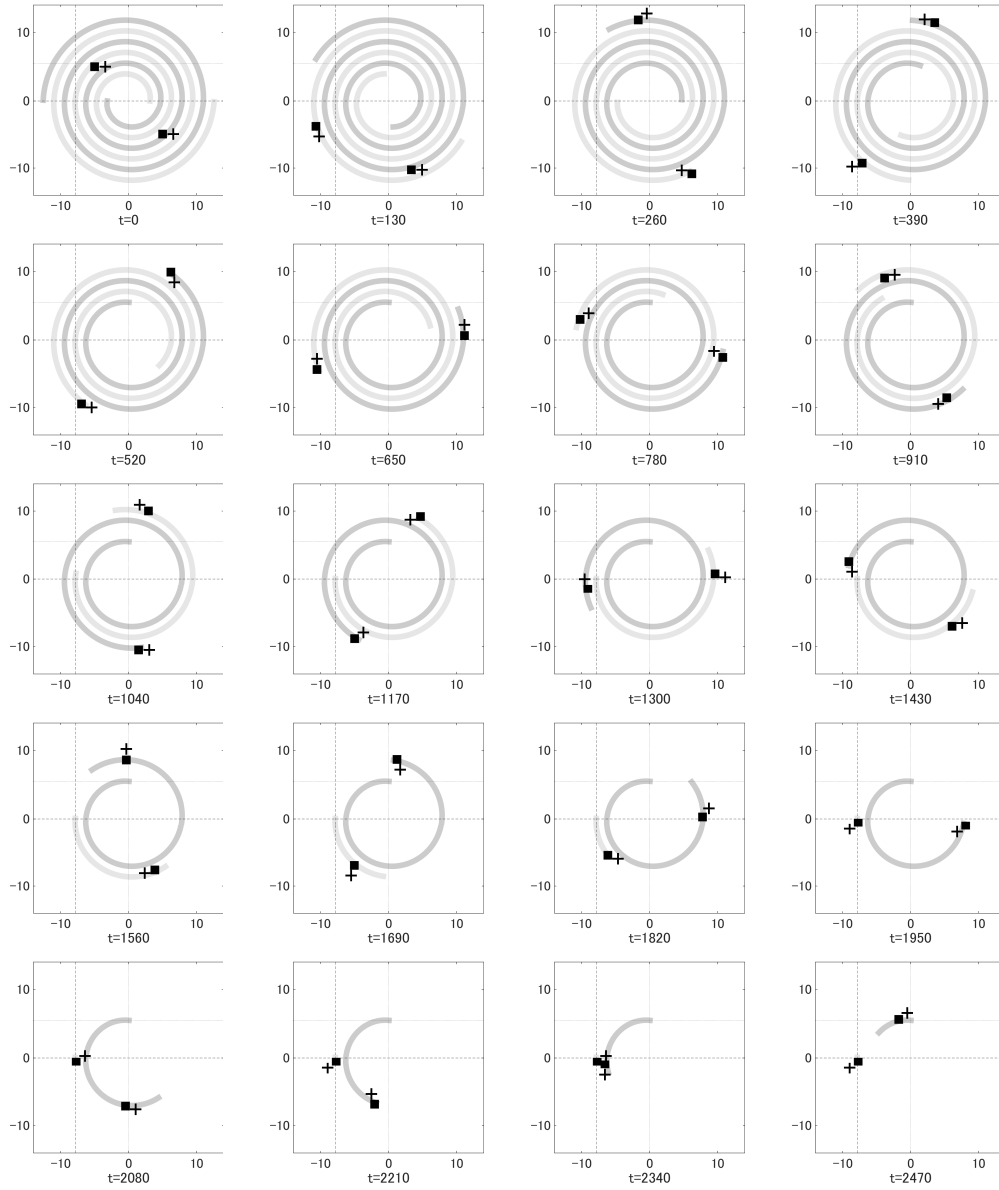


図 25 螺旋モデルでの 2 台同時ナビゲーションシステムのシミュレーション

れによって、3 台以上のロボットがそれぞれ対応する螺旋状の領域に誘導されるように光センサを設定することで 3 台以上の同時誘導に対応した格子モデルでのナビゲーションシステムを実現できる。

このシステムをロボット 1 台の誘導に用いた場合、図 27 のようにロボットの誘導ができていることを確認できる。また、3 台同時誘導のシミュレーションも示す

と図 28 のようになり，各ロボットがそれぞれに対応した格子状の領域に追従し，目標位置への誘導に成功しているのが確認できる．

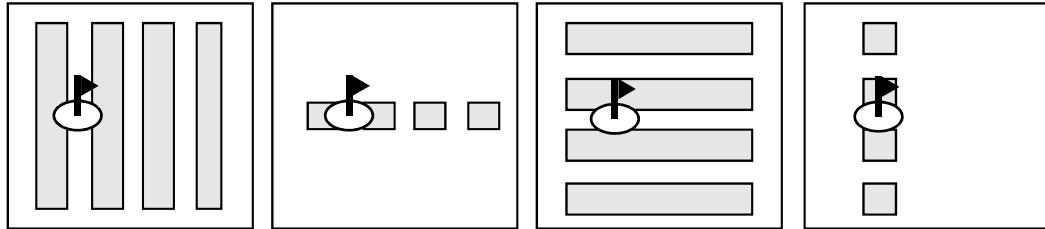


図 26 格子モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ

注意 5 複数の場合の誘導問題は格子モデルであると複数台が必ず，同じ時間で収束している．これは 1 台でのナビゲーション問題のようにそのモデルにおける最適解とはなっていないためである．しかし，この格子モデルで投影する帯の長さをロボットによって変えるなどして収束時間を短縮することは現状のコントローラでも十分に可能である．

4.3 同心円モデルでのナビゲーションシステム

本節では，このロボット 3 台以上の誘導に対応したシステムとして，前節と同様の着想のもと，同心円モデルでのナビゲーションシステムを考える．このシステムは，図 29 のように同心円で配置された複数のリング状の領域を多数展開し，その領域を時々刻々と減少させることで各ロボットをそれぞれの目標位置にまで誘導するものである．この特徴として，同心円で配置された複数のリング状の領域は同心円で配置されたリング状の領域の数とその領域を逐次的に減少させることで，3 台以上の同時誘導に対応した格子モデルでのナビゲーションシステムを実現できる．これによって，3 台以上のロボットがそれぞれ対応する螺旋状の領域に誘導されるように光センサを設定することで 3 台以上の同時誘導に対応した同心円モデルでのナビゲーションシステムを実現できる．

このシステムをロボット 1 台の誘導に用いた場合，図 30 のようにロボットの誘導ができていることを確認できる．また，3 台同時誘導のシミュレーションも示す

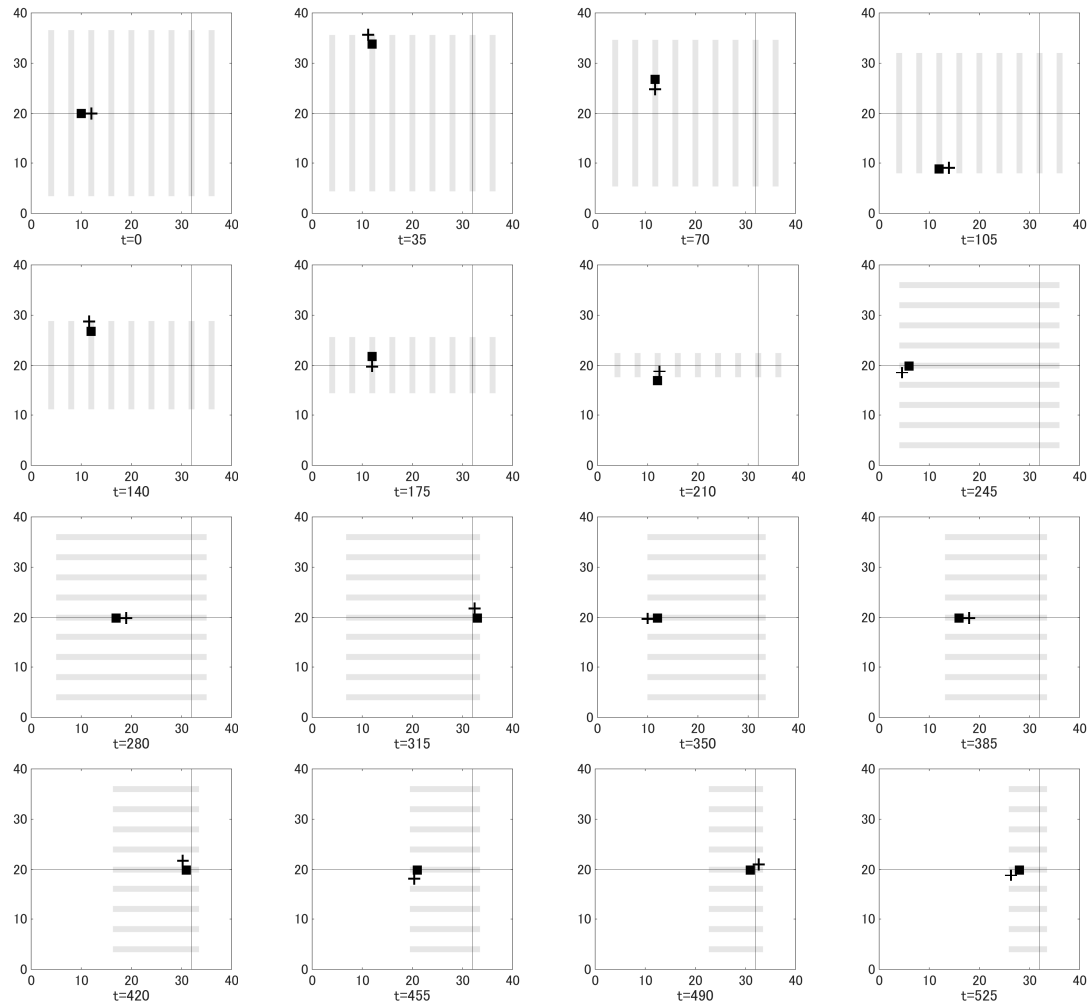


図 27 格子モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

と図 31 のようになり，各ロボットがそれぞれに対応したリング状の領域に追従し，目標位置への誘導に成功しているのが確認できる．

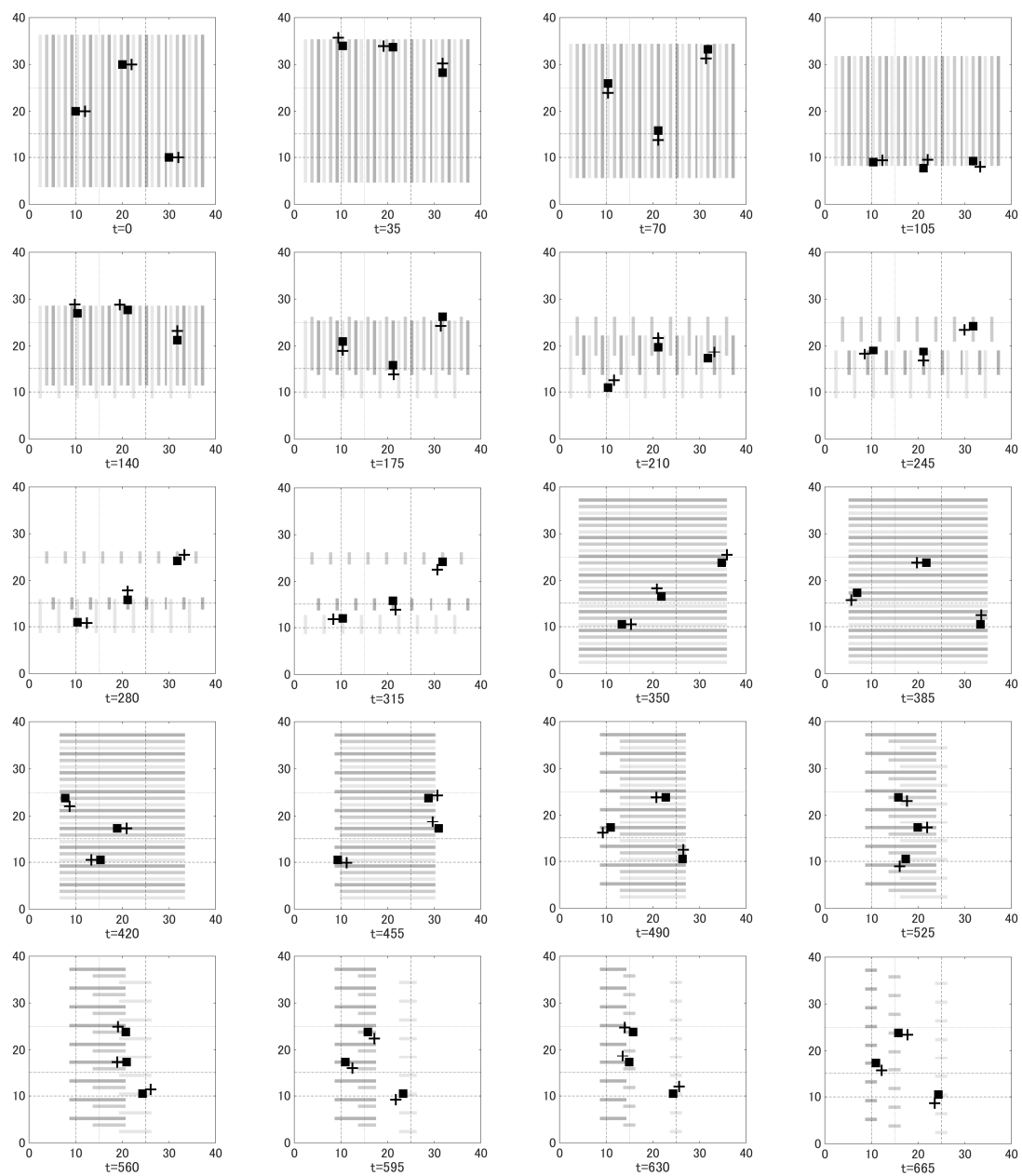


図 28 3 台同時誘導に対応した格子モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

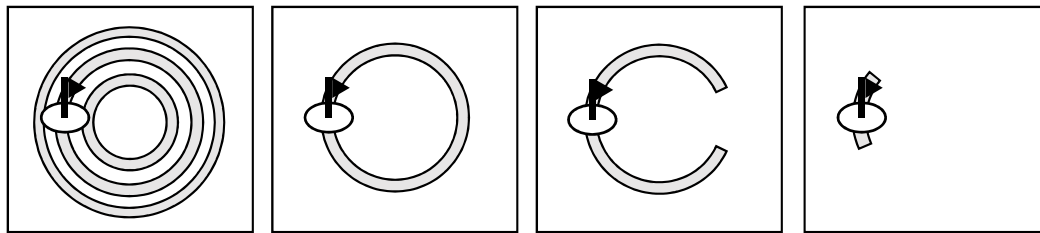


図 29 同心円モデルにおけるコントローラ K_I のイメージ

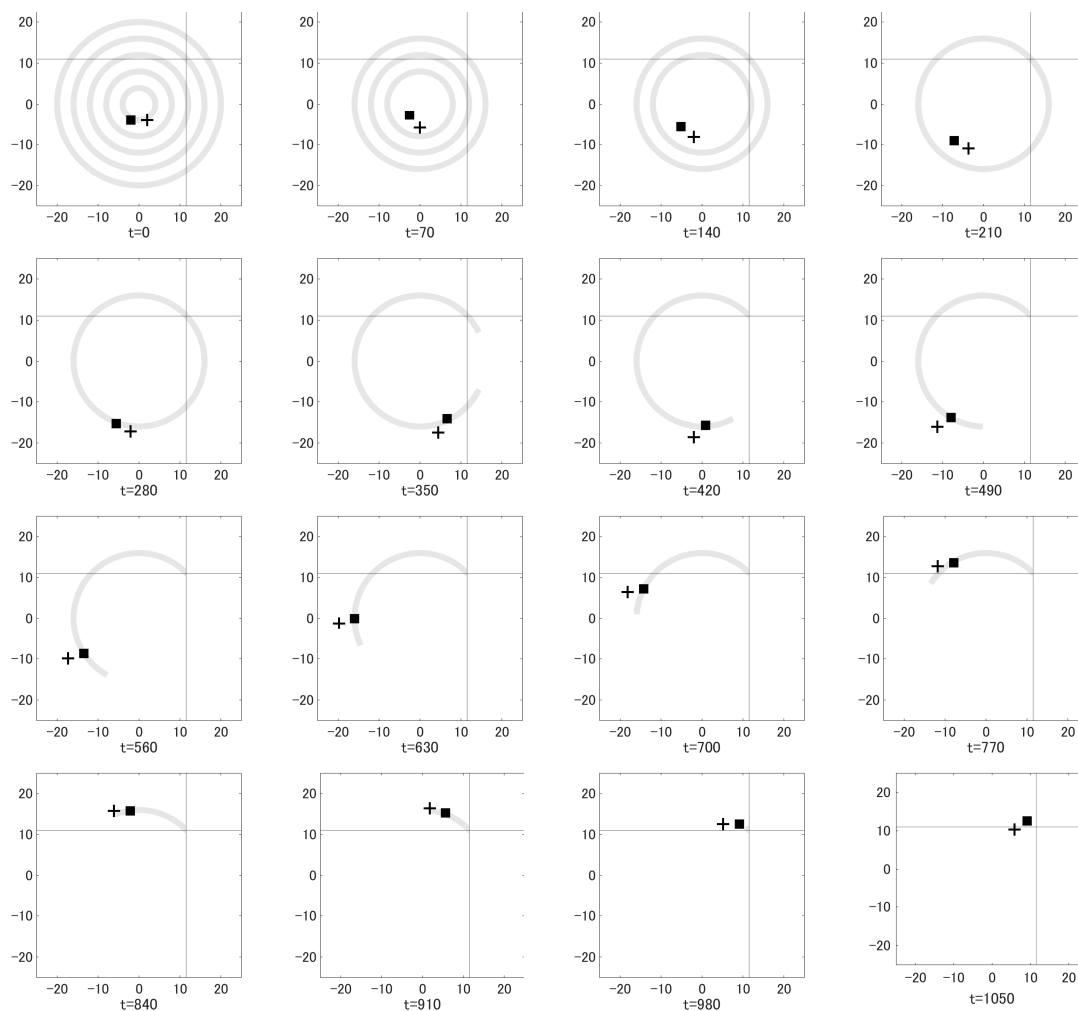


図 30 同心円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

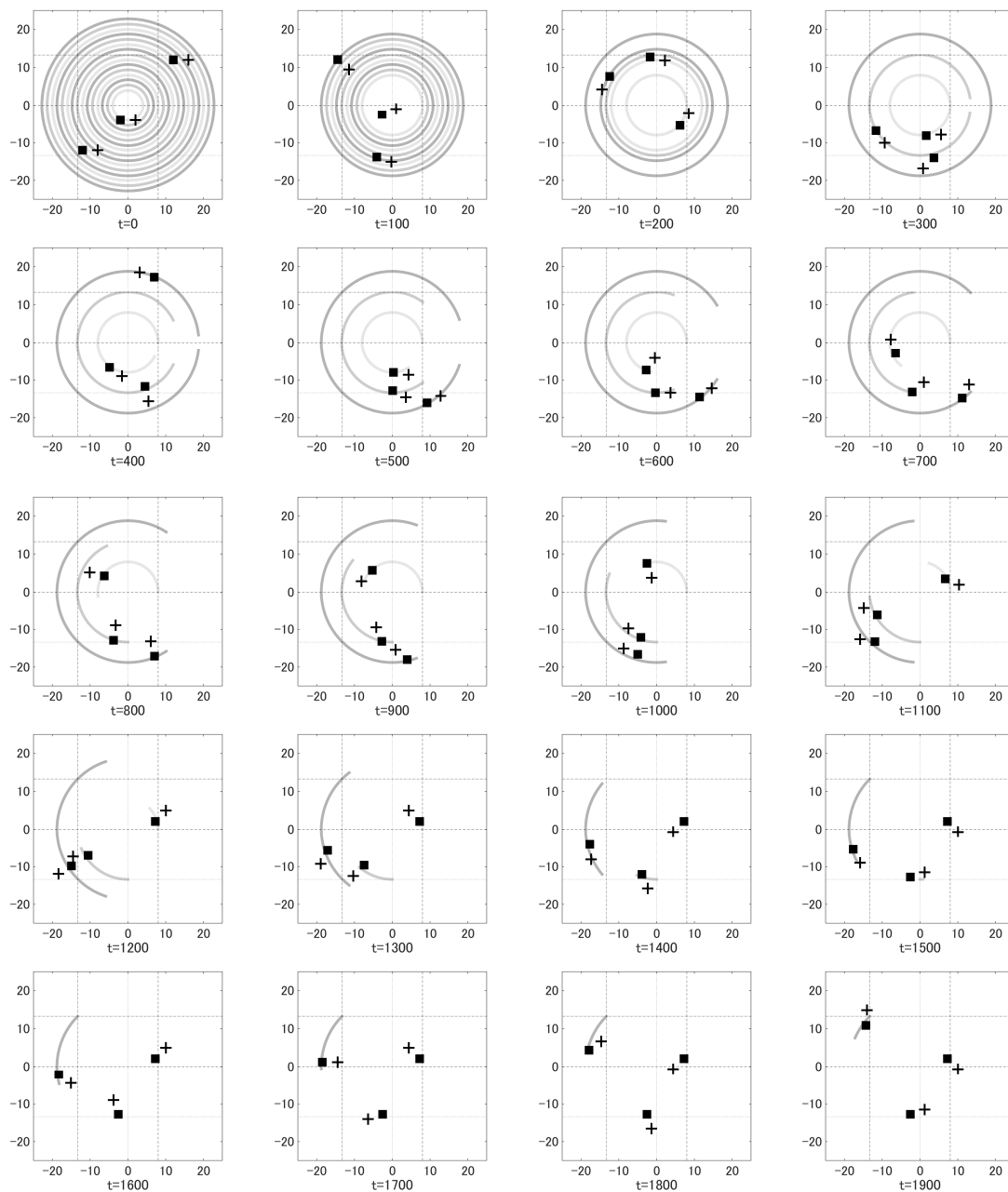


図 31 3 台同時誘導に対応した同心円モデルでのナビゲーションシステムのシミュレーション

第 5 章 おわりに

本論文では、移動ロボットの誘導制御を 2 値画像を投影して照度場を形成することでロボットに搭載された光センサからの情報をもとに達成する手法を提案した。この手法をもとに制御問題の定式化を行い、コントローラの設計問題に取り組んだ。そして、ロボット 1 台のナビゲーションシステムとして、帯モデルと円モデル、螺旋モデルの 3 種類のコントローラを提案し、その最適化を行った。加えて、上述の成果をもとに実験システムを開発し、帯モデルと円モデルでの誘導制御実験を行うことで、提案手法の有効性を確認した。

本論文の成果は、つぎの二つである。まず、位置情報を必要としない新しいナビゲーションシステムを提案したことである。また、ロボットに搭載するセンサは、照度情報 (たとえば 0, 1) を取得できる光センサのみでよいのでシステムの低コスト化や単純化に貢献するつぎに、コントローラの設計法を提案し、ロボットを目標位置に誘導させる条件を理論的に明らかにしたことである。これにより、0, 1 情報でロボットを誘導できることを示すことができた。

また、主にロボット 1 台の誘導を前提に問題に取り組んだが、この発展として、複数台のロボットの同時誘導制御にも取り組んだ。しかし、提案手法の位置情報を用いないという特性からロボットの誘導には到達までのロボットが通る軌跡までは制御できない。よって、複数台のロボットの同時誘導制御の問題点としてロボット間の衝突が考えられる。以上のことから、今後の課題としては複数台のロボットの同時誘導制御におけるロボット間の衝突可能性の解消とコントローラの最適化問題に取り組む必要があると考えている。また、コントローラ K_R , K_I は以下の 3 つの方法が考えられた。

1. コントローラ K_R が与えられたとき、コントローラ K_I を設計する
2. コントローラ K_I が与えられたとき、コントローラ K_R を設計する
3. コントローラ K_R と K_I を同時に設計する

しかし、本論文ではこの内 1 の方法でしか論じていない。よって、他の 2 つの方法でコントローラを設計し、最適化問題に取り組むことで研究の進展が望めると考えている。

謝辞

本論文は筆者が奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報科学専攻知能システム制御研究室博士前期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同研究室の客員准教授である南裕樹先生には指導教官として本論文の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表する。また、ユビキタスコンピューティングシステム研究室の安本慶一教授には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表する。加えて、知能システム制御研究室の杉本謙二教授をはじめ、松原崇充准教授、小林泰介助教には研究する上での環境の提供や学会での発表の指南においても日頃より有益なご討論ご助言を戴いた。ここに感謝の意を表する。最後に、当時同研究室の博士後期課程に在籍し、現在は新居浜工業高等専門学校の助教をされている田中大介先生には大学院生活を送るうえで必要な様々なことを日頃よりご助言を戴いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史, 車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2012), pp. 652-654.
- [2] Alvarez-Agurre, A., Nijmeijer, H., Oguchi, T., and Kojima, K., Remote control of a mobile robot subject to a communication delay, *Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (2010), pp. 55-62.
- [3] Klančar, G., Brezak, M., Martko, D., and Petrovič, I., Mobile robots tracking using computer vision, *AUTOMATIKA: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, Vol.46, No.3-4 (2006), pp. 155-163.
- [4] Kojima, K., Oguchi, T., Alvarez-Aguirre, A., and Nijmeijer, H., Predictor-Based tracking control of a mobile robot with time-delays, *Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, (2010), pp. 167-172.
- [5] Bonin-Font, F., Ortiz, A., and Oliver, G., Visual navigation for mobile robots: A survey, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol.53, No. 3 (2008), pp. 263-296.
- [6] Gueaieb, W., and Miah, M. S., An intelligent mobile robots navigation technique using RFID technology, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.75, No. 9 (2008), pp. 1908-1917.
- [7] 萩森夕紀, 高橋直樹, 野中謙一郎, 操舵角度の可動範囲と連続性を陽に考慮した車輪型移動ロボットのモデル予測軌道追従制御, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825(2015), DOI: <http://doi.org/10.1299/transjsme.14-00484>
- [8] 亀田昌宏, 神代充, 渡辺富夫, 長谷日出樹, 無人搬送車のための画像処理と倉庫内の 3 次元モデルを用いた自己位置認識手法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 75, No. 755 (2009), pp. 1995-2004.
- [9] Benavidez, P., and Jamshidi, M., Mobile robot navigation and target track-

- ing system, *Proceedings of the 6th International Conference on System of Systems Engineering* (2011), pp.. 299-304.
- [10] 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 菊地惇, 地表面の反射輝度を活用した自律移動ロボットの高精度自己位置推定, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 806 (2013), pp. 3389-3398.
 - [11] 門田啓史, 野中謙一郎, むだ時間を考慮した時間軸状態制御形による非ホロノミック車両の経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No.1 (2012), pp. 2-10
 - [12] 大川佳寛, 宮野雄基, 滑川徹, 逃避時間回避を考慮した H_{∞} フィルタによる移動ロボットの自己位置推定と環境認識, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 10 (2012), pp. 104-110.
 - [13] 倉鋪圭太, 深尾隆則, 大須賀公一, 石山健二, 竹原悦秀, 今井浩久, 不整地を想定した移動ロボットのロバスト制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 747 (2008), pp. 2705-2712.
 - [14] 辻敏夫, 坂根彰, 福田修, 金子真, 大竹久夫, バクテリアの走光性モデルに基づく移動ロボットのバイオミメティック制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 673 (2002), pp. 2687-2694.
 - [15] 中川正雄, ユビキタス可視光通信技術, 計測と制御, Vol. 46, No. 2 (2007), pp. 104-110.
 - [16] 南裕樹, 分散型 LED 照明システムの点灯パターン制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No.10 (2013), pp. 982-984.
 - [17] 南裕樹, 室巻孝郎, 徳永泰伸, ロボテック照明システムの照射角制御, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2015), pp. 213-215.
 - [18] 原田明, 高島義徳, 中畑雅樹, 岩曾一恭, 畠中省伍, 刺激に応じて形態の変化する超分子ゲルアクチュエータ, 精密工学学会論文集, Vol. 80, No. 8 (2014), pp. 722-726.
 - [19] 渡邊敏之, プロジェクションマッピング, 映像情報メディア学会誌, Vol. 67, No. 2 (2013), pp. 166-168.
 - [20] 中村泰, 松本吉央, 石黒浩, 生体ゆらぎを模倣したロボット制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4 (2010), pp. 470-478.

- [21] Michael Rubenstein, Christian Ahler, Nick Hoff, Adrian Cabrera and Radhika Nagpal, Robotics and Autonomous Systems, *Robotics and Autonomous Systems* 62, (2014), pp. 966-975.
- [22] T. M. Morse, T. C. Ferrée and S. R. Lockery, Robust spatial navigation in a robot inspired by chemotaxis in *C. elegans*, *Institute of Neuroscience University of Oregon Eugene*, (2010).
- [23] Amit Dhariwal, Gaurav S. Sukhatme and Aristides A. G. Requicha, Bacterium-inspired Robots for Environmental Monitoring, Proceedings of the 2004 IEEE *International Conference on Robotics & Automation*, (2004), pp. 1437-1443.