The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導に関する研究
Author(s)	角田, 祐輔
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82223
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導に関する研究

角田　祐輔

2021 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章　緒言 1

1.1　研究背景・目的 1

1.1.1　背景 1

1.1.2　問題点 2

1.1.3　着眼点とアプローチ法 2

1.1.4　内容 5

1.2　本論文の構成 7

第 2 章　「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導 10

2.1　研究背景 10

2.1.1　群れをなす生物の制御構造：自律分散構造 10

2.1.2　群れをなす生物から学ぶ：群ロボットシステム 12

2.1.3　「場」の制御に基づく群ロボットシステムの制御 14

2.1.4　陰陽制御が示唆する群ロボットシステムの設計指針 16

2.1.5　「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導 18

第 3 章　「音場」の制御に基づくロボットの陰的誘導 22

3.1　研究背景 22

3.2　誘導システム (1): 音場トレールの動的制御に基づく音場追従型ロボットの誘導 23

3.2.1　誘導システム (1) のロボット：音場追従型コントローラの設計 24

3.2.2　音場トレールの動的スイッチングによるロボットの誘導実験 27

3.3　誘導システム (2) : 静的な音場トレールに基づく音場馴化型ロボットの誘導 . 28

3.3.1 誘導システム (2) のロボット：音場馴化型コントローラの設計 29
3.3.2 静的な音場トレールによるロボットの誘導 34
3.4 考察 35
3.5 まとめと今後の展望 35

第 4 章 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導 37
4.1 研究背景 37
4.1.1 シープドッグシステムと機動制御法 38
4.1.2 シープドッグシステムに関する先行研究 39
4.1.3 先行研究の問題点と本論文のアプローチ 43
4.1.4 機動制御則に基づくエージェント群の陰的誘導システムの創成 43

第 5 章 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:安定性解析 46
5.1 研究背景 46
5.2 ヒツジの逃避戦略と牧羊犬の機動制御則 47
5.2.1 制御対象と制御目的 47
5.2.2 ヒツジと牧羊犬の制御入力 48
5.3 システムの安定性解析 49
5.3.1 平衡点の導出 49
5.3.2 線形近似による平衡点の安定性解析 52
5.3.3 平衡点におけるシステムの挙動 54
5.3.4 平衡点に収束しない初期値集合 56
5.4 牧羊犬の機動制御則設計法 57
5.5 シミュレーションによる検証 58
5.5.1 平衡点に収束する場合 58
5.5.2 平衡点に収束しない場合 59
5.6 まとめと今後の展望 60

第 6 章 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:設計法と実機検証 63

6.1 研究背景 63
6.2 シープドッグシステムのモデリング 63
6.2.1 制御対象と制御目的 64
6.2.2 ヒツジ群のモデル 65
6.2.3 牧羊犬の機動制御則 66
6.3 複数体のヒツジに対する機動制御則の設計 66
6.3.1 ヒツジ 1 体に対する機動制御則の設計法 67
6.3.2 複数のヒツジに対する機動制御則の設計法 67
6.4 数値シミュレーションによる検証 70
6.4.1 ヒツジ群の振る舞いと群れ半径に関する検証 70
6.4.2 牧羊犬の機動制御則の検証 71
6.5 実機実験による検証 74
6.5.1 モーションキャプチャシステムに基づくロボット群の制御 74
6.5.2 実機実験および考察 76
6.6 まとめと今後の展望 78

第 7 章 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:誘導性能の検証 79

7.1 研究背景 79
7.2 シープドッグシステムのモデリング 80
7.3 ヒツジ群のモデルの設計 80
7.3.1 先行研究における牧羊犬の誘導コントローラ 82
従来のコントローラ: 中心追跡制御 82
動的ターゲット切り替え制御 82
7.3.2 提案する誘導コントローラ：最遠個体追跡制御 84
7.4 グローバルカメラを有する牧羊犬の誘導の解析 84
7.4.1 評価指標 84
7.4.2 誘導解析 85
中心追跡制御の場合 85

動的ターゲット切り替え制御の場合 86
最遠個体追跡制御の場合 88
7.5 ローカルカメラを有する牧羊犬の誘導の解析 90
7.5.1 牧羊犬のローカルカメラの定義 91
7.5.2 中心追跡制御の場合 92
7.5.3 動的ターゲット切り替え制御の場合 93
7.5.4 最遠個体追跡制御の場合 94
7.6 ローカルカメラの精度が誘導に与える影響の解析 95
7.6.1 遠方個体追跡制御の提案 95
7.6.2 カメラセンサーの精度に関する解析 96
7.6.3 初期状態が誘導性能に与える影響の解析 96
7.7 まとめと今後の展望 98

第 8 章 結言 100
8.1 本論文の目的と結果 100
8.2 まとめと今後の展望 103

謝辞 106

参考文献 107

付録 118

研究業績 121

図目次

1.1 High road of engineering v.s. road to learn to animal 2
1.2 Difference between previous and proposed approaches to designing the robot navigation system 3
1.3 Control problem of this paper : how to design the interaction between the field and the robot's controller in order to navigate the multiple robots to the goal position 4
1.4 Flow chart of this doctroal thesis 9

2.1 Traditional control system 16
2.2 Implicit control and explicit control 17
2.3 Proposed navigation system 1: implicit navigation for a mobile robot based on the acoustic field control 19
2.4 Proposed navigation system 2: implicit navigation for multiple agents based on the filed control 19
2.5 System scheme of the implicit navigation for multiple agents based on the filed control 20

3.1 Two proposed navigation methods:(1) gradient-following controller for designed dynamic acoustic trail: the robot is designed to follow the gradient of the acoustic field with two microphones, and is navigated by changing the field shape dynamically. (2) Sound-habituation controller for designed static acoustic trail: the robot, equipped with one microphone, is controlled toward the sound source by habituation of the acoustic sound, and is navigated using the static acoustic field. 23
3.2 The proposed sound-searching robot 25
3.3 Flowchart of the robot's movement based on the controller (1) 25
3.4 Sound intensity of the acoustic field using navigation method (1): applied voltage value vs. distance between and the microphone and the sound source l [m] . 26
3.5 Snapshots of the round trip experiment based on dynamic acoustic trail generated by four sound sources 28
3.6 Robot Trajectories in the round trip experiment based on dynamic acoustic trail generated by four sound sources 29
3.7 Robot developed for the proposed navigation method (2) 30
3.8 Algorithm developed for the robot based on method (2) 30
3.9 Sound intensity of an acoustic field: Received FFT value [pt] vs. horizonal distance between the speaker and the robot x [m] 31
3.10 Snapshots of the robot's movement around the source 32
3.11 Sound intensities of acoustic trails using navigation (2): Received FFT value [pt] vs. horizonal distance between the speaker and the robot x [m] 33
3.12 Snapshots of the robot's movement when navigating to the sound source by using static acoustic trails generated by four sound sources 34

4.1 Decentlized control 38
4.2 Sheepdog system: one sheepdog navigates a sheep flock to a certain goal (Photograph courtesy of IKAHO GREEN BOKUJO) 38
4.3 Mobile control 39

4.4 Implicit navigation system for multiple agents based on the mobile control inspired by sheepdog system 44

5.1 Position of sheep, sheepdog, and goal (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal) 47
5.2 How to place the parameters in coordinate transformation (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal) 49
5.3 Behavior of two equilibrium points 56
5.4 Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $K_2 > K_4 > 0$ 59
5.5 Plot showing the convergence of the distance between a sheep and a goal 60
5.6 3D nullcline and vector locus in the case of $K_2 > K_4 > 0$ 60
5.7 Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $\phi(0) = 0$ 61
5.8 Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $\phi(0) = \pi$ 61

6.1 Position of sheep, a sheepdog, and a goal (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal, ∗:center of sheep flock) 64
6.2 Designing the mobile control law applicable to the multiple sheep agents 68
6.3 (a), (b): Trajectories of sheep and the center of the sheep flock in each case (○:sheep, ∗:center of sheep flock, −: trajectories of sheep), (c), (d): Plots showing the convergence of the radius of sheep flock $\bar{l}_s$ in each case 71
6.4 Trajectories of the sheepdog and the center of the sheep flock in each case (○:sheep, ∗:center of sheep flock, −: trajectory of the center of sheep flock, ●:sheepdog, −−:trajectory of the sheepdog, ×:goal) 72
6.5 Plots showing the convergence of the length between the center of the flock and the goal in each case (−−: actual distance $L(k)$, −: target distance $\overline{L}$) 73
6.6 Scheme of demonstration of sheepdog-type robot navigation 75
6.7 Algorithm for robots 75
6.8 Snapshots of robot demonstration in which a sheepdog robot succeeds in herding five sheep robots 76

6.9 Trajectries of the sheepdog robot and five sheep robots ($*$:center of sheep flock, $-$: trajectory of the center of sheep flock, ●:sheepdog, $--$:trajectory of the sheepdog, $\times$:goal) 77
6.10 Plot showing the convergence of the length between a center of the flock and the goal ($--$: actual distance $L(t)$, $-$: target distance $\overline{L}$) 78

7.1 Schematic explanation of the sheep flock model. A sheep at the center is influenced by the neighboring agents within its vision area. 81
7.2 Shepherd controllers proposed in previous studies and this study 83
7.3 Changes in sheep dispersion for different values of K_{s_1} 87
7.4 Shepherding failure: sheep group splits into several groups 87
7.5 Example of shepherding based on the target-switching controller 88
7.6 Snapshots of sheep and shepherd positions based on farthest-agent targeting control 89
7.7 Trajectories of all agents: red line is the shepherd's trajectory, blue line is the center of the flock's trajectory, and gray lines indicate each sheep's trajectory. . 90
7.8 Definition of the invisible area 92
7.9 Controllers in consideration of shepherd view 93
7.10 Analysis of situations in local-camera cases for farthest-agent targeting control . 95
7.11 Analysis of the effect of sensor accuracy on Local-camera-based farthrest-agent targeting control 96

8.1 Summary of the contents in section 5-7 103

第 1 章　緒言

1.1　研究背景・目的

1.1.1　背景

地球上に生息する群れをなす生き物たちの振る舞いに，我々はしばしば心奪われることがある．例えば，アリ [1] やシロアリ [2, 3]，ハチ [4] といった社会性昆虫，魚群 [5]，鳥群 [6]，そして我々人間 [7] もその例の 1 つに挙げられるだろう．これらの生物は，各個体がまるで示し合わせたかのように，群れ全体として 1 つの生命体のような振る舞いや機能を発現しているように見える．このような群れをなす生物の振る舞いは，各個体が周囲の個体と何らかの近接的相互作用によりボトムアップ的に生じていると言われており，生物学のみならず数学，理学，工学等様々な方面で研究，応用が行われてきた [8, 9].

その中で，群れをなす生物の振る舞いをヒントに，工学的応用を目指したシステムとして，群ロボットシステムがある．群ロボットシステムとは，複数台のロボットが内在するシステムを指し，1 体のロボットでは達成困難なタスクを，機能が比較的高くない多数のロボットを協調させることで達成することを目的としたシステムである [10]．群ロボットシステムは，ロボット台数の多さを生かし，複数ロボットによる協調行動や，故障に対するロバスト性，台数の変化に対する拡張性といった能力を持つ．このような能力から，群ロボットシステムは，複数物体の搬送・運搬や，災害現場や海洋などの人間が立ち入れない広範囲の領域の探索などで活躍することが期待されている [11].

さて，ここで問題となるのは，そのような未知の環境で活躍する群ロボットシステムをどのように設計し，制御するかということである．本研究の最終目標は，未知環境に適応可能な群ロボットシステムの制御系設計論を構築することである．

(a) Closed design scheme (b) Open design scheme

Fig. 1.1: High road of engineering v.s. road to learn to animal [12]

1.1.2 問題点

この目標に対して，まずは一般的な制御方式に基づいて，未知環境でロボットを動かすことを考えてみよう．未知環境下に移動ロボットを置き，我々が決めた目的地までロボットを移動させる場合，従来の制御法では，カメラ等を用いて周囲環境をセンシングしてマッピングを行い，目的地までの経路を計算してそれに基づいて移動させる．これは，Fig. 1.1(a) に示すように，ロボットの周囲の空間を徹底的に既知化して移動する手法である [12]．しかし，時々刻々と予測不可能に変化する未知環境では，環境の変化全てをあらかじめ知ることは因果律に反するため不可能である．また，この制御方式を推し進めていくなら，高性能なコンピュータとレーザーレンジファインダーのような優れたセンサ群を用いる力技の制御になり，制御が複雑化してその結果「立ち往生」するロボットになる恐れがある．これは，従来の制御法は環境からの不確実な作用は全て「外乱」とみなしており，制御対象と環境とを完全に切り離して制御系を構築するからであり，環境に対して適応的に動き回るロボット群を設計するにあたりこの制御方式は根本的な問題があると考えられる．

1.1.3 着眼点とアプローチ法

それに対して，我々を含め動物はどのような行動をとるだろうか？我々人間がある目的地に行く際，ある程度その場の環境をセンシングして，だいたいの経路を設計して，とりあえずその方向に移動しつつ，その場その場で起こったことに対応しながらなんとか目的地へたどり着

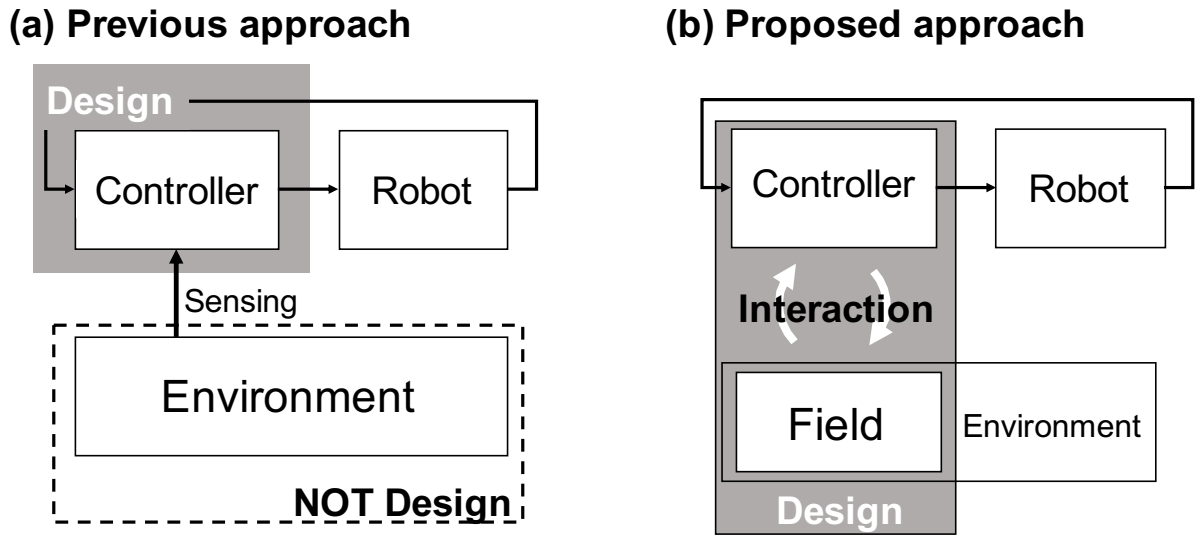


Fig. 1.2: Difference between previous and proposed approaches to designing the robot navigation system

く．また，ごく僅かな脳・神経系をしか持たない昆虫や，小脳脳・神経系を有しないアメーバなどは，環境情報を正確に取得する能力は無いにもかかわらず，うまく環境と折り合いをつけながら移動していく．つまり，動物は周囲環境全てをセンシングしているわけではなく，環境を移動しながらローカルな情報を得て，環境の変化に対して適宜その場で対応しながら移動している (Fig. 1.1(b))．このことから，生物は逆に環境を積極的に活用し，動的かつ予測不可能的に変化する環境を生き抜いていることがわかる．

このような生物の見せる環境に対する適応的な振る舞いを，制御の観点から解き明かすことを目的として大須賀らが提案した陰陽制御という概念がある．陰陽制御とは，移動知 [13] という研究プロジェクト中に提案された概念であり，人間の歩行といった大自由度系を制御する際にはすべてを脳といった中枢神経からの陽的な制御に頼るのではなく，身体と環境との相互作用から発現するダイナミクスをうまく利用しようというものである [14]．大須賀らはこの概念をもとに，受動歩行ロボットと呼ばれるアクチュエータを一切搭載しない 2 足歩行機械が，ロボット自身のダイナミクスと，斜面という環境との相互作用をうまく活用することで人間らしい歩行を実現している [15]．また，大脇らによって提案された 4 脚歩行ロボット OSCILLEX

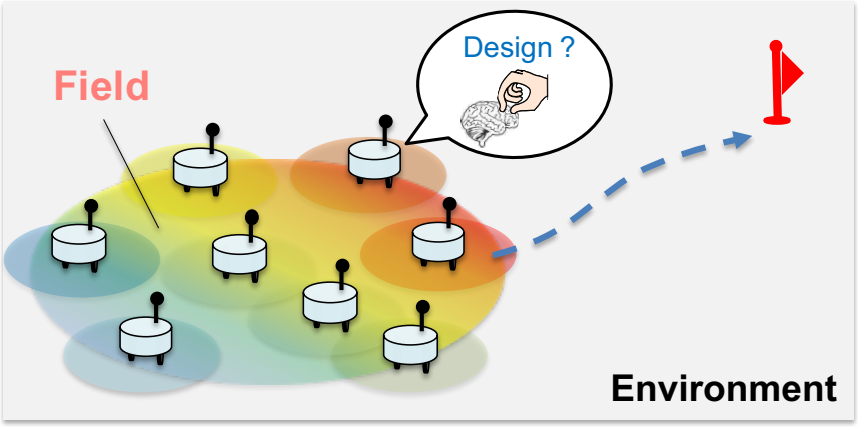


Fig. 1.3: Control problem of this paper : how to design the interaction between the field and the robot's controller in order to navigate the multiple robots to the goal position

が，各脚が自律分散的なセンサーフィードバックのみで駆動するのにもかかわらず，4 脚をつなぐ胴体の柔軟性と，床面との相互作用を上手く生かしてウマやゴリラといった 4 脚歩行動物の速度変化に応じた歩容遷移を見せた [16]．また，i-CentiPot と呼ばれるムカデ型ロボットは，モータの回転に合わせて多脚節を一方向に回転させるだけで，柔軟な身体を利用して不整地に沿って移動することができる [17]．これらの研究例から，ロボットが環境に対して適応的に振る舞うためには，陽的な制御をしすぎず，身体と環境との相互作用をうまく利用することが有効であることが示唆される．

さて，筆者はこの概念にシステム設計の鍵があると確信し，ロボット群が未知環境下を適応的に移動するためには，「ロボット自らが環境となり，それと他のロボットとの相互作用を制御に活かす」ことが必要であると考えるに至った．本博士論文では，Fig. 1.2 に示すように，ロボットが他のロボットの行動を制御するために，環境に創出する空間を**「場」**と称して，この「場」をどのように設計・制御するか，さらに，その「場」とロボットとの相互作用をどのように設計するかについて考えていく．この制御方式の利点として，環境の変化に対してリアルタイムで適宜複数のロボットが反応して「場」を創出し，適応的にロボット群をコントロールする点や，ロボットの台数の多さがそのまま我々が意図的に環境を「場化」する設計自由度を意味している点が挙げられる．

さて，このような群ロボットシステムの制御系設計論を構築するための第一歩として，本博士論文では，Fig. 1.3 に示すように，ロボットが置かれた位置からある決められた目的地に対

して，各ロボットが「場」を創出し，かつそれを制御することでエージェント群全体を自然と誘導することを**「「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導」**と称し，「場」とロボットの制御器との相互作用の具体的な設計法を提案し，解析的・実験的にその妥当性を検証する．

1.1.4 内容

第 3 章ではまず，提案する制御システムの妥当性を検証するための基礎実験として，「場」を創出するロボットの位置があらかじめ空間に固定されている状態から，「場」を制御することで 1 台の移動ロボットを誘導する実験に取り組む．本論文では，場を創り出すための物理メディアとして可聴領域音を用い，「音場」に基づくロボットの陰的誘導について考える．可聴領域音を採用した理由としては，可聴領域音は高い拡散性や周波数，音圧などの特徴量を有することも勿論だが，最たるは生成される音の強度は音源を中心とした仮想的な勾配を形成し，それがロボットの誘導に陰的に寄与すると考えたからである．さて，本論文では，可聴領域音が創る音場に基づいて，それをセンシングするマイクロフォンを搭載したロボットを誘導する問題について考える．この問題に対して 2 種類の異なる音場-ロボットの設計法を提示し，実機検証によりその妥当性を示す．1 つ目は，周波数の同質な音場を空・時間的に動的に制御することで誘導するものと，2 つ目は複数の異なる周波数の音場が空間的に静的に配置されている場合に，ロボットのコントローラを動的に切り替えることで誘導するものである．それらの結果から，音場の創成・制御法とロボットの制御則の設計法には自由度が存在し，それらのバランスによりシステムの安定性や収束性が変化することついて考察する．

第 4 章では，第 3 章で得た「場」とロボットの制御則との相互作用の設計指針をもとに，複数のエージェント群が「場」を創成・制御し，システム全体として自然と誘導される制御システムの実現および設計法の構築を行う．本論文では，シープドッグシステムと呼ばれる，牧羊犬のヒツジ追いにシステム設計のヒントを見出す [18, 19]．この現象は，少数の牧羊犬が，数百から多い時は千体の家畜であるヒツジの群れを追い立てて誘導するものであり，ニュージーランドやオーストラリアなどでは樹林が存在する山の斜面を多数のヒツジ群の誘導が見られる．ヒツジ同士は互いに群れ，かつ牧羊犬から逃避する性質があり，牧羊犬がそれを巧みに利用して外部から刺激を与えることで群れ全体を自然と誘導する．この現象を陰陽制御の観点から考察すると，少数の外部コントローラ (牧羊犬を指す) は時空間的に機動的に制御される陽

的な「場」であり，それらが対象である多数のエージェント群が，互いに群れ，牧羊犬から逃避するという陰的な「場」との相互作用をうまく利用することで，シンプルなルールに基づいて誘導を行っているとみなせる．ここで，本論文ではシープドッグシステムに着想を得て，多数のエージェント群を少数のコントローラで誘導を行う問題に対し，システムの陽的な制御器である牧羊犬の機動制御則と，陰的な作用を生み出すヒツジ群の群れモデルの設計を行い，その妥当性を理論解析，数値シミュレーション，実機検証から示していく．

まず，第 5 章では，実際のヒツジ群と牧羊犬の振る舞いをシンプルに表現した先行研究の数理モデルをもとに，ヒツジ群の群れモデルと，その群れの重心をターゲットとして追跡する牧羊犬の機動制御則を新たに構築する．次に，システムの制御構造およびその安定性を示すのだが，ヒツジと牧羊犬という異なるエージェント間の非線形な相互作用や，複数のヒツジの群れる作用を考慮すると，解析的に示すのは困難である．そこで，ヒツジ群を「ヒツジの中心 (重心) に位置する 1 体のヒツジ」とみなし，牧羊犬 1 体と，ヒツジ 1 体の 2 体問題にシステムを落とし込み，安定性を解析的に示す．次に，解析結果に基づいて，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法を構築する．

第 6 章では，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法から，複数のヒツジの誘導における機動制御則の設計法の構築に取り組む．数値シミュレーションの結果から，ヒツジ同士の相互作用をうまく設計することで，ヒツジ群を重心が中心の 1 つの円板体とみなすことが可能となることを示す．そして，この結果から，ヒツジ 1 体での機動制御則の設計法を複数のヒツジの誘導に適用可能になるように拡張する方法について述べ，その妥当性を複数のロボットの実機実験を行うことで示す．

最後に，第 7 章では，設計した牧羊犬の機動制御則をもとに，自律分散的に制御されたヒツジ群の誘導性能の評価を数値シミュレーションにより統計的に解析する．先述した機動制御則では，牧羊犬はヒツジの重心をターゲットとして追跡するが，ヒツジ同士が円板体として近似できない，つまり散らばる群れに対しては適用できない．そこで，ターゲットをゴールから最も遠い個体と設定することでヒツジ群に対してロバストに誘導する最遠個体追跡制御を提案し，伝統的な誘導法である中心追跡制御や，先行研究で提案された実際の牧羊犬とヒツジの誘導をもとにモデリングされたターゲット切り替え制御と誘導性能の評価を行った．次に，提案する誘導システムの工学的応用を見据えて，牧羊犬の得られるヒツジの位置情報を可能な限り

制限することを考える．実際の牧羊犬のヒツジ追いでは，ヒツジには大きさがあるため群れているヒツジ群の表面のヒツジしか牧羊犬は知覚できないと考えられる．そこで，牧羊犬のローカルな視野範囲に着想を得て，ヒツジはあるサイズをもった円体だと設定し，ヒツジ同士の重なり合いで見えないヒツジを仮定することで，牧羊犬の誘導性能の変化を考察する．また，牧羊犬が知覚するターゲットの位置の精度や，ゴールとヒツジ群と牧羊犬の初期位置関係が誘導性能へ与える影響を解析する．

1.2 本論文の構成

改めて本博士論文では，制御対象であるエージェント群の制御則と，エージェント群と「場」との相互作用が巧みにマリアージュされ，システム全体として自然に制御目的が達成されるような制御を**「「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導」**と呼称し，その具体的な設計法と妥当性を示すことを念頭に議論を進めていく．本論文の構成を以下に示す．また，フローチャートを Fig. 1.4 に示す．

第 2 章では，本論文で提示するマルチエージェントシステムにおけるエージェント群の陰的誘導システムの概念について詳細に述べる．まず，本研究で扱うマルチエージェントシステムの例を広く列挙し，その多くに見られる自律分散制御の重要性について述べる．次に，自律分散制御を用いた群ロボットシステムやマルチエージェントシステムの研究例について示し，その制御構造とそれが抱える問題点を明確に述べる．そして，その問題に対して，大須賀らが提示している「陰陽制御」の枠組みからマルチエージェントシステムの制御系設計を考え，そこから我々が提案する「場」に基づくエージェント群の陰的誘導制御のシステム設計およびその概念について提示し，その特徴を説明する．

第 3 章では，「音場」の制御に基づくエージェント群の誘導制御システムについて述べる．ロボットを意図的に制御するために我々が環境に付与する「場」を可聴領域音で生み出し，その「音場」の強度勾配に基づいてシンプルなコントローラをロボット群に設計することで，陰的に誘導するシステムを提示し，実機実験によりその妥当性を検証する．

第 4 章では，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導システムの概要について述べる．

まず第 5 章では，先行研究で提示されたヒツジ群と牧羊犬の数理モデルをもとに，ヒツジ群

の群れモデルと牧羊犬の機動制御則を新たに構築する．次に，ヒツジ群を「ヒツジの中心 (重心) に位置する 1 体のヒツジ」とみなし，牧羊犬 1 体と，ヒツジ 1 体の 2 体問題にシステムを落とし込み，安定性を解析的に示す．次に，解析結果に基づいて，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法を構築する．さらに，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法から，ヒツジ群を重心が中心の 1 つの円板体とみなすアプローチをもとに複数のヒツジの誘導における機動制御則の設計法の構築に取り組む.

第 6 章では第 5 章の安定性解析の結果から，ヒツジ 1 体での機動制御則の設計法を複数のヒツジの誘導に適用可能になるように拡張する方法について述べ，その妥当性をシミュレーション，および実機検証により示す.

第 7 章では，第 5 章で提示した牧羊犬の機動制御則に基づいて，分散度の高いヒツジ群に対する誘導性能を統計的に解析し，従来の牧羊犬の誘導コントローラとの比較を行う．まず，従来のコントローラである 2 つのコントローラと，本論文で新たに提案する，最遠個体追跡制御の 3 つの誘導制御法の詳細について述べる．次に，3 つのコントローラに対して複数の散らばったヒツジをある円内に囲いこむ誘導を行い，評価指標をもとに誘導性能を比較し，検討する．そして，提案する機動制御則の実際の群ロボットシステムへの適用を目指して，牧羊犬にローカルカメラを設定し，得られる情報を制限しても誘導が達成されるかを，ヒツジの分散度合いを変化させて統計的に解析する．また，ローカルカメラの精度とゴール，ヒツジ群，牧羊犬の初期位置関係が誘導性能に与える影響を解析する.

第 8 章では，本論文で提案している「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導システムについてまとめる．そして最後にこの研究に関する今後の展望について述べ，本論文を締める.

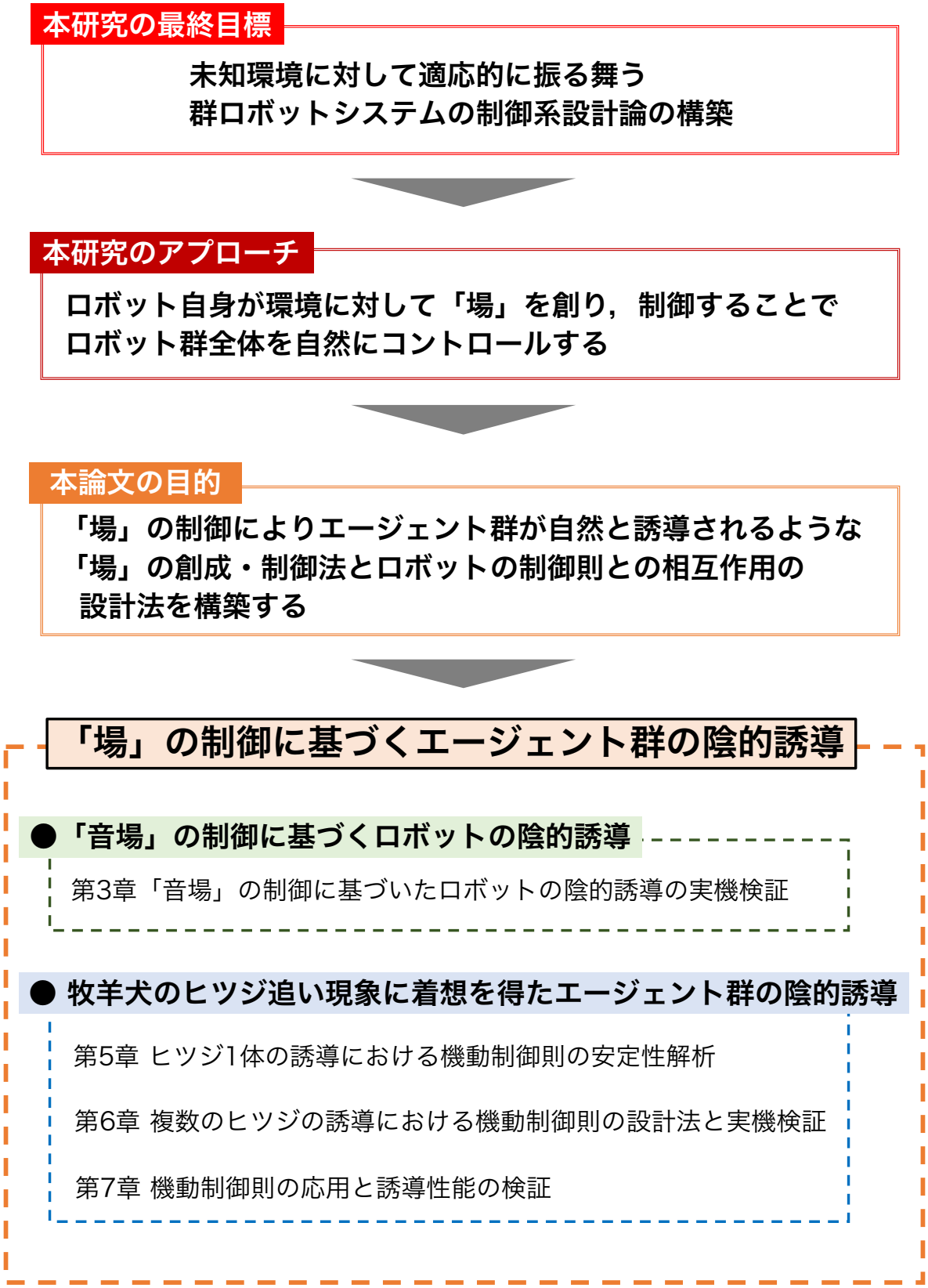


Fig. 1.4: Flow chart of this doctroal thesis

第 2 章 「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導

2.1 研究背景

ここではまず，自然界に存在する「群れをなす生き物」に関する様々な研究を広く取り挙げ，その中に多く見られる自律分散制御構造について述べる．次に，群れをなす生き物を模倣し設計されてきた群ロボットシステムについてその先行研究を交えつつ紹介する．それに対して，本論文で注目している「場」の制御に基づくロボット群の制御システムについてその概要と過去の研究事例を述べる．最後に，大須賀らが提案している，陰陽制御の概念をこの制御に取り入れた「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導の枠組みを改めて述べる．

2.1.1 群れをなす生物の制御構造：自律分散構造

我々人間を含め，自然界には群れをなす生き物が多数存在し，「なぜ群れるのか」，「群れ行動はどのように生まれるのか」，という興味は世界中の研究者を魅了し続けてきた．ここではまず，アリやシロアリといった社会性昆虫や，魚，鳥などの知能を持つ生き物の群れ行動がどのように生まれるのかについて関連研究を踏まえて述べることとする．

アリはフェロモンと呼ばれる化学物質を媒介としてコミュニケーションを行うことで個々の能力を遥かに凌駕する知的行動を示すと言われる [20]．代表的な振る舞いとしては，フェロモントレールを用いた採餌行動 [1] や，複数のアリによる協調物体搬送 [21]，身体を連結させて橋やイカダを創ることで女王アリや卵を運搬する協調行動 [22] などが挙げられる．特に採餌行動に関しては，フェロモンの特性を巧みに利用したアリの代表的な協調行動であると言えよう．アリはまず巣からランダムに移動しながら餌を探し，1 匹のアリが餌を見つけると，フェ

ロモンを地面に塗布しつつ巣に帰り，仲間のアリがフェロモンを追跡することでフェロモントレールを構築する．フェロモンには揮発性があるため，長いトレールは時間と共に蒸発・拡散していくが，経路の短いトレールはその上を通るアリがフェロモンを補強する速度の方が早いため，フェロモン濃度は高いまま維持される．結果，各個体は局所的なフェロモン情報のみを用いて行動しているのにもかかわらず，自然と巣と餌場の最短経路を結ぶトレールのみが形成される [1, 23].

社会性昆虫の見せる振る舞いの中でも，シロアリの構造物形成は特筆に値するものである．シロアリは数十万の神経細胞しか持たないのにもかかわらず，自身の大きさからは比較にならないほどの巨大な巣を構築する．オーストラリアのダーウィンに生息するテングシロアリ亜科のシロアリは全長 5m を超えるアリ塚を形成する．その巣の内部には頂点部から深部まで無数の小部屋があり，それらはトンネル状の道で接続され，しかも巣の中の温度と湿度が正確に保たれている，という驚くべき特徴を持つ [3]．シロアリはまず土を口に含み，セメントフェロモンと呼ばれる誘引物質を練り込んで土を固めつつ巣を作る．他のシロアリはそのフェロモン濃度を判断し分散して巣作りを行うと言われている．

魚の群れは，群れ内に特定のリーダーが存在せずとも，まるで群れ全体が一つの生命体のように群化し，整然とした整列行動を示す．魚は主に視覚と側線と呼ばれる体の側面にある水流・水圧を感知するセンサを用いて近傍個体を認識し，最適な距離を保ちつつ遊泳しているといわれている [24]．このことから，各個体の近傍個体との位置関係に基づく群れ行動モデルが多数提案されており，自己組織的に実際の魚群行動を再現している [25, 26, 27, 28]．それらの研究から，魚の後方の死角領域を変化させると創発的に群れ全体の挙動が変化すること [29]，魚群全体と一部の魚の動きにはフラクタル性が存在し，それは個体数により次元が変化するといった興味深い結果が示されている [24]．また，実際の魚群の位置データを統計的に解析することで，各個体は近傍個体の速度や姿勢を平均化する力に基づいて移動すること [30] や，群れ全体の進行方向は各個体の意思の多数決により決定されることが明らかになっている [31].

鳥群も魚群と同様に，長年研究対象とされてきた群れをなす生物であり，主にシミュレーションモデルによる群れ行動の解析が進められてきた [32]．代表的な研究として Reynolds らが提案した Boid モデル (Bird-oid model) が挙げられる [33]．このモデルでは，各個体は周囲の個体とぶつからないように距離を取り (Separation)，遠い個体には離れないように近づき

(Cohesion)，かつ速度を揃える (Alignment) という 3 種類の力に基づいて移動する．このようにシンプルかつ局所的な近接情報のみに基づくモデルであるにもかかわらず，実際の鳥の複雑な振る舞いを再現しており，3 種類の力のバランスを変えることで異なる振る舞いを創発することが可能である．また，Ballerini らは 400 個体以上が属する 500 グループのホシムクドリ (Sturnus vulgaris) の群れの 3 次元位置データを取得し解析を行っている [34]．その結果，任意の個体に対する最近傍個体が，群れ全体の進行方向に沿って存在する確率は他の方向に比べ極端に低くなることが明らかになった [35]．また，Cavagna らは，ムクドリの群れの中に群れ全体の平均的な動きとは異なる動きを示す部分，いわゆる「群れの中の群れ」が存在し，その「群れの中の群れの大きさ」と「群れ全体の大きさ」とは相関関係があることを見出し，この現象をスケールフリー相関と呼び，群れらしさを表す指標として定義している [36].

以上より，群れをなす生物の振る舞いは長い間世界中で幅広く研究されているが，「局所的な行動からなぜ大域的な振る舞いがが発現するのか」という根本的な疑問に対する明確な回答は存在しない．しかし，群れをなす生き物は決して群れ全体の正確な情報を取得し，それに基づいて行動することや，ましてや特定のリーダーに従い行動しているわけではなく，周囲の仲間の位置や周囲状況をセンシングし，そこから得られた局所的な情報に基づいて行動していると考えられる．にもかかわらず，環境の変化に対して適応的に振る舞いを切り替え，他個体と協調して 1 個体では到底なし得ない高効率なタスクを達成する．このことから，複数のエージェントが周囲環境から得られた局所的な情報から自律的に行動を決定するシステム構造，つまり自律分散構造が重要であるといえる．

2.1.2 群れをなす生物から学ぶ：群ロボットシステム

上記で述べた群れをなす生き物の振る舞いをロボット設計に活かす学問分野はスワームロボティクス (SWARM ROBOTICS, SR) と呼ばれ，この分野では盛んに群ロボットシステムについての研究が行われている．群ロボットシステムとは，単体のロボットでは達成困難あるいは達成不可能な複雑なタスクを複数台のロボットが分散・協調することで行うシステムである．スワームロボティクスのおける先駆的な研究者であるŞahin は，群ロボットシステムは以下の 3 つの機能を有することが望ましいと述べた [37].

- 柔軟性 (Flexibility) : 各ロボットが複数のタスクに対して分業を自律的に行うこと

- 頑強性 (Robustness) : ロボットが何台か故障しても他のロボットがタスクを安定して行うこと
- 拡張性 (Scalability) : ロボットの台数が変更してもシステムとして機能すること

このような能力を生かして，災害現場や宇宙空間など主に人間が立ち入れないハザードエリアでの広範囲の探索や協調作業などを行うことが期待されている．さらに，ロボット 1 台の設計をよりシンプルにし，かつ製作コストを下げることで，システム全体の製作コストを減らすことが可能となる．

スワームロボティクスという研究分野は，Dorigo らにより 2002 年から 2005 年の間行われた SWARM-BOTS PROJECT から端を発したといわれている [38]．その中で，多数のシンプルな機能を有するエージェントが，局所的な相互作用から群れの大域的な振る舞いをボトムアップに設計するといった，群ロボットシステムの一般的な枠組みが定義された．その後，Swarmanoid project (2006 年から 2010 年)[39]，E-SWARM project (2010 年〜) と引き続きプロジェクトが行われており，今までに多種多様な群ロボットシステムが提案されている．

Dorigo らは，SWARM-BOT という自律移動ロボット群を製作し，ロボット同士の連結や，物体の協調搬送を自己組織化的に実現している [40]．また，地上のロボット群と空中の UAV とをコミュニケーションさせることで屋内領域の探索など，より具体的なシチュエーションでの群システムの実用例を多数示している [41]．Rubenstein らは，Kilobot と呼ばれる 1000 台の小型移動ロボット群を用いた自己組織的な形状変化や，ルート形成などの群行動の実現に成功している [42]．Nagpal らが提案した Termes と呼ばれる小型ロボット群システムは，シロアリの構造物形成に着想を得た 3 次元構造物形成を実現している [43]．ロボットは小型のプレートを一層ずつ積み上げていき，それを足場として利用しさらに高くプレートを積み上げていく行動は興味深い．また，Kumar らは，複数のドローンの編隊飛行や，3 次元的な協調運搬作業を実現しており，現在でもドローンを用いた群制御の研究を進めている [44]．

また，ロボットの自己組織的な行動創発を目的としたスワームロボティクスとは異なり，グラフ理論やシステム安定論といった制御理論に根差すマルチエージェントシステムの研究も近年盛んに行われている．例えば，合意制御によるエージェント群の編隊制御 [45] や，オブジェクトの包囲と誘導 [46, 47]，被覆制御や分散最適化によるエリア探索 [48] などがある．その他にも，複数のロボット同士が連結し協調ロコモーションや障害物の踏破などを行うモジュラー

ロボット [49, 50] や，ヘビ型ロボットに代表される各関節を分散的に制御し全体のロコモーションを発現させる索状型ロボット [51, 52] も自律分散制御を上手く活かしている．

2.1.3 「場」の制御に基づく群ロボットシステムの制御

それらに対して，本論文で着目している「場」の制御に基づくロボット群の制御について述べよう．この概念は，床に置かれた複数のボールをイメージしてもらうと理解しやすい．複数のボールを一度に左から右へ移動させたい場合，一つ一つを手で摘んで動かすのではなく，床を右に傾けることで一斉にボールたちを右へ転がす方法も考えられる．この「床を右に傾ける」動作こそが,「場」(床) を制御することでロボット群 (ボール) を一挙に操ることを意味する．我々が仮想的なポテンシャル場を創り，それを制御することで，ロボットは「場」に従い移動するだけで自然と所望の状態へと制御できる．仮想ポテンシャルに従うロボットの制御は今まで数多く研究されてきたが，緒言の Fig. 1.2(a) に示すように，それらは主にロボットの望ましい動き（障害物回避など）を実現するために必要な仮想ポテンシャル場を空間にあらかじめ設定した上で，ロボットの制御器を設計していた．これに対して，本研究で考える「場」の制御に基づくロボットの誘導制御では，Fig. 1.2(b) に示すように，場を誘導のためのコントローラの一つとして扱い，ロボットの制御器と場の制御器との相互作用を意識してそれらを同時に構築する．この制御の特徴は，ロボットには環境をセンシングする機能や，ロボット同士の複雑な相互作用を陽に設計してはいないという点であり，ロボットのコントローラ設計がシンプルになることが期待できる．

では，どのように「場」を設計し制御すればいいのだろうか？過去「場」に基づくロボットシステムが多数提案されており [53],「場」の創成および制御の仕方もさまざまである．

ここではまず，ロボットが物理的に周囲環境を改変することで協調的な振る舞いをするシステムについて紹介する．Steels は，フェロモントレールに基づくアリの採餌行動からヒントを得て，複数ロボットによる自律的な岩石採集を行うシステムを提案している [54]．このシステムでは，パン屑を用いてフェロモントレールを表現している．基地から岩石の置かれたエリアとの間にロボットはパン屑を落としていき，それを辿って移動することで 2 点間を行き来して岩石を基地へと持ち帰る．本来，道しるべとなるフェロモンは揮発性を有するため効果を発揮するが，この研究ではロボットがパン屑のトレールを移動しつつパン屑を少量拾うことでフェ

ロモンの特性を擬似的に再現している．また，Deneuboug らや Beckers らは，アリの物体集積行動に着想を得て，環境に散らばるオブジェクトをクラスタリングするロボット群を提案している [55, 56]．特に Beckers らの提案するロボットにはハンドがついており，ロボットは移動しながらゴミを模したパックを集める．ロボットが周囲のパックを移動させることで物理的に「場」を改変し，自身もパックとの相互作用に従い行動を切り替えることで，自己組織的に物体のクラスタリングを達成している点は非常に興味深い．

ロボット自身が自律的に環境自体を改変するロボットシステムも存在する．Napp らは，ロボットが爪楊枝や砂袋，発泡ウレタンを用いて環境に足場を形成し踏破するロボットを製作している [57]．Sugawara らは溝にロボット自身が積載することで足場になり協調踏破行動を行うシステムも提案している [58]．

次に，化学物質や物理メディアを用いて場を改変しロボットを制御するシステムについて述べる．Sugawara らや Garnier らは，プロジェクターを用いて床面に仮想フェロモントレールを投影し，ロボットは光センサを用いてそれを検知することで複数ロボットの採餌行動を獲得している [59, 60]．一般的にフェロモン等の匂い物質は扱いが難しい一方で，光は比較的容易にトレールを再現でき，かつ光の明るさや色で濃度や種類の異なるフェロモンを表現できる点が画期的である．また，光の強度の勾配場に沿ってロボットを移動させることで，ロボット群の分割・集合行動に活かす研究もある [61]．Russell らは，熱センサとヒーターを搭載したロボットを製作し，ロボットが地面を熱することでフェロモントレールを形成する実験を行い，その有効性を示している [62]．また，Fujisawa らは，ARGOS (Antelligent Robot Group Operating System) と名付けられたロボット群システムを製作し，フェロモントレールを活用した重量物体の協調搬送を実現している [63, 64]．このシステムでは，エタノールを用いてフェロモントレールを再現している．エタノールは匂いと同様の揮発性，拡散性を有しており，かつ水分を混合することで容易に濃度を変えることができるため，エタノールの濃度や残存時間を調節することで複雑なコミュニケーションが可能となる．実験では，各ロボットが塗布するフェロモン濃度が採餌性能に与える影響や，総量の異なる 2 つの餌場がある場合でも，ロボットが餌量を判断し，巣と餌場を結ぶトレールは持続時間が長くなるように，逆に餌量が少ない餌場を結ぶトレールはすぐ消えるようにエタノールを塗布することでうまく採餌行動が持続されることを示している．

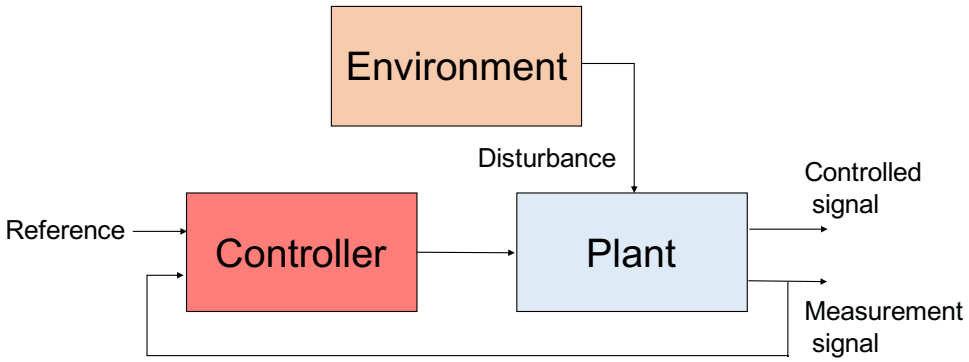


Fig. 2.1: Traditional control system

このように，「場」の制御に基づいた群ロボットシステムでは，ロボット自体に複雑な制御を設計せずとも，ロボットの置かれた「場」を巧みに設計することで多彩な群行動を実現している．一般的なロボット群の制御では，ロボット同士が無線通信を用いて情報をやりとりするが，上記の方法では，各ロボットが作り出した場を介して間接的にコミュニケーションを行っていることがわかる．また，匂いや熱，光などといった「場」を創る物理量の特性を巧みに利用することで，より複雑な制御を可能にしている点で新規性が高い．そして，実環境で「場」の制御に基づくロボット群を運用する場合は，その環境にあった物理メディアを採用することで効率よくシステムを運用できるなどのメリットが期待できる．

しかしながら，何かしらのタスクに対して「場をどのように設計・制御するか」と「ロボットがどのように場をセンシングし，行動するか」といった，場の制御に基づいた群ロボットシステムのシステム設計法については十分に議論されていない．

2.1.4 陰陽制御が示唆する群ロボットシステムの設計指針

では，「場の創成・制御法」と「各ロボットの制御法」はそれぞれどのように設計すればいいのだろうか？ここで改めて考えてみると，制御という学問自体が「場」を制御すること，つまりロボットの置かれる周囲の環境を改変し，制御することは想定していない．なぜなら，Fig. 2.1 に示すように，従来の制御では環境からの影響は全て外乱であり，その影響をできるだけ抑制しつつ，制御対象を陽的な制御則で中央集権的にコントロールするからである．

一方で，もう一度生物の振る舞いを思い返してみると，上記でも述べたように彼らは環境や

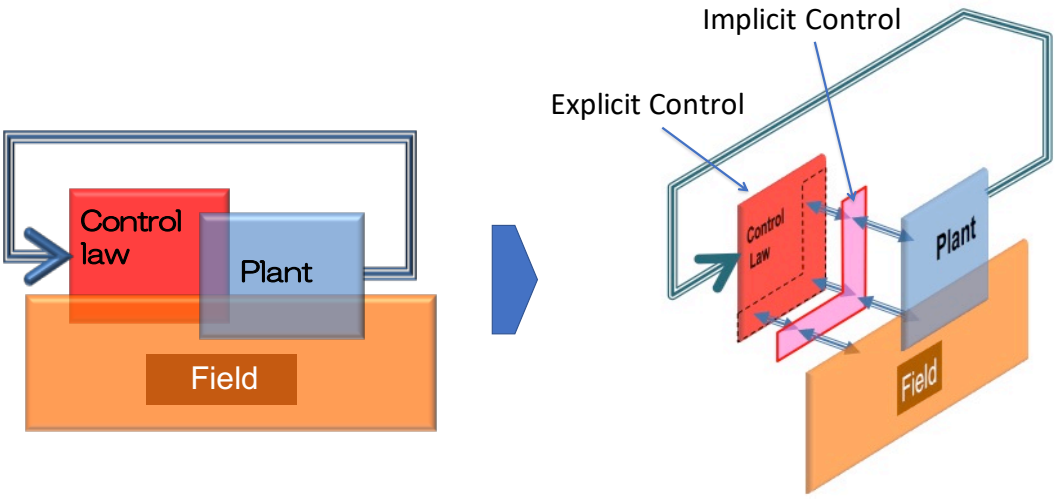


Fig. 2.2: Implicit control and explicit control [65]

周囲の他個体との相互作用を巧みに利用しながら生存していることに気づく．わずか数十〜数百万ニューロンの神経細胞しか持たないアリやハチといった昆虫が，大きく変動する過酷な自然環境を適応的に生き抜いていることは事実であり，それらの生物が複雑かつ中央集権的な制御により行動しているとは到底考えられない．脳・神経系が必ずしも知的な振る舞いを生み出す源泉ではないことを示す代表的な研究として，徐脳猫の歩容遷移がある [66]．この研究では，大脳が排除された猫が体を支えられつつトレッドミル上に置かれると猫が歩き出し，さらにトレッドミルの速度を上げていくと，通常の猫と同様に速度に応じて Walk, Trot, Gallop と歩容を遷移する．また，受動的動歩行器に関する研究も非常に興味深い例である．このロボットは，歩行のためのアクチュエータは一切搭載していないのにもかかわらず，斜面に置くと重力を利用して人間の歩容さながらの自然な歩行を発現する [67]．このロボットは円弧状の足裏形状を有しており，接地面との相互作用をうまく利用することで機体が左右に揺動し，それにより左右の脚が前に振り出される．つまり，通常の脚歩行ロボットは「倒れない」ように制御するのが一般的だが，受動歩行器は「倒れる」ことを利用して歩行を行うのである．さらに，その歩行の周期安定性も理論的に示されており，ロボットの身体自体に歩行を安定化させるフィードバック構造が内在していることが明らかになっている [68]．

このような研究事例から，大須賀らは「陰陽制御」の概念を提唱しており，以下のように定義している [65]．

- **陰陽制御: 身体のダイナミクスと環境との相互作用によって表出する制御を陰的制御，明示的にプログラムとして与える制御を陽的制御とする．**

つまり，Fig. 2.2 に示すように，我々がロボットに直接設計する制御則を陽的制御，ロボットの身体的特性やロボットと周囲の環境との相互作用によりある種制御則のような働きをする要素 (物理現象) を陰的制御と称し，この 2 つを合わせて一つの制御とする考え方である．この陰陽制御の考え方に基づいて，受動歩行器の歩行の安定性 [68] や，円制限 3 体問題におけるラグランジュポイントの安定性が，陰的な制御則によって示されていること [69] や， Deneubourg や Pfeifer らが提案した Swiss Robot[70] と呼ばれる移動ロボットによる物体クラスタリング現象に潜む制御構造の解明も行われている [71]．また，石黒らは OSCILLEX[16] と呼ばれる 4 脚歩行ロボットの適応的な歩容遷移を陰陽制御の観点から考察し，陽的に設計した制御則と環境との相互作用のバランスの重要性を論じている．さらに増田らは，DC モータの回転により周期的な脚先軌道を生成する 4 脚歩行ロボットが，モータ自体の「弱さ」と各脚をつなぐ胴体の柔軟性により，各脚に陽的な制御を設計せずとも移動速度を上げることで適応的な歩容遷移が発現することを示しており，無脳 (ブレインレス) アプローチによる移動ロボットの適応的振る舞いの獲得について研究している [72].

そこで本論文では，「場」の制御に基づくロボット群システムの構築に際して，この陰陽制御の概念を適用し，我々が明示的に各ロボットに与える陽的な制御則と「場」および周囲のロボットとの相互作用による特性を生かしたロボット群の制御を「陰的誘導」と称する．

2.1.5 「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導

さて，ここからは前項までの内容を踏まえて本論文の内容について改めて述べることとする．第 3 章からはまず,「場」の制御に基づくロボットの制御において「場の創成・制御法」と「ロボットに与える制御器の設計法」との関係を明らかにするために,「場」の制御に基づいて 1 台のロボットをある決められた地点 (ゴール) への誘導する問題を取り扱う．本論文では，Fig. 2.3 に示すように，可聴領域音を用いて「場」を創出し,「音場」の制御に基づくロボットの誘導を実機検証する．音は熱や匂いに比べて拡散性が高い物理量であること，また，光や電波と同様に波動性を有するため，その強度が音源からの距離の逆二乗に比例して減衰する「逆二乗の法則」に従うことや，周波数というメディアとしての多彩な情報を持つ．本論文ではこ

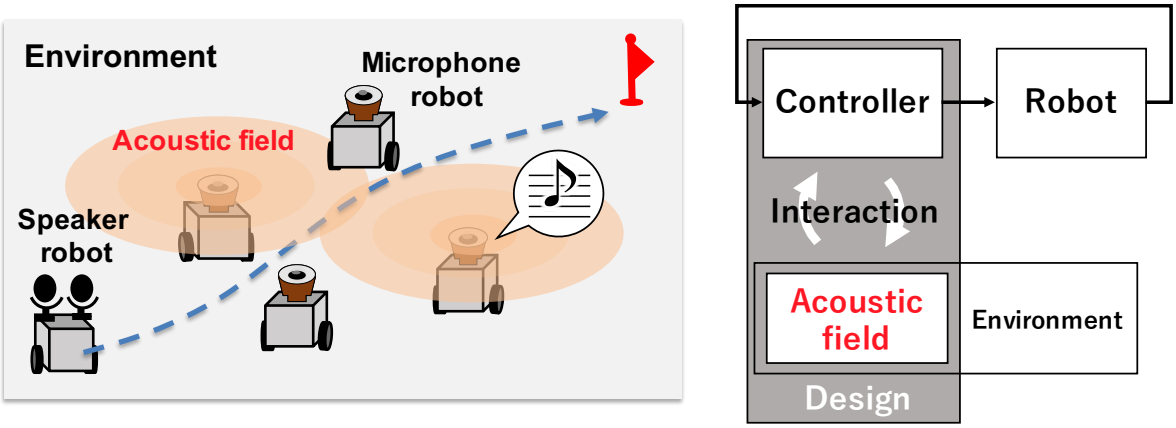


Fig. 2.3: Proposed navigation system 1: implicit navigation for a mobile robot based on the acoustic field control

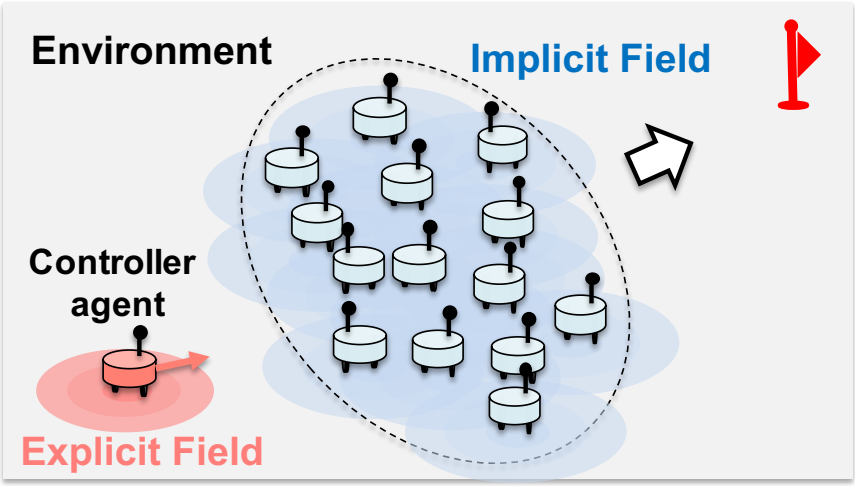


Fig. 2.4: Proposed navigation system 2: implicit navigation for multiple agents based on the filed control

れらの性質を巧みに利用し，2 種類の「音場」の制御に基づく陰的ナビゲーションシステムを提示する．一つ目は，音の強さを仮想的なポテンシャル場の勾配と設定し，それに沿って移動するロボットを製作する．そして，その音場の位置を動的に制御することで，それに従い移動するロボットが自然と誘導されるシステムを構築する．二つ目は，音の強さのみを取得でき，自身で音の強さの感度を動的に制御することで自然と仮想的なポテンシャル場の極大値，つまり音源へ誘導されるロボットを設計する．そして，周波数の違いにより複数の異なる音場を表

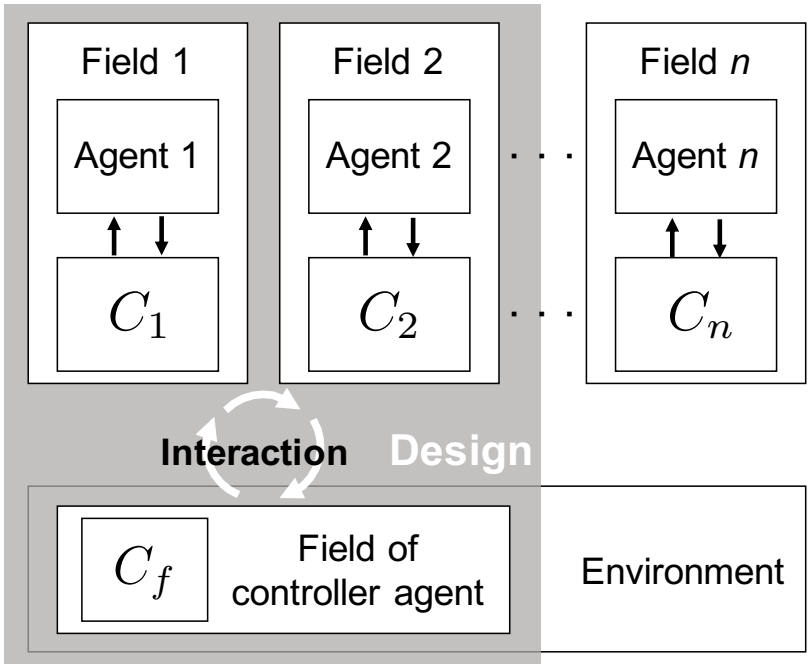


Fig. 2.5: System scheme of the implicit navigation for multiple agents based on the filed control

現し，それらを空間に静的に固定した音場トレールを用いた誘導を行う．そしてそれぞれの実験結果から，「場の創成・制御法」と「ロボットに与える制御器の設計法」とのバランスに関して考察する．

次に，上記の結果から得られた知見をもとに，第 4 章以降では，各ロボットが自律的に「場」を創成・制御することでシステム全体を望ましい状態へ誘導する群システムの設計について考えていく．ここで我々は，Fig. 2.4，2.5 に示すように，「場」自体を制御対象とは異なる種類のエージェントとして扱い，そのエージェントが創る陽的に制御された「場」と，多数のエージェント群が生成する「場」との相互作用を活かした陰的誘導システムを提示する．システム設計に際して，我々は自然界で見られる牧羊犬のヒツジ追い現象を参考にする．この現象では，少数の牧羊犬が多数のヒツジの周りを走り回りつつ後方から追い立てることで，ヒツジの群れ全体を目的地へ誘導する．興味深いのは，牧羊犬は全てのヒツジに直接働きかけるのではなく，群れの一部にのみ刺激を与えることで間接的に群れ全体を制御している点であり，牧羊犬はヒツジ同士が群れる作用，ヒツジが犬から逃避する作用を巧みに利用し，自然と群れ全体を目的地へ誘導しているのである．これを「場」の制御に基づくエージェント群の誘導システムと捉えると，「ヒツジを目的地へ追い立てる」という陽的に制御される動的な「場」(牧羊

犬) と,「牧羊犬から逃げ」,「周囲のヒツジに引き寄せられる」というヒツジが創出する陰的な「場」との相互作用を利用し，自然と誘導を達成するシステムとみなせる．このことから，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得て，2 種類のヘテロな「場」の相互作用に基づくエージェント群の陰的誘導システムの構築を行う．本論文では，過去羽尻らにより提案された機動制御則 [73] による大規模移動体の誘導システムをヒントに，ヒツジ群が創出する「場」と，牧羊犬が創出する「場」の設計・制御法を示す．次に，ヒツジ 1 体と牧羊犬 1 体の誘導について安定性解析を行うことでシステム設計法を構築し，この設計法を複数体のヒツジの誘導に拡張していく．そして，ヒツジ群のもつ「ヒツジ同士で群れる」という陰的な作用が強い場合と弱い場合とで，提案する牧羊犬の機動制御則による誘導性能がどのように変化するかを検証する．この結果から，ヒツジの創成する陰的な「場」と，それに対する牧羊犬の陽的な「場」との性能のバランスを考察し，最後に「場」の相互作用に基づくエージェント群の陰的誘導システムの設計論について議論する．

第 3 章 「音場」の制御に基づくロボットの陰的誘導

3.1 研究背景

本章では，本論文で提案する，「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導について，「場の設計・制御法」と「ロボットの制御則」との相互作用の設計指針を見出すために，まずある目的地へ 1 台のロボットを移動させるという最も基本的な誘導問題に対して，「場」の制御に基づくロボットの陰的誘導の実機検証を行う．本論文では，「場」を創成する物理量として音を用い，「音場」の特性を利用したロボットの陰的誘導を扱う．ここでは 2 種類の誘導システムを提示し，それぞれで移動ロボットを製作し，実験を行う．一つ目は，Fig. 3.1(1) に示すように，音場の勾配に沿って移動するロボットと，動的に制御される音場トレールによる誘導である．可聴領域音をセンシングできるマイクロフォンを 2 つ搭載するマイクロボットを製作し，音源方向を推定することで音場に沿って移動するコントローラを設計する．それに対して，空間にあらかじめ配置したスピーカロボットから音を鳴らすタイミングを切り替えることで時空間的に音場の位置を制御し，マイクロボットを経路に沿って誘導する．2 つ目は，Fig. 3.1(2) に示すように，音の閾値を動的に調節するロボットと静的に固定された音場トレールによる誘導である．音の強さのみ感知できるロボットを想定し，ロボットがセンシングする音の強さに馴化していくことで自然と音場の中心，つまり音源へ誘導されるコントローラを提案する．これに対して，スタート地点からゴール地点まで複数の周波数の異なる音を空間的に固定することで音場トレールを形成することで誘導を行う．それぞれの実機実験を通して，音場の設計・制御法とそれに対するロボットのコントローラの設計法の妥当性を示し，それぞれのバランスを議論する．

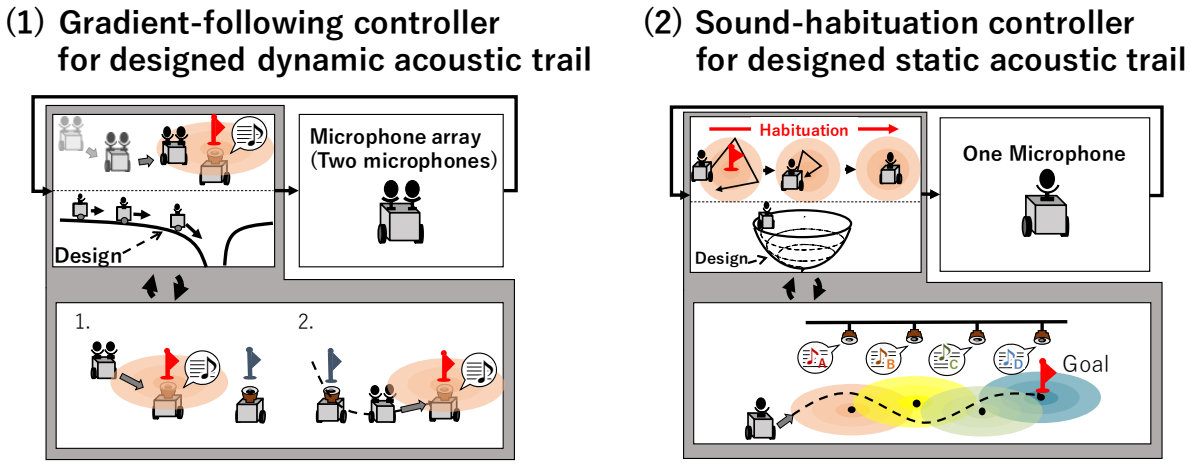


Fig. 3.1: Two proposed navigation methods:(1) gradient-following controller for designed dynamic acoustic trail: the robot is designed to follow the gradient of the acoustic field with two microphones, and is navigated by changing the field shape dynamically. (2) Sound-habituation controller for designed static acoustic trail: the robot, equipped with one microphone, is controlled toward the sound source by habituation of the acoustic sound, and is navigated using the static acoustic field.

3.2 誘導システム (1): 音場トレールの動的制御に基づく音場追従型ロボットの誘導

本節では，誘導システム (1) : 音場トレールの動的制御に基づく音場追従型ロボットの誘導について述べる．このシステムでは，まずあらかじめスピーカを搭載したロボットを所望の経路の中継地点に配置し，空間に音場を創出する．それに対して，移動ロボットには 2 つのマイクロフォンを搭載して，音場の強度に従って移動するコントローラを設計する．そして，各中継地点に置かれた音場を動的にスイッチングすることでロボットが複数の経由点間を誘導される実験を行う．

3.2.1 誘導システム (1) のロボット：音場追従型コントローラの設計

ロボットが音場に沿って移動するために，我々はマイクロフォンアレーを用いてロボットに音源方向を推定させる．2 つの音波が同位相の場合，その合成波は互いに強め合い，逆に，逆位相の場合，合成波は互いに打ち消し合い 0 になる．この音波の特性を利用して，ロボットは 2 つのマイクで構成されたマイクロフォンアレーを用いて音波を受信し，合成波を計算する．そして，ロボットは合成波が最も強まる方向をセンシングデータから検出し，その方向に進む．

Fig. 3.2 にロボットの外観を，以下にロボットに搭載されたデバイスを示す．

1. ATmega328P 搭載 Arduino Fio (ARM 社)
2. Electret Microphone Breakout (BOB-12758, made by Sparkfun)
3. Piezoelectric Speaker (PB10-Z338R, made by SPL)
4. Dual Motor GearBox (ITEM 70097, made by TAMIYA)
5. Servo Motor (GWS MINI Mini Servo, made by GWS)

ロボットは 2 つのマイクロフォンを装備したマイクロフォンアレーを搭載し，サーボモータによりロボットの前方 180[deg] をセンシングする．加えて，マイクロフォンの後方には衝立が設置してあり，後方からの反射音や透過音を受信するのを防ぐ役割を果たす．2 つのマイクロフォンの間隔は，音場を生成する音波の波長の 1/2 と等しく設計しており，これはマイクロフォンアレーの真横から音を受信した場合に，2 つの受信音が逆位相となり合成波が打ち消し合うようにするためである．これにより，ロボットは正確に音源方向を推定することが可能である．音場を生成する音波の周波数を f [Hz]，波長を λ [m]，音速を c[m/s] と定義すると，2 つのマイクロフォンとの距離 L [m] には以下の関係式が成り立つ．

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2L} \tag{3.1}$$

ただし，$c = f\lambda$ の関係がある．(3.1) 式から，実験では周波数が $f = 2850$ [Hz] の単一周波数正弦波音を用い，マイク間距離を $L = 0.06$ [m] と設定した．また， Fig. 3.3 にロボットの制御器のフローチャートを示す．

次に，まず製作したロボットの性能を確認するために，単一の固定された音場に対する誘導

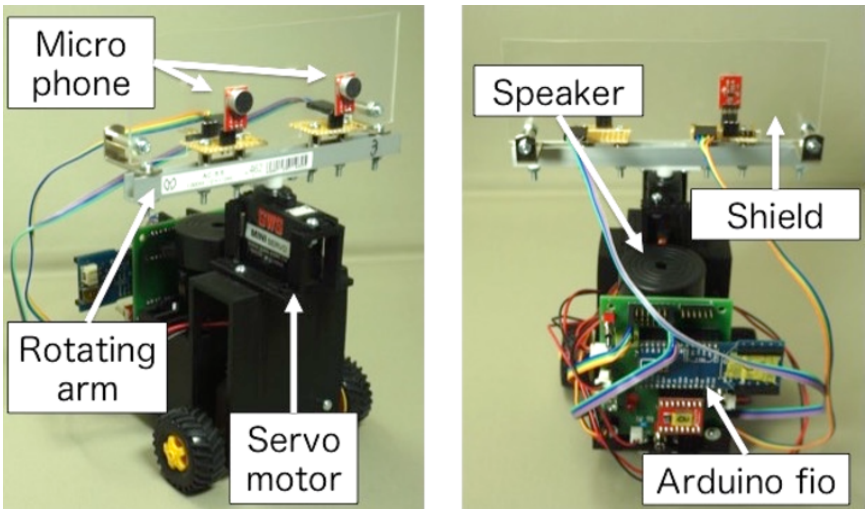


Fig. 3.2: The proposed sound-searching robot

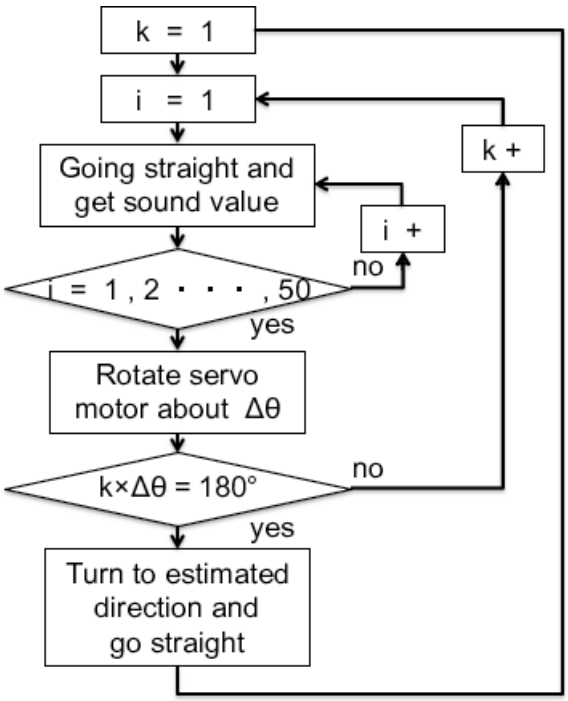


Fig. 3.3: Flowchart of the robot's movement based on the controller (1)

性能を検証する実験を行った．まず，単一のスピーカから発生する音の勾配場がどのように形成されるか確認しよう．実験は屋内空間の 2×2 [m] の平面領域で行った．Fig. 3.4 に，周波

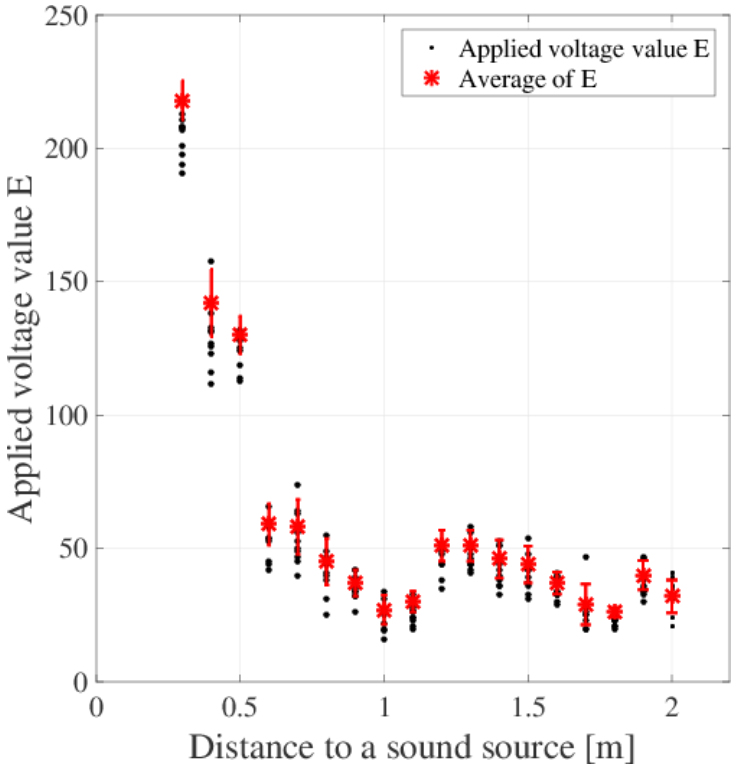


Fig. 3.4: Sound intensity of the acoustic field using navigation method (1): applied voltage value vs. distance between and the microphone and the sound source l [m]

数が $f = 2850$ [Hz] の単一周波数正弦波音が生成する音の勾配場を示す．横軸は音源から受信したロボットとの距離 [m] を表し，縦軸はマイクで受信される音の印加電圧値 E を表す．音源からの距離を 0.3 ∼ 2.0 [m] まで 0.1 [m] 間隔でマイクロボットを配置し，10 回の計測実験を行った．そのときの E の計測値が黒点，平均値が赤点，エラーバーが標準偏差を示している． Fig. 3.4 に示すように，実空間において音源から 0.3 ∼ 1.0 [m] 範囲では，音場の勾配が形成されていると判断できる．音源から 1 [m] 以上離れた地点では，実験が屋内環境であったため，周囲の環境による反響の影響や，音の強さは距離の逆二乗に比例して減衰することから音が弱まり，勾配がきれいに形成されないと考えられる．このことから，ロボットの誘導は音源から 1.0 [m] の範囲からスタートすれば成功すると判断できる．

製作したロボットの誘導性能の検証実験の詳細は以下の通りである．ロボットのスタート地点は音源から $l_0 = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ [m] 離れた点とし，音源方向推定角度の分解能 (サーボ

Table 3.1: Results of the navigation method (1) experiment

$\Delta\theta$ [deg] \ l_0 [m]	1.0	1.5	2.0	2.5
30	$(0.4, 0.212)$	$(0.507, 0.364)$	$(0.759, 0.481)$	$(0.896, 0.498)$
60	$(0.45, 0.19)$	$(0.687, 0.444)$	$(0.691, 0.502)$	$(0.669, 0.658)$
90	$(0.372, 0.167)$	$(0.638, 0.394)$	$(0.968, 0.662)$	$(0.989, 0.565)$

$\Delta\theta$ [deg] \ l_0 [m]	3.0
30	$(1.57, 0.982)$
60	$(0.933, 0.775)$
90	$(1.299, 0.887)$

モータの回転角度) を $\Delta\theta = 30, 60, 90$ [deg] とし実験を行う．各パラメータで 20 回の誘導を行い，誘導中のロボットと音源との最小距離の平均と標準偏差を Table 3.1 に示す ((平均，標準偏差) と表記)．Table 3.1 から，誘導性能は l_0 [m] が増加するに従って減少していくことがわかる．これは，先述した通り，Fig. 3.4 に示すように，音の勾配場が実空間において音源から 0.3 ∼ 1.0 [m] で滑らかに形成されるからである．

3.2.2 音場トレールの動的スイッチングによるロボットの誘導実験

あらかじめ追従経路の中継地点に配置した複数のスピーカロボットの音場の生成/消音を動的にスイッチングすることで，ロボットを所望の経路に追従させて誘導する実験を行う．Fig. 3.5 に示すように，一辺 1 [m] の正方形の頂点に 4 つのスピーカを搭載したロボットを配置し，マイクロボットはスピーカ 2 の近くに配置する．ここでは，マイクロボットをスピーカロボット 1-3-4-2 の順の経路を追従させ，誘導することを目的とする．まずはじめに，音源 1 のみ音を鳴らし，音場を生成する．次に，ロボットが音源 1 に十分に近づいたら，無線通信を用いて音源 1 を消音して次に音源 3 から音場を生成して音場を生成する．このように 1-4 の音源の生成/消音をスイッチングすることで，空間に形成される音場を動的に制御し，ロボットのルート形成を行う．Fig. 3.6 にロボットの軌跡を示す．白丸がロボットの初期位置，黒丸がロ

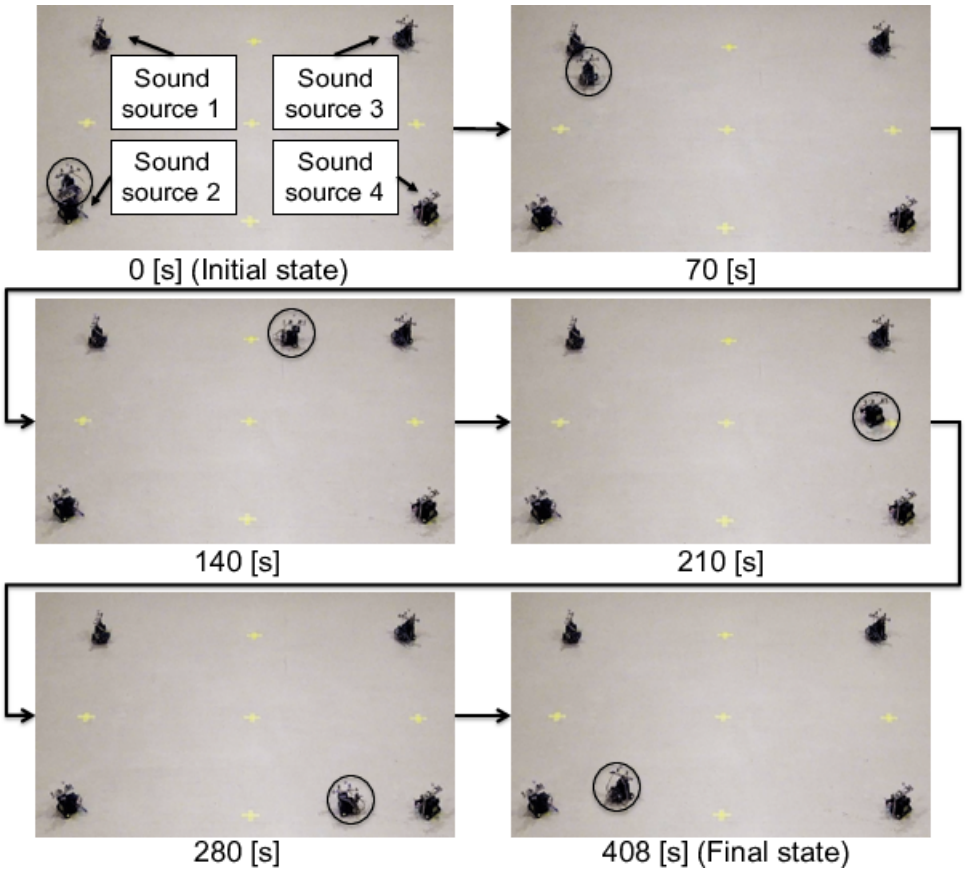


Fig. 3.5: Snapshots of the round trip experiment based on dynamic acoustic trail generated by four sound sources

ボットの最終位置，直線がロボットの移動軌跡，バツ印が音源方向を推定した結果ロボットが移動方向を変更した点である．Fig. 3.6 に示すように，提案する音場の動的制御法により，複数の音源間のルート形成を実現した．

3.3 誘導システム (2)：静的な音場トレールに基づく音場馴化型ロボットの誘導

本節では，誘導システム (2)：静的な音場トレールに基づく音場馴化型ロボットの誘導について述べる．移動ロボットにはマイクロフォンを 1 つだけ搭載し，誘導システム (1) でのロボットよりもシンプルな機能をもたせる．つまり，ロボットはその場の音の強度のみセンシングできると設定し，その上で，ロボットが音の強さの感度を上げていくことで音場の勾配の極

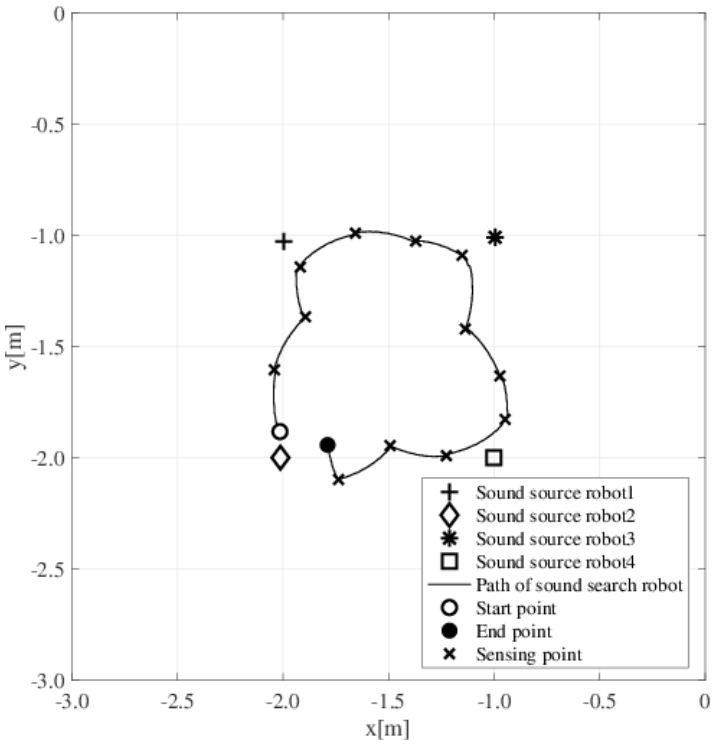


Fig. 3.6: Robot Trajectories in the round trip experiment based on dynamic acoustic trail generated by four sound sources

大点，つまり音源へ誘導させる．この移動ロボットを製作し，加えて，4 つの異なる周波数で形成された音場を空間に静的に配置することで音場トレールを形成し，ロボットをスタート地点からゴール地点まで誘導する実験を行う．

3.3.1 誘導システム (2) のロボット：音場馴化型コントローラの設計

Fig. 3.7 に作製したロボットの外観を示す．Fig. 3.7 に示すように，ロボットは誘導システム (2) のロボットと同様のマイクロフォンモジュール，ギアボックス，マイコンを搭載している．また，誘導においてロボットと同じ平面状にスピーカがある場合ロボットと衝突する恐れがあるため，スピーカは 3 次元的に宙に固定し，床面向きに音を放射するとした．そのため，ロボットのマイクロフォンは機体上部に上向きに固定している．ロボットはマイクロフォンで受信した音波を高速フーリエ変換 (FFT) 処理することで，音場を形成する音の周波数成分のス

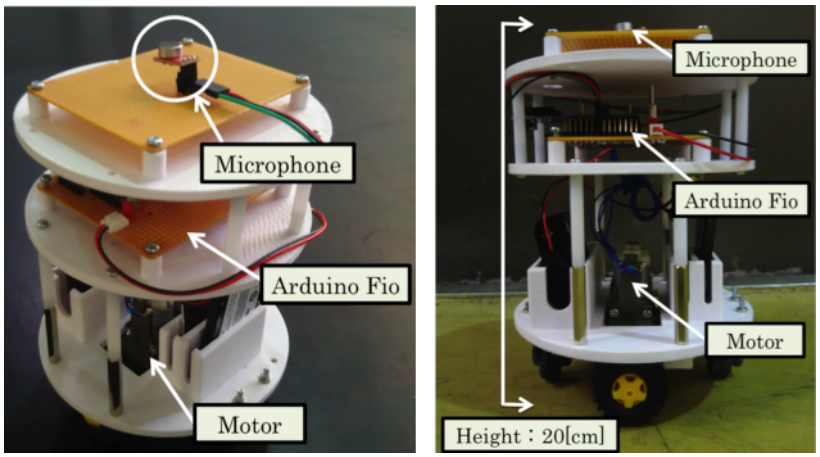


Fig. 3.7: Robot developed for the proposed navigation method (2)

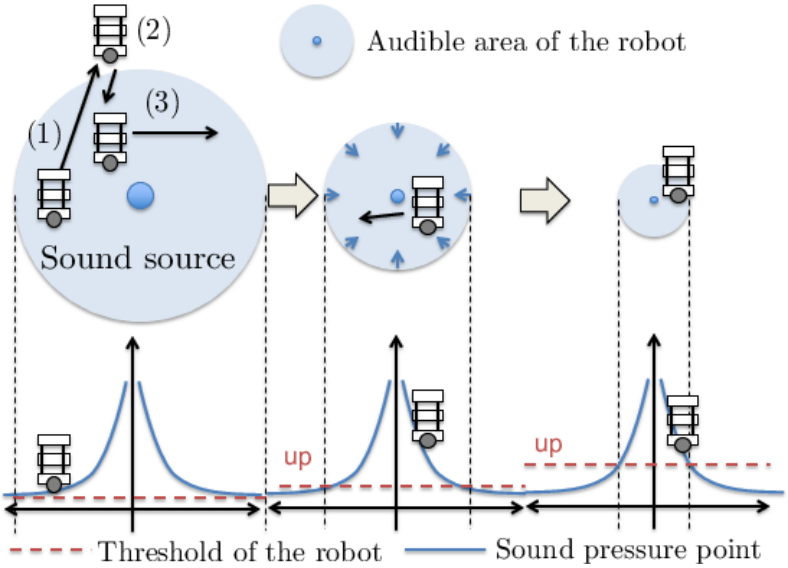


Fig. 3.8: Algorithm developed for the robot based on method (2)

ペクトル値を抽出する．さらに，ロボットはスペクトル値に対して閾値をもち，その閾値と実測値の関係により行動を切り替える．実装したロボットのアルゴリズムを以下に示す．

(1) Fig. 3.8 に示すように，実測したスペクトル値が閾値を上回ったら，ロボットは青色の

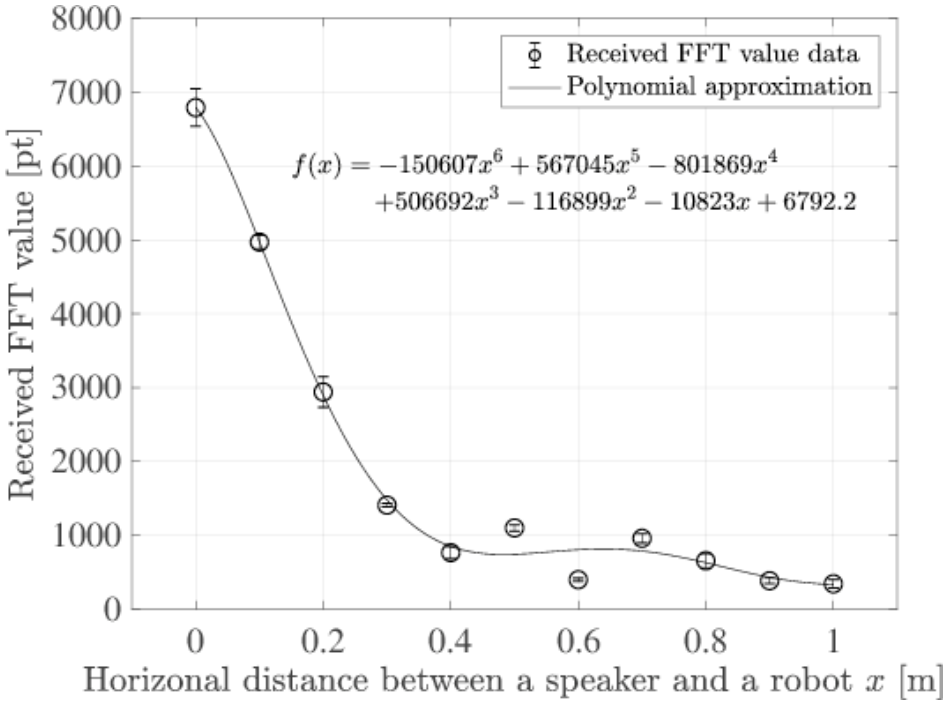


Fig. 3.9: Sound intensity of an acoustic field: Received FFT value [pt] vs. horizonal distance between the speaker and the robot x [m]

円内を直進し続ける．この円領域を以後可聴領域円と呼ぶ．ロボットは移動している間閾値を一定の値ごと増加し続ける．

(2) 実測したスペクトル値が閾値を下回る，つまり，可聴領域円外に出ている場合，実測値が閾値を上回るまで実測値は下がり続ける．

(3) 実測したスペクトル値が閾値を下回った場合，ロボットはその場で後方に移動し，ロボット正面に対し左に 90 [deg] 回転し，一定時間直進する．これら [1]〜[3] の行動を繰り返し続ける．そして，実測値がある設定値を超えた場合，ロボットは音源に十分に近づいたと判断し，ロボットは停止する．

ここで，可聴領域円の半径 x [m] を，音源から距離 x [m] において実測されるスペクトル値の近似値として設定する．ロボットは，逐一閾値を近似値にそって増加し続ける，つまり音の強度に対する感度を上げていく．このアルゴリズムを用いると，音源方向を推定せずともロボッ

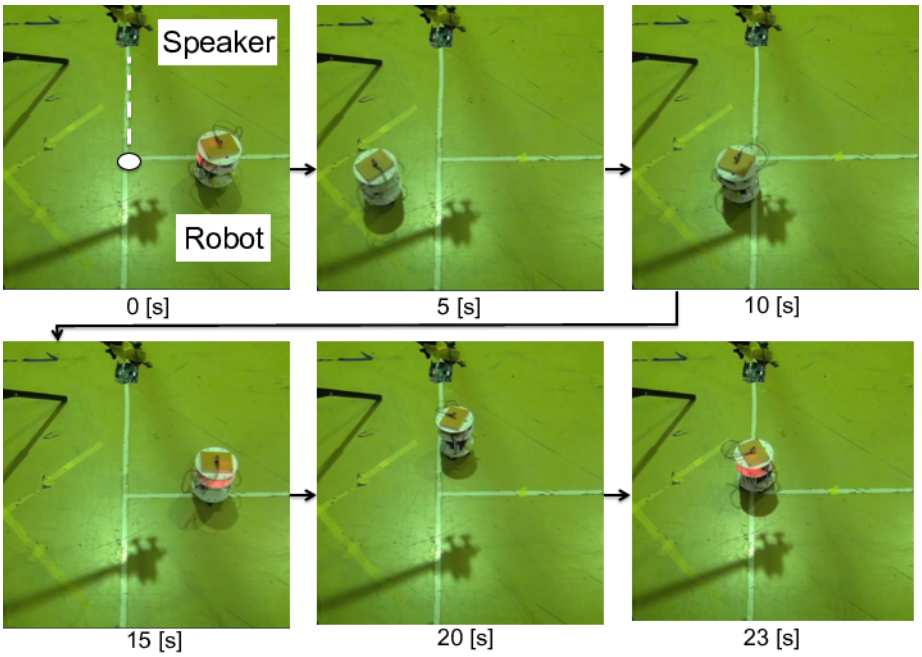


Fig. 3.10: Snapshots of the robot's movement around the source

トを音源に誘導することができる．さらに，誘導システム (1) で提案した，センサ値から音源方向を推定する方法に比べて，ロボットが閾値と取得値を比較する本方式は，センサ値ノイズに強く，ロバストであるといえる．

次に，誘導のための静的な音場トレールの設計について述べる．Fig. 3.9 に，誘導システム (2) で用いる音場の勾配データを示す．この音場は，床から 30 [cm] 上部に下向きに固定されたスピーカから 4500 [Hz] の正弦波音を生成することで創出している．そして Fig. 3.9 の横軸は，スピーカの真下の点から，水平方向の距離をとり，縦軸はロボットのセンシングするスペクトル実測値 [pt] を示している．各点はスペクトル値の平均値を，エラーバーは標準偏差を示す．Fig. 3.9 から，音源の真下の点から 30 [cm] 以内であれば音場の勾配が滑らかに形成されていることがわかる．これにより，ロボットを誘導可能な範囲の最大半径は 30 [cm] と想定される．

まず初めに，設計したロボットと 1 つの音場を用いて誘導が達成されるかどうかを確認した．Fig. 3.10 にロボットの誘導実験の様子のスナップショットを示す．音場を生成する圧電スピーカは床から 30 [cm] 上部に下向きに固定した．ロボットの初期位置を音源から 30 [cm]

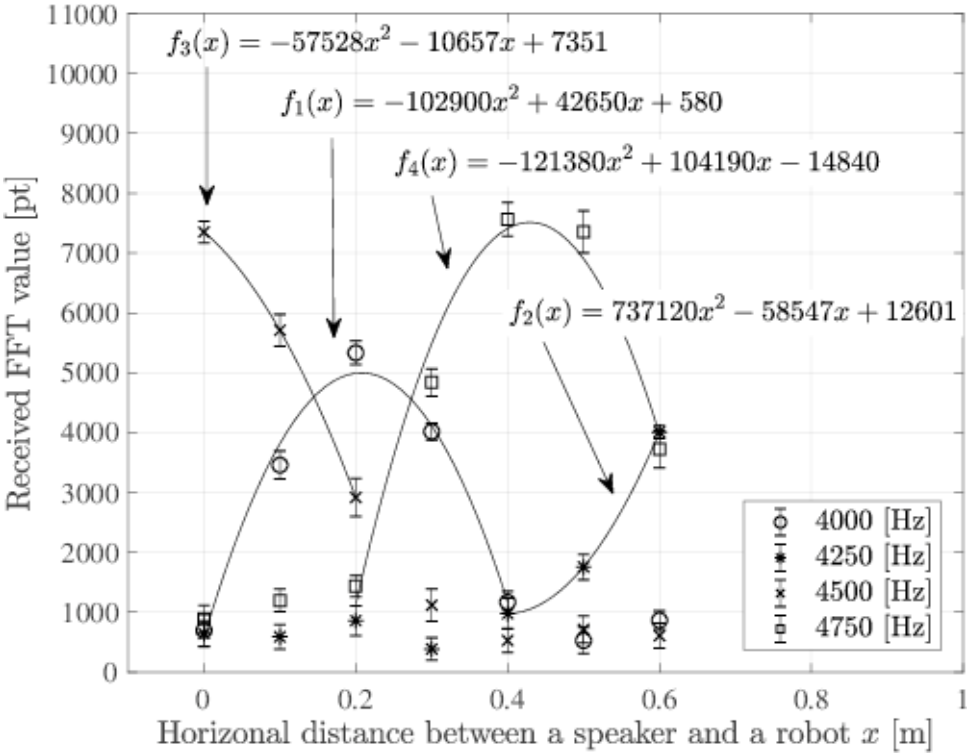


Fig. 3.11: Sound intensities of acoustic trails using navigation (2): Received FFT value [pt] vs. horizonal distance between the speaker and the robot x [m]

離れた点に設定し，ロボットの初期可聴領域円の半径を 0.7 [m] とする．また，ロボットの移動速度を 100 [mm/s] とし，可聴領域円の半径の減衰率を毎秒 33.3 [mm/s] とする．これによりロボットの閾値を Fig. 3.9 に示す近似関数をもとに計算する．実測されるスペクトル値が閾値以上であれば，ロボットは直進し，閾値以下であれば後方に移動して左に回転する，この行動を繰り返し続ける．本実験では Fig. 3.9 に示すように，音源下にロボットを誘導し，音源からの距離が 0.1 [m] と推定されたときに停止するようにした．誘導性能を評価するために，24 回の実験を行った結果，24 回の実験のうち 22 回は誘導に成功しており，成功率は約 92 [%] であった．失敗した 2 つの実験について，失敗した原因はロボットが音源から遠くなることで音場の勾配を感知できなかったためと考えられる．

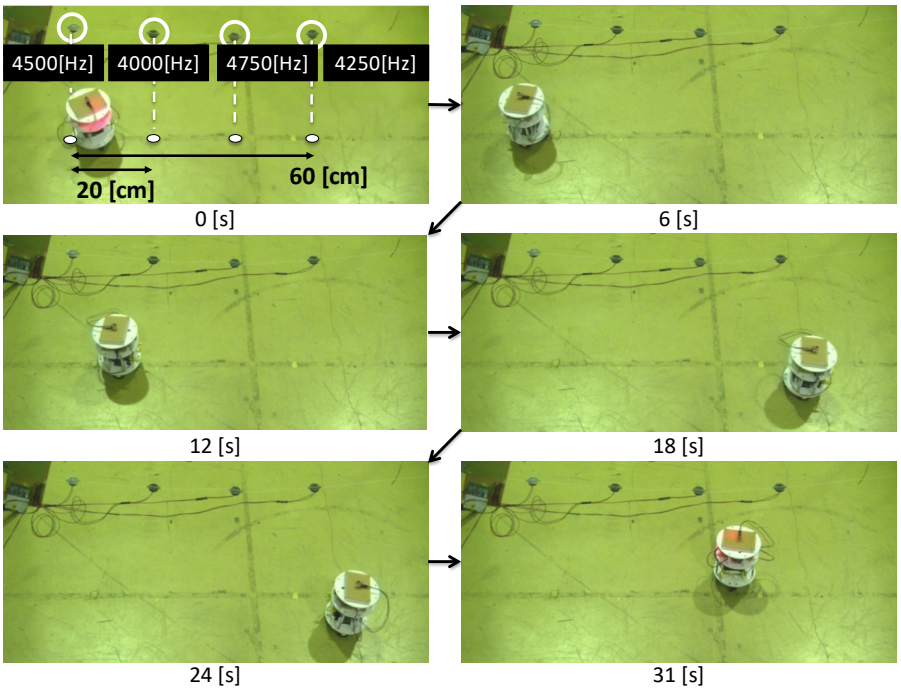


Fig. 3.12: Snapshots of the robot's movement when navigating to the sound source by using static acoustic trails generated by four sound sources

3.3.2 静的な音場トレールによるロボットの誘導

次に，複数の音場によって生成された音場トレールを用いてロボットを誘導する実験について述べる．実験では，周波数の異なる複数の音源を空間に静的に固定して音場を形成する．また，ロボットには，それぞれの周波数の異なる音源の勾配の近似関数を与える．まず，スタート地点から最も近い音源の閾値を上げることで，特定の周波数の音源に向かってロボットを誘導し，音源に近づいたと判断した場合は、閾値を自動で切り替えて次の音源に向かって誘導する．この切り替えをゴール地点に到着するまで繰り返す．Fig. 3.12 にナビゲーション実験の様子のスナップショットを示す．ロボットのスタート地点 (写真左側) から順に 4500 [Hz]，4000 [Hz]，4750 [Hz]，4250 [Hz] の周波数の異なる 4 つの音源を同じ高さに配置した．各音源間の距離は 20 [cm]、原点から終点までの距離は 60 [cm] とした．Fig. 3.12 に示すように，マイク 1 つを搭載したロボットに音場に馴化するコントローラを与え，それを切り替えること

でゴール地点まで誘導することに成功した．

3.4 考察

本節では，誘導システム (1) と (2) の 2 種類のコントローラの性能について述べる．誘導システム (1) で設計された動的音場の勾配追従型ロボットは，時・空間的に切り替えられた音場に従い移動することで，望ましい誘導性能を示した．このコントローラは，音場の発生源（最も強い点）から離れた位置にロボットを配置した場合に，2 つのマイクを用いて音場の勾配を正確に検出できることがわかった．また，本来ゴールから遠い地点にいるロボットを，その途中に複数の音場を配置し，空間に形成される勾配場を制御することで 1 つの音場では誘導できない距離でも誘導可能になることを示した．

誘導システム (2) でロボットに設計した音場馴化型コントローラは，マイクが 1 つのみで，簡単な移動ルールに基づいた最小限の機能を有していると言える．このコントローラによる誘導は成功したが，誘導可能な範囲は音源から 30 [cm] と比較的限定されていた．しかし，音源の音量の大きさを増加させることや，異なる周波数の音源の数を増やすことでロボットの誘導可能なゾーンを拡張できると考えられる．以上の議論から，これらの誘導システムを用いる環境や，システム作製にかかるコスト面等に応じて，理想的なコントローラをユーザが適宜選択することが可能となる．

3.5 まとめと今後の展望

本研究では，設計した音場と，音場のセンシングに基づくロボットのコントローラとの相互作用を利用した 2 種類の陰的誘導制御法を提案した．

誘導システム (1) では，2 つのマイクロフォンを搭載したロボットを開発し，勾配追従型コントローラを設計した．さらに、同じ周波数の音場を空間に複数配置し，その生成を動的に切り替えることで空間の音場を制御し，その音場の勾配に従ってロボットが移動するだけで，複数の音源間のルートに沿って誘導することが可能であることを示した．誘導システム (2) では，マイクロフォンを 1 つだけ搭載したロボットを設計し，ロボットが音場の強度に馴化していくことで音源に誘導されることを示した．また，異なる周波数の音源を空間に静的に配置

することで音場トレールを形成し，それ基づいてロボットをゴール位置に誘導するようなナビゲーションを行った．

本研究で行った 2 種類のナビゲーション実験は，ロボットのナビゲーション設計には，場の制御器を含めた設計が重要であり，かつ，場に知を埋め込むことでロボットの機構を簡素化しシンプルにロボットを設計することができることを示している．また，場とロボットのコントローラとの相互作用を制御設計に組み込むことで，従来の制御法にはないシステム設計の自由度が生まれることを裏付けるものである．この「場」に基づくロボットの制御という概念は，マルチエージェントシステムにおける制御系設計には非常に重要な考え方であり，場とロボットのコントローラの相互作用をうまく設計することで，単純なコントローラのみでロボットの誘導が可能であり、マルチエージェントシステムの応用が期待される．

今後の研究では，より音の特性を生かしたロボット群の誘導に取り組む予定である．音波はドップラー効果や回折現象，重ね合わせなど，さまざまな物理特性を多く有している．それらを巧みに利用することで，音場ならではの誘導制御の実機検証を行っていく．また，本研究の誘導法は，音だけでなく光やにおいなどの空間に拡散し，そのソース (光源やにおい源) とその距離に何らかの相関関係 (逆二乗の法則など) があるものになら同様に応用することができると考えられる．そのため，照明や嗅覚デバイスなど様々な物理メディアを利用したロボットナビゲーションへの応用も視野に入れている．そして将来的には，それらの実験を通して，あらゆる物理メディアに通底する「場」の創成・制御法とロボットの制御則との相互作用の設計論を構築していきたいと考えている．

第 4 章　牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導

4.1　研究背景

前章までは,「音場」の制御に基づくロボットの陰的誘導の実機検証について述べた．この結果から，ロボットに設計する陽的な制御器と,「場」に埋め込まれた陰的な制御のバランスをうまく設計することが重要であり，同じ誘導というタスクに対して設計に自由度が存在することが示された.

本章では，このような知見をもとに，複数のエージェント群が自律的に「場」を創成し，その「場」に従いロボット群全体が制御されるようなシステムの構築に取り組む．本論文ではその一例として，タスクに対して我々が陽的な制御を設計することが可能なのは少数のエージェントのみで，それらを用いていかに多数のエージェント群を決められた目的地へ誘導制御するか，という問題を扱う．このような制御システムを構築するにあたり，筆者は機動制御則と呼ばれる大規模システムの誘導制御法に注目する [73]．この制御は，牧羊犬が走り回りながら多数のヒツジの群れを追い立てて巧みに誘導する牧羊犬のヒツジ追い現象をヒントに構築され，少数のコントローラエージェント (牧羊犬) が，多数のエージェント群 (ヒツジ群) を誘導するシステムである．この機動制御則をヒントに，多数のエージェント群 (ヒツジ群) が創成する「場」の特性を活かし，陽的に設計された少数の「場」を動的に制御することで自然と誘導を達成する制御システムを機動制御則に基づく陰的誘導システムと称し，その制御系設計を行い，解析・実験を通してその妥当性を検証する.

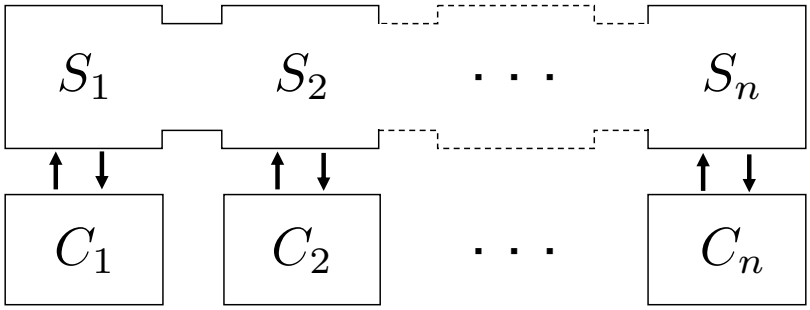


Fig. 4.1: Decentlized control

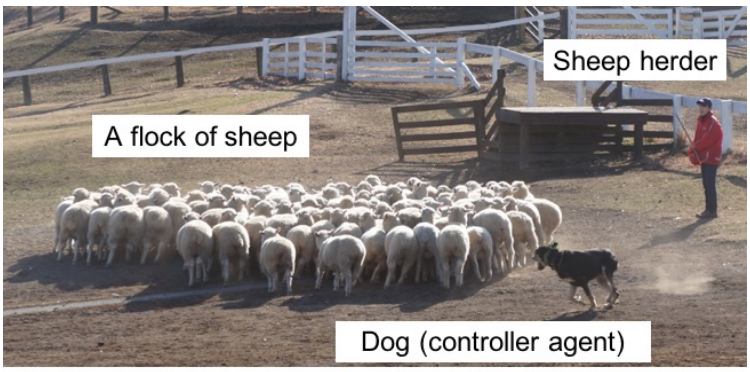


Fig. 4.2: Sheepdog system: one sheepdog navigates a sheep flock to a certain goal (Photograph courtesy of IKAHO GREEN BOKUJO) [74]

本章では，まず群システムの制御構造として広く用いられる自律分散制御について述べ，それを踏まえた上で，本論文で扱う機動制御則の制御構造について述べる．次に，牧羊犬のヒツジ追いに着想を得たエージェント群の制御システム，いわゆるシープドッグシステムの先行研究について述べる．最後に，本論文で提案する機動制御則に基づくエージェント群の陰的誘導システムについて説明する．

4.1.1 シープドッグシステムと機動制御法

一般的に，群システムの制御では，Fig. 4.1 に示すような自律分散制御が採用される．以降，S_i, $(i = 1, \cdots, n)$ は制御対象であるシステム，C, C_j $(j = 1, \cdots, m)$ はコントローラを意味することとする．自律分散制御では，各システムに対し個別のコントローラを設計し，それらの相互作用によりボトムアップ的にシステムの安定化や秩序の創発を行う．従来の中央集権的な制御と比較して，コントローラの機能を分散化させることで一つ一つの性能を抑えられるこ

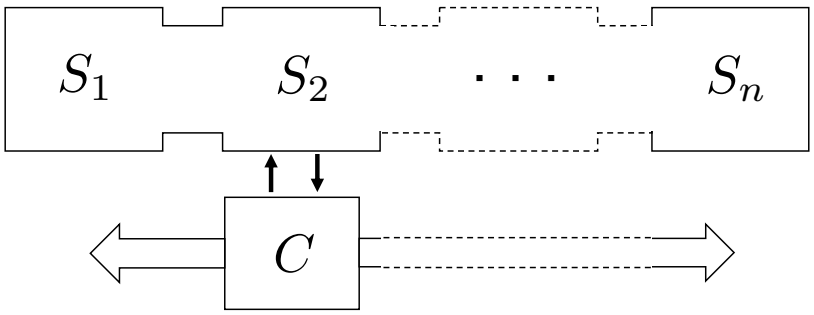


Fig. 4.3: Mobile control [73]

とや，システムの故障に対する頑強性，システム数に対する拡張性といった特徴を有する．

これに対して，本論文では羽尻らが提案したシープドッグシステムにおける機動制御則 [73] に着目する．この制御は，Fig. 4.2 に示すような牧場内で見られる牧羊犬のヒツジ追いに着想を得ている [74]．この現象では，少数の牧羊犬が群れの一部のヒツジを後方から追い立て，それを受けてヒツジが牧羊犬から逃げながら互いに群れていくことで，自然と群れ全体を間接的に誘導する．この制御を大規模システムの制御の観点から見ると，Fig. 4.3 に示すように，少数のコントローラが大規模システムをその機動性を生かして入力の位置を動的に変えることでシステム全体の安定性を保つ制御であるといえる．従来の制御では，システムが大規模になると，コントローラをより複雑に設計するか，コントローラ数を増やすことで安定化を目指していたが，機動制御法では，少数のコントローラを素早く移動させて一部のシステムに入力を与えることで間接的にシステム全体を制御することを狙っている．そのため，システムを効率よく制御するためには，コントローラが群れのどの位置に刺激を与えるか，そしてサブシステム同士の相互作用の設計が重要となる．

4.1.2 シープドッグシステムに関する先行研究

牧羊犬のヒツジ追いに着想を得たエージェント群の制御システムはシープドッグシステムと呼ばれ，今まで盛んに研究されてきた．シープドッグシステムの応用先は多岐に渡り，戦闘中の無人車両（UxV）の操縦，群衆制御，漁業，移動ロボットによる実際の生き物の誘導，ロボット群による災害救助，野生生物の管理・保護システム，免疫システムなどがある [75]．

まず，シープドッグシステムの先駆けとなる研究として，Vaughan らが立ち上げた「Robot Sheepdog Project」が挙げられる．この研究では，動物の群れをロボットで誘導することを目

的として，主に動物の群れのモデリングとそれを誘導するためのロボットシープドッグの制御則の構築に取り組んでいる．文献 [76, 77] では，動物の群れの動きをシンプルにモデル化し，ロボットシープドッグを用いて円形領域内のアヒルの群れを目的地まで誘導するシミュレーションと実験を行っている．このプロジェクトでは他にも，マシンビジョンによる画像処理でヒツジの行動を予測するアルゴリズムの開発や [78]，遺伝的アルゴリズムを用いた誘導モデルの構築と実機検証などが行なわれている [79].

このプロジェクトを始めとして，シープドッグシステムに関する研究が多数行われてきた．ここでは主に，システムのモデリングおよびシミュレーションや実機による牧羊犬の誘導性能の検証と，シープドッグシステムの実世界への応用に関する研究に焦点を絞り述べることとする．

Lien らは，牧羊犬による誘導問題を，1) herding : 群れを目的地へ誘導する, 2) covering : 環境内のあらゆる場所にエージェント群を誘導する, 3) patrolling : 特定の環境内に群れが入ることを防ぐ, 4) collecting : 散らばる群れを集める，という 4 つのタスクと定義し，これらを行う牧羊犬の各モデルを構築し，シミュレーションによりその有効性を示した [80]．その後，文献 [81] で彼らは herding タスクにおける複数の牧羊犬を用いる利点を調査した．結果，牧羊犬が複数になるとエージェント群の誘導速度が向上すること，また，エージェント群の分離傾向を強めた場合には，牧羊犬が 2〜3 頭の場合で最大性能を表すことを示した．Miki らは，複数の牧羊犬を用いて Boid モデルに従うヒツジ群を目的地へ誘導する問題を扱った [82]．ヒツジには，近隣のヒツジとの引力・斥力，障害物からの斥力，牧羊犬からの逃避力，ランダム力の 5 つの力に基づいて移動し，牧羊犬は，(1) 目的の方向への群れを誘導する，(2) 迷子の羊をグループに押し戻す，(3) 群れが分裂しないように群れから一定の距離を保つ，(4) 牧羊犬が重ならないように協力する，という 4 つのルールに従い行動する．結果，1 体の牧羊犬より 2 体の牧羊犬を用いる方が効率の良い誘導を行うことを示した．Harrison らは，ヒツジの群れを抽象的な形状体としてモデル化し，所望の形状を時々刻々と計算することで更新し，それを達成するために牧羊犬を制御する方法を提案している [83]．Bennett らは，実際の牧羊犬に与えられるブリーダーの命令をもとに，誘導コントローラを設計した [84]．牧羊犬は群れの重心がゴールに対して左右どちらに位置するかを判断し，それに応じて群れの左端と右端にいるヒツジを基準として群れの周囲を時計回り/反時計回りに回ることで誘導する．このコントローラと，

文献 [80, 82] で提案されたコントローラと合わせて誘導性能の比較を行い，提案法が優れていることを示した．また，Strömbom らは，実際の牧羊犬のヒツジ追いにおける牧羊犬とヒツジ群の GPS データを収集し，データ解析を通してシープドッグシステムのモデリングを行った．実際の牧羊犬は，ヒツジ群が散らばっている場合は群れの重心から最も遠い個体を追跡してヒツジを収集し，群れている場合は重心をゴール方向に誘導するという，2 つのモードを動的にスイッチングする制御則を提案し，その有効性を示した [85]．Hoshi らは上記のモデルに対して，ヒツジと牧羊犬の相対速度を変化させた場合に誘導が成功するかをシミュレーション検証した．結果，群れが異なる移動速度を有するヒツジで構成されていてもロバストに誘導できることを明らかにした [86]．Fujioka らは，文献 [85] で提案されたヒツジ群の誘導を扱っており，その中で，ゴールに対してヒツジの後方に位置する点と，それに対する左右の計 3 点を牧羊犬が往復し，V の字を描くように誘導する V-フォーメーション制御を提案している [87]．また，Fujioka は文献 [88] で 2 体の牧羊犬が群れの左右後方で V-フォーメーション制御を分担して行うことで，1 体の牧羊犬の誘導よりも効率が良くなることを統計的解析により示している．Pierson と Schwager は，文献 [89, 90] において，ヒツジ群の重心を中心とした円周に牧羊犬を配置することで群れを包囲し，牧羊犬同士の相対位置関係を保ちつつ誘導するシステムを提案し，二輪車両モデルに基づくエージェント群の制御システムの安定性解析およびロボット群による実機検証を行った．

現実世界におけるシープドッグシステムの実現に向けた研究も広く行われている．Chaimowicz らの研究では，群ロボットを用いた地上の未知環境の探索を目的として，複数の無人航空機（UAV）を用いて無人地上移動体（UGV）の群れを誘導するシステムを提案し，シミュレーション解析を行っている [91]．空中と地上両方に位置する UxV に搭載されたカメラを介して環境の 3D 画像を取得し，複数の UGV 群の分割・合体動作を行うことで複雑な環境を効果的に横断することをシミュレーションで確認している．Ozdemir らは，単純な機能を有するロボットでシープドッグシステムを実現することを目的として，離散センシング・離散行動に基づく牧羊犬ロボットの最適誘導制御を提案した [92]．牧羊犬ロボットは，周囲にヒツジ，他の牧羊犬，ゴールが存在する/しないの 2 値判定のみ可能なカメラを有し，かつ左右の車輪の速度入力も離散化されたロボットを想定しており，センシング情報から行動パラメータを確率的に最適化することで誘導が可能であることをシミュレーションにより確認して

いる．また，Sueoka らは，牧羊犬にカメラを搭載してヒツジ群を認識することを想定し，ヒツジロボットのサイズにより生じる牧羊犬の死角を考慮したシステム設計を行なった．牧羊犬が (1) ゴールを視認できる場合は，ヒツジの重心を追跡し，(2) ゴールが視認できない場合は群れの端のヒツジを追跡する，という 2 種類のルールをスイッチングするコントローラを提案し，シミュレーションおよび実機検証によりその有効性を示している [93].

また，ロボットシープドッグを用いてヒツジや牛，魚，鳥といった実際の群れをなす生物を誘導することを目的とした研究も行われている．Evered らは，SCRUPAL と呼ばれる三輪ロボットを用いて，2.5 ヘクタールのパドックで 30 頭のヒツジの誘導を実験した．実験の目的は SCRUPAL が近づいたときのヒツジの反応距離を評価することであったが，2 回目の実験から羊がロボットに慣れてしまったためヒツジが逃避し始めるロボットとの相対距離が極端に短くなり，正確な評価はできなかった [94]．Gade らは，空港の空域に鳥類が侵入することを防ぐために，シープドッグシステムに着想を得た UAV による鳥群撃退アルゴリズムを提案している [95, 96]．提案された制御法では，1 台の UAV が，1) エージェントと衝突せず，2) 特定の領域にエージェントが入らないように，さらに 3) エージェント群が分割するのを防ぎつつ群れの重心を追跡しつつゴールへ誘導する．領域内にエージェントが侵入しないように制御する n-wavefront algorithm では，1 台の UAV により鳥の群れの表面 n 体を認識し，誘導と群れ形状の制御とのバランスをパラメータで調節することでハイブリッドな誘導を実現している．この研究に引き続き Paranjape らは同様の目的のもとアルゴリズムの改良を行い，1 台のドローンを用いて実際の白鷺の群れの方向転換を実現している [97]．Bat-Erdene らは，モンゴルにおけるヒツジのマルチロボットシステムによる誘導を実現することを目的として，コーナー移動ロボットとサイドライン移動ロボットという 2 種類の牧羊犬ロボットを用いて群れを四角に囲い込みつつ別の地点へ移動させる方法を紹介している [98].

最後に，近年新たに行われ始めた機械学習を用いたシープドッグシステムに関する研究を紹介する．Gee らは文献 [99] において，教師あり学習によりエージェントに牧羊犬の誘導を学習させるシステムを構築した．学習には人間のデモンストレーションデータを教師データとすることで実際の生物のデータをもとに学習する困難さを回避している．Clayton らは，文献 [99] での研究を変更し，人間のデモンストレーションデータではなく強化学習に基づいて牧羊犬のモデルを獲得しようと試み，提案する評価関数の妥当性を検証している．Nguyen らは，

シープドッグによる誘導を収集と誘導というサブタスクに分解し，それぞれのタスクに関して人間のデモンストレーションデータを取得した．そこで得たデータをもとに，逆強化学習と深層強化学習により最適な評価関数を構築することで，エージェントに効率の良い学習を行わせることが可能であることを示した [100, 101, 102]．その他にも，牧羊犬の誘導中に消費するエネルギーに着目して，遺伝的アルゴリズムを用いた牧羊犬の移動ベクトルの最適化による「燃費の良い」牧羊犬を設計する研究などがある [103].

なお，類似研究として追跡-回避ゲーム [104, 105] が挙げられるが，追跡者が逃避者を追跡・捕獲することが主な目的であるのに対し，本研究はエージェント群を望ましい状態に誘導することを目指しているため，問題設定が異なることを特筆しておく．

4.1.3 先行研究の問題点と本論文のアプローチ

一般的に，シープドッグシステムは大自由度かつ複雑な力学的相互作用を有する多数のエージェントと，牧羊犬という異なる種類のエージェントを有するシステムである．このことから，先行研究の多くは，制御対象であるヒツジ群と牧羊犬のモデリング，およびシミュレーションや実機実験を通した誘導性能の検証に終始しており，理論解析による制御則の安定・収束性の検証，およびシステム設計論等の議論はほとんど行われていない．Pierson と Schwager は，複数の牧羊犬がヒツジ群の重心を中心に包囲・誘導するシステムを提案し，安定性解析および実機検証を行っている．しかし，上記で述べたように，牧羊犬の機動性や群れのどの部分をターゲットとして刺激を与えるかという点に焦点を当てたものではなく，本研究の趣旨とは異なる [89, 90].

それに対し本論文では，まず 1 体のヒツジを 1 体の牧羊犬で固定されたゴールに誘導するシステムについて安定性解析を行い，ヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬の機動制御則則の設計法を示す．そして 1 体のヒツジの誘導における設計法を，複数のヒツジの誘導に拡張・応用するアプローチを採用する．

4.1.4 機動制御則に基づくエージェント群の陰的誘導システムの創成

本論文では，牧羊犬のヒツジ追い現象で見られるヒツジと牧羊犬の特性を参考に，機動制御則に基づく「場」の制御によるエージェント群の陰的誘導システムをモデリングする．その制

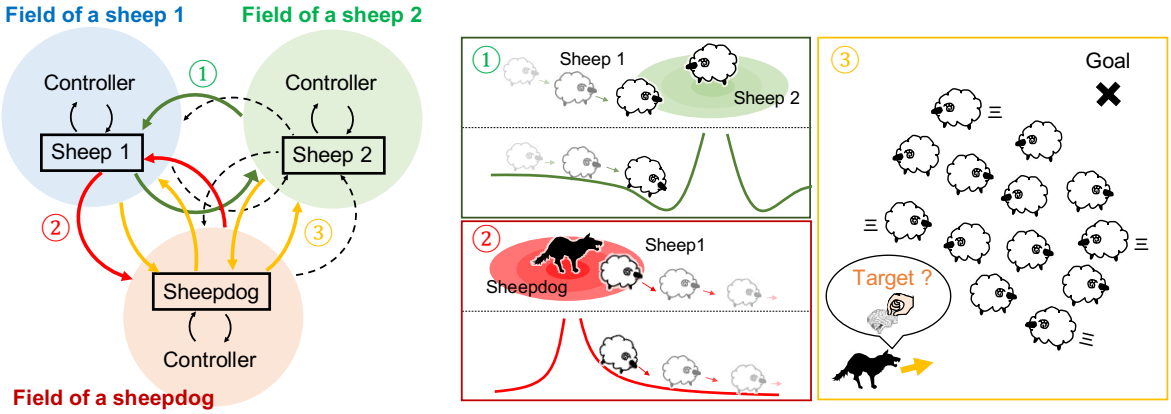


Fig. 4.4: Implicit navigation system for multiple agents based on the mobile control inspired by sheepdog system

御系の概要を Fig. 4.4 に示す．1 体の牧羊犬が，n 体のヒツジをゴールへ誘導するという問題について考える．各エージェントは，「場」の制御に基づいて，それぞれが創出する「場」に従い移動していく．ヒツジ 1 は，他のヒツジ 2 が創り出す「場」(①) と，牧羊犬が創り出す「場」(②) に従い移動する．①の「場」は，ヒツジ 2 に対する引力と斥力ポテンシャルの重ね合わせで表現されており，「他のヒツジと群れる」作用を意味する．②の「場」は，牧羊犬に対する斥力ポテンシャルで表現されており，「牧羊犬から逃げる」作用を意味する．そして，牧羊犬はゴールとヒツジ群をセンシングでき，その位置情報をもとに追い立てるターゲット点を決定し，移動する (③)．このようなシステムに対し，まず 1 体の牧羊犬で 1 体のヒツジをゴールに誘導するシステムについて安定性解析を行う．次に，その結果からヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬の機動制御則則の設計法を示す．さらに，複数のヒツジの誘導に拡張・応用し，複数体の誘導における機動制御則の設計法や，誘導性能の検証を行う．

さて，以下に以降の章の内容を示そう．まず第 5 章では，1 体の牧羊犬で 1 体のヒツジをゴール付近へ収束させる問題に対して，Vaughan らが提案したモデル [76] を参考に，ヒツジ 1 体のモデルおよび牧羊犬 1 体の機動制御則を設計する．このシステムは，ヒツジと牧羊犬にそれぞれの距離に応じた力が作用する非線形力学系であるため，平衡点を導出し，線形近似により平衡点の安定性を確認する．最後に，シミュレーションにより理論解析の妥当性を確認する．そしてその結果から，ヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬 1 体の機動制御則の設計法を示す．

次に第 6 章では，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法から，複数のヒツジの誘導における機動制御則の設計法の構築に取り組む．はじめに，数値シミュレーションの結果から，ヒツジ同士が十分に群れている場合では，ヒツジ群を重心が中心の 1 つの円板体とみなすことが可能となることを示す．そして，この結果から，ヒツジ 1 体での機動制御則の設計法を複数のヒツジの誘導に適用可能になるように拡張する方法について述べ，その妥当性を複数のロボットの実機実験を行うことで示す．

最後に第 7 章では，実世界でのロボット群へのシステムの応用を想定し，機動制御則による分散制御された複数のヒツジの誘導を扱う．分散度の高い散らばるヒツジに対しては，機動制御則を応用した最遠個体追跡制御を提案する．最遠個体追跡制御は，制御構造は機動制御則のまま，ターゲットをゴールから最も遠いヒツジとして追跡する制御則である．本章では，この最遠個体追跡制御と，従来提案されてきた 2 つの牧羊犬の制御則を含めた 3 つのコントローラの誘導性能をシミュレーションにより統計的に解析する．ヒツジには，一般的な群れモデルである Boid モデルを用い，ヒツジの分散度合いを変えて誘導を行い，誘導性能を比較する．また，牧羊犬がセンシングするヒツジの位置情報を可能な限り減らすために，牧羊犬の視野範囲を制限した場合での誘導性の検証を行う．さらに，提案する最遠個体追跡制御に対して，牧羊犬が知覚するターゲットの位置の精度と，ヒツジと牧羊犬の初期位置関係が誘導性能に与える影響を検証する．

第 5 章　牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:安定性解析

5.1　研究背景

この章では，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導システムの構築を目指し，1 体のヒツジを 1 体の牧羊犬でゴール付近へ収束させる問題に対して，ヒツジ 1 体のモデルおよび牧羊犬 1 体の機動制御則を設計する．このシステムは，ヒツジと牧羊犬にそれぞれの距離に応じた力が作用する非線形力学系であるため，平衡点を導出し，線形近似により平衡点の安定性を確認する．最後に，シミュレーションにより理論解析の妥当性を確認する．そしてその結果から，ヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬 1 体の機動制御則の設計法を示す．

[記法] $\mathbb{R}$ は実数の集合，$\mathbb{Z}$ は整数の集合，$\mathbb{R}_+$ は正の実数の集合を意味する．ベクトル $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^2$ のユークリッドノルムを $\|\boldsymbol{x}\|$ で表す．

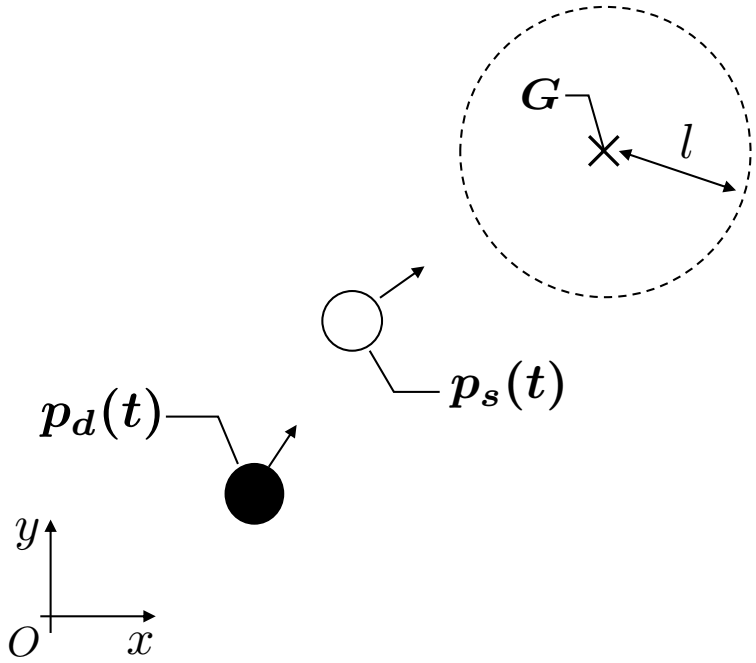


Fig. 5.1: Position of sheep, sheepdog, and goal (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal)

5.2 ヒツジの逃避戦略と牧羊犬の機動制御則

5.2.1 制御対象と制御目的

本稿では，2 次元空間内を運動する 1 体のヒツジと 1 体の牧羊犬を取り扱う．ヒツジと牧羊犬の動作は，1 階の微分方程式

$$\dot{\boldsymbol{p_s}} = \boldsymbol{u_s} \tag{5.1}$$

$$\dot{\boldsymbol{p_d}} = \boldsymbol{u_d} \tag{5.2}$$

で表されるとする．ここで，$\boldsymbol{p_s} = [x_s, y_s]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{p_d} = [x_d, y_d]^{\mathrm{T}}$ はヒツジと牧羊犬の位置，$\boldsymbol{u_s}, \boldsymbol{u_d} \in \mathbb{R}^2$ は，それぞれヒツジの逃避戦略，牧羊犬の機動制御則を表す制御入力であり，それらの具体的な関数形は次項で与える．

本研究における制御目的は，牧羊犬 $\boldsymbol{p_d}$ によりヒツジ $\boldsymbol{p_s}$ をゴール $\boldsymbol{G} = [x_g, y_g]^{\mathrm{T}}$ を中心としたある半径 $l \in \mathbb{R}_+$ の円周上に誘導することである．この制御目的は次のように定化される．

$$\exists l \ : \lim_{t \to \infty} \|\boldsymbol{p_s}(t) - \boldsymbol{G}\| = l \tag{5.3}$$

Fig. 5.1 にこの制御目的を図示する．○をヒツジ，●を牧羊犬，破線円はヒツジの極限周期軌

道，$\times$ は極限周期軌道の中心 (ここではゴール $\boldsymbol{G}$ と称する) である．

5.2.2 ヒツジと牧羊犬の制御入力

ヒツジの逃避戦略と，牧羊犬の機動制御則を提案する．まず，ヒツジの逃避戦略を次式で与える．

$$\boldsymbol{u_s} = K_1 \frac{\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}}{\|\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}\|^3} \tag{5.4}$$

ただし，$K_1 \in \mathbb{R}_+$ は定数ゲインである．ヒツジには，牧羊犬との距離の 2 乗に反比例して斥力が働く．

次に，制御目的を達成するための牧羊犬の機動制御則を次式で与える．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u_d} = \ & K_2(-\frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}\|}) + K_3 \frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}\|^3} \\ & + K_4 \frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}\|} \end{aligned} \tag{5.5}$$

ただし，$K_2, K_3, K_4 \in \mathbb{R}_+$ は各ベクトルの定数ゲインである．第 1 項は牧羊犬がヒツジに近づくベクトル，第 2 項は牧羊犬がヒツジに近づきすぎないように離れるベクトル，第 3 項は牧羊犬がゴールから離れるベクトルである．上記の制御入力は，Vaughan らが以前に提案した誘導法である中心追跡制御法 [76] を参考にしている．ただし，Vaughan らは，ヒツジの制御入力に円形の壁からの斥力を含めていた．一方，本稿では，(5.3) 式を満たすのに必要な牧羊犬の機動性を明らかにすることが目的であるため，壁を無くし，壁からの斥力を除いた制御入力を用いる．また，牧羊犬の機動制御則については，Vaughan らは (5.5) 式の第 1 項のヒツジに近づくベクトルを距離に比例した $\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}$ の定数ゲイン倍としていたのに対し，本稿では距離にかかわらず単位ベクトルの定数ゲイン倍に変更している．これにより，円形の壁が無く，ヒツジに対する壁からの斥力が存在せずとも，ある条件の下でヒツジは極限周期軌道に収束することをシミュレーションにより確認している．

[制御問題] ヒツジの逃避戦略が (5.4) 式で与えられるとき，(5.5) 式で与えられる牧羊犬の機動制御則が (5.3) を達成するときの各ゲイン K_2, K_3, K_4 が満たす条件を求めよ．

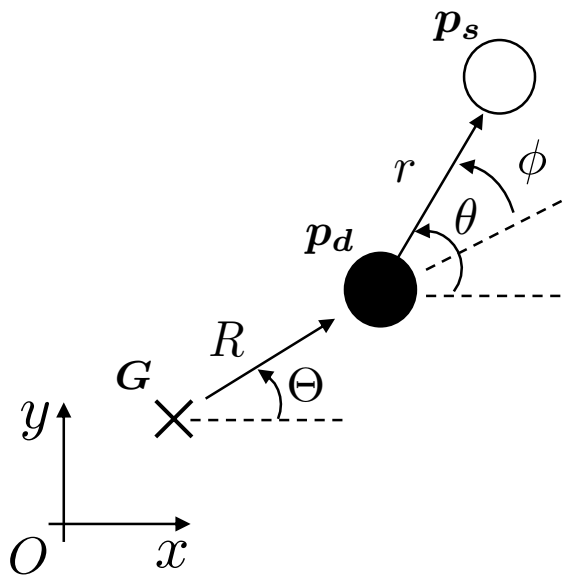


Fig. 5.2: How to place the parameters in coordinate transformation (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal)

5.3 システムの安定性解析

5.3.1 平衡点の導出

(5.4), (5.5) 式を (5.1), (5.2) 式に代入することで，ヒツジと牧羊犬のダイナミクスは以下の式で表される．

$$\dot{\boldsymbol{p_s}} = K_1 \frac{\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}}{\|\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}\|^3} \tag{5.6}$$

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{p_d}} &= K_2(-\frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}\|}) + K_3 \frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{p_s}\|^3} \\ &\quad + K_4 \frac{\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}}{\|\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}\|}\end{aligned} \tag{5.7}$$

このヒツジと牧羊犬のシステムに対して，平衡点解析を行う．そのために，Fig. 5.2 に示すように，2 つのベクトル $\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}$，$\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}$ に対し，次式のような極座標変換を行う．

$$\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d} = \begin{bmatrix} r\cos\theta \\ r\sin\theta \end{bmatrix}, r \in \mathbb{R}_+, \theta \in \mathbb{R} \tag{5.8}$$

$$\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} R\cos\Theta \\ R\sin\Theta \end{bmatrix}, R \in \mathbb{R}_+, \Theta \in \mathbb{R} \tag{5.9}$$

$\boldsymbol{p_s} - \boldsymbol{p_d}$ は牧羊犬からヒツジへのベクトルで，r は動径長さ，θ は反時計回りを正とする偏角である．$\boldsymbol{p_d} - \boldsymbol{G}$ はゴールから牧羊犬へのベクトルで，R は動径長さ，Θ は反時計回りを正とする偏角である．これらを (5.6)，(5.7) 式に代入すると，(5.6)，(5.7) 式はそれぞれ

$$\begin{bmatrix} \dot{x_s} \\ \dot{y_s} \end{bmatrix} = K_1 \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}, \tag{5.10}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x_d} \\ \dot{y_d} \end{bmatrix} = K_2 \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} - K_3 \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} + K_4 \begin{bmatrix} \cos\Theta \\ \sin\Theta \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

となる．ここで，$\dot{r}, \dot{\theta}, \dot{R}, \dot{\Theta}$ をもとの xy 座標系の表現を用いて表すと，

$$\dot{r} = \frac{1}{r}\{(x_s - x_d)(\dot{x_s} - \dot{x_d}) + (y_s - y_d)(\dot{y_s} - \dot{y_d})\}, \tag{5.12}$$

$$\dot{\theta} = \frac{(x_s - x_d)(\dot{y_s} - \dot{y_d}) - (y_s - y_d)(\dot{x_s} - \dot{x_d})}{r^2}, \tag{5.13}$$

$$\dot{R} = \frac{1}{R}\{(x_d - x_g)\dot{x_d} + (y_d - y_g)\dot{y_d}\}, \tag{5.14}$$

$$\dot{\Theta} = \frac{(x_d - x_g)\dot{y_d} - (y_d - y_g)\dot{x_d}}{R^2} \tag{5.15}$$

となる．この (5.12)〜(5.15) 式に (5.10)，(5.11) 式を代入して整理すると

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{R} \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_2 + (K_1 + K_3)r^{-2} - K_4\cos(\theta - \Theta) \\ K_4 r^{-1}\sin(\theta - \Theta) \\ K_4 + (K_2 - K_3 r^{-2})\cos(\theta - \Theta) \\ (K_2 - K_3 r^{-2})R^{-1}\sin(\theta - \Theta) \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

となる．ここで，$\phi = \theta - \Theta \in \mathbb{R}$ とおくと，微分方程式は

$$\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}) \tag{5.17}$$

となる．ただし，

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x} &= \begin{bmatrix} r \\ R \\ \phi \end{bmatrix}, \\ f(\boldsymbol{x}) &= \begin{bmatrix} -K_2 + (K_1 + K_3)r^{-2} - K_4\cos\phi \\ K_4 + (K_2 - K_3 r^{-2})\cos\phi \\ \left\{K_4 r^{-1} - (K_2 - K_3 r^{-2})R^{-1}\right\}\sin\phi \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5.18}$$

である．ここで，もとの 4 次のシステム (5.16) から ϕ を定義することで θ，もしくは Θ を状態 $\boldsymbol{x}$ から除いたが，その理由は以下の通りである．本稿では，制御目的がヒツジとゴールの距離が (5.3) 式を満たすことである．つまり，$\|\boldsymbol{p_s}(t) - \boldsymbol{G}\|$ の挙動に注目しており，それを知るためには，個々の偏角 $\theta(t)$，$\Theta(t)$ ではなく， $r(t), R(t), \phi(t)$ の振る舞いが分かれば十分だからである．なお，$\theta(t)$，$\Theta(t)$ の挙動を知りたければ，$\phi(t)$ を (5.16) 式に代入して得られる $\dot{\theta}$ および $\dot{\Theta}$ を含む微分方程式を解析することになる．

この 3 次のシステムについて，平衡点の存在条件と平衡点の導出を行う．導出過程は煩雑であるため，ここではその概要のみを記すが，詳細は巻末の付録 1 を参照されたい．さて，平衡点 $\boldsymbol{x}_e = [r_e, R_e, \phi_e]^{\mathrm{T}}$ において，$f(\boldsymbol{x}_e) = 0$ より，

$$\begin{cases} -K_2 + (K_1 + K_3)r_e^{-2} - K_4 \cos\phi_e = 0 & (5.19) \\ K_4 + (K_2 - K_3 r_e^{-2}) \cos\phi_e = 0 & (5.20) \\ \left\{K_4 r_e^{-1} - (K_2 - K_3 r_e^{-2}) R_e^{-1}\right\} \sin\phi_e = 0 & (5.21) \end{cases}$$

を満たす．まず，(5.21) 式について，もし $\sin\phi_e = 0$ ならば $\phi_e = n\pi$ $(n \in \mathbb{Z})$ が得られるが，(5.19) 式かつ (5.20) 式を満たす r_e, R_e は存在せず，平衡点は存在しない．よって，$\phi_e \neq n\pi$ である．このとき，(5.21) 式から，

$$R_e = \frac{r_e(K_2 - K_3 r_e^{-2})}{K_4} \tag{5.22}$$

である．ただし，$R_e \in \mathbb{R}_+$ であることから，$(K_2 - K_3 r_e^{-2}) > 0$，つまり，

$$r_e^2 > \frac{K_3}{K_2} \tag{5.23}$$

を満たさなければならない．次に，(5.20)，(5.22) 式から，

$$\cos\phi_e = -\frac{K_4}{K_2 - K_3 r_e^{-2}} = -\frac{r_e}{R_e} \tag{5.24}$$

を得る．これを (5.19) 式に代入し，r_e について整理すると，以下の r_e についての 4 次方程式を得る．

$$({K_2}^2 - {K_4}^2) r_e^4 - (K_1 + 2K_3) K_2 r_e^2 + (K_1 + K_3) K_3 = 0 \tag{5.25}$$

(5.23) 式を満たす方程式 (5.25) の解は，$K_2 > K_4$ の場合に 1 つ存在し，

$$r_e = \sqrt{\frac{(K_1 + 2K_3)K_2 + \sqrt{(K_1 K_2)^2 + 4{K_4}^2 (K_1 + K_3) K_3}}{2({K_2}^2 - {K_4}^2)}} \tag{5.26}$$

となる．最後に (5.22) 式と，(5.24) 式から得られる $\phi_e = \cos^{-1}(-\frac{r_e}{R_e})$ に (5.26) 式を代入することで，平衡点が得られる．平衡点の存在について定理として以下にまとめる．

定理 1 システム (5.17) の平衡点が存在する条件は,

$$K_2 > K_4 \tag{5.27}$$

であり，このとき，次式で与えられる 2 種類の平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}, \boldsymbol{x}_{e2} \in \mathbb{R}^3$ が存在する．

$$\boldsymbol{x}_{e1} = \begin{bmatrix} r_{e1} \\ R_{e1} \\ \phi_{e1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_e \\ R_e \\ \phi_e \end{bmatrix} \tag{5.28}$$

$$\boldsymbol{x}_{e2} = \begin{bmatrix} r_{e2} \\ R_{e2} \\ \phi_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_e \\ R_e \\ 2\pi - \phi_e \end{bmatrix} \tag{5.29}$$

ここで，r_e は (5.26) 式で表され， R_e, ϕ_e は (5.22)，(5.24) 式に (5.26) 式を代入することで得られる．

ところで，システムの平衡点の有無や安定性はゴール $\boldsymbol{G}$ の位置に依存しないことから，一般性を失うことなく，以降ではゴールを xy 座標系の原点として議論を行うこととする．

5.3.2 線形近似による平衡点の安定性解析

次に，平衡点近傍でシステム (5.17) を線形近似し，平衡点の安定性を解析する．システム (5.17) の平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ $(i = 1, 2)$ における線形近似システムは,

$$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{ei}) = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}_{ei})(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{ei}) = A(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{ei}) \tag{5.30}$$

となる．ここで A は以下の式で表される．

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}_{ei}) \\ &= \left. \begin{bmatrix} -2(K_1 + K_3)r^{-3} & 0 & K_4 \sin\phi \\ 2K_3 r^{-3}\cos\phi & 0 & a \\ b & c & d \end{bmatrix} \right|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_{ei}} \end{aligned}$$

ただし,

$$
\begin{aligned}
a &= -(K_2 - K_3 r^{-2})\sin\phi && (5.31)\\
b &= (-K_4 r^{-2} - 2K_3 R^{-1} r^{-3})\sin\phi && (5.32)\\
c &= R^{-2}(K_2 - K_3 r^{-2})\sin\phi && (5.33)\\
d &= \left\{K_4 r^{-1} - (K_2 - K_3 r^{-2})R^{-1}\right\}\cos\phi && (5.34)
\end{aligned}
$$

である．行列 A の特性多項式は次式で与えられる．

$$
\begin{aligned}
\varphi(s) &= \det(sE_3 - A) = s^3 + 2(K_1 + K_3)r_e^{-3}s^2\\
&\quad +2\sin^2\phi_e\left\{{K_4}^2 r_e^{-2} + K_3 K_4 R_e^{-1} r_e^{-3}\right\}s\\
&\quad +2\sin^2\phi_e\left\{K_3 K_4 R_e^{-2} r_e^{-3}\right.\\
&\quad \left.+{K_4}^2(K_1 + K_3)r_e^{-5}\right\} && (5.35)
\end{aligned}
$$

ここで，E_3 は 3×3 の単位行列である．行列 A の特性方程式 $\varphi(s) = 0$ の解の実部が全て負であれば，線形システム (5.30) の平衡点は漸近安定となり，もとのシステム (5.17) の平衡点も漸近安定となる．そこで，Hurwitz の安定判別法を用いて平衡点の安定性を確かめる．

特性方程式 $\varphi(s) = 0$ を

$$
\varphi(s) = s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \qquad (5.36)
$$

のようにおく．この特性方程式に対して，解の実部が全て負であることは以下の条件を満たすことと等しい [106].

$$
a_0, a_1, a_2 > 0 \qquad (5.37)
$$

$$
\Delta = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ 1 & a_1 \end{vmatrix} > 0 \qquad (5.38)
$$

まず，(5.37) 式について確認する．各ゲインの値 K_1, K_2, K_3, K_4 は正，(5.28)，(5.29) 式より，平衡点を与えるパラメータ $r_e, R_e, \sin^2\phi_e$ は正であるから，全ての係数は正となり，(5.37) 式を満たす．次に，(5.38) 式について確認する．Δ は,

$$
\begin{aligned}
\Delta =& 2\sin^2\phi_e K_4 R_e^{-2} r_e^{-6}\left\{(K_1 + K_3)K_4 R_e^2 r_e\right.\\
&\left.+ 2K_3(K_1 + K_3)R_e - K_3 K_4 {r_e}^3\right\}\\
>& 2\sin^2\phi_e K_3 {K_4}^2 R_e^{-2} r_e^{-5}(R_e^2 - r_e^2) && (5.39)
\end{aligned}
$$

となる．ここで，付録 1 より，$(R_e^2 - r_e^2)$ の符号は正であるから，$\Delta > 0$ である．よって，(5.38) 式を満たす．総じて，2 つの平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ はどちらも安定平衡点である．

5.3.3 平衡点におけるシステムの挙動

前項では，ヒツジと牧羊犬との相対関係を表す 3 変数のシステム (5.17), (5.18) に対して，(5.28)，(5.29) 式で与えられる平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}, \boldsymbol{x}_{e2}$ の安定性を確認した．本項では，この 2 つの平衡点が，もとの xy 座標系でどのような振る舞いに対応するのかを解析する．ゴール $\boldsymbol{G}$ は原点であるので，(5.8), (5.9) 式より，

$$\boldsymbol{p_d} = \begin{bmatrix} R_e \cos\Theta \\ R_e \sin\Theta \end{bmatrix}, \tag{5.40}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{p_s} &= \boldsymbol{p_d} + \begin{bmatrix} r_e \cos\theta \\ r_e \sin\theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_e \cos\Theta + r_e \cos(\Theta + \phi_{ei}) \\ R_e \sin\Theta + r_e \sin(\Theta + \phi_{ei}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} l_e \cos(\Theta + \varphi_{ei}) \\ l_e \sin(\Theta + \varphi_{ei}) \end{bmatrix} \ (i = 1, 2) \end{aligned} \tag{5.41}$$

となる．ここで，$l_e \in \mathbb{R}_+$ は (5.24) 式を用いて

$$\begin{aligned} l_e &= \sqrt{R_e^2 - r_e^2} \\ &= \sqrt{\frac{(K_1K_2)^2 + K_1K_2\sqrt{D} + 2K_1K_3{K_4}^2}{{K_4}^2\{(K_1 + 2K_3)K_2 + \sqrt{D}\}}} \end{aligned} \tag{5.42}$$

となる．ただし，$D = (K_1K_2)^2 + 4{K_4}^2(K_1 + K_3)K_3$ である．

また，φ_{ei} は，$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{e1}$ の場合，

$$\varphi_{e1} = \phi_e - \frac{\pi}{2}, \tag{5.43}$$

$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{e2}$ の場合，

$$\varphi_{e2} = -\varphi_{e1} = -(\phi_e - \frac{\pi}{2}) \tag{5.44}$$

となる．さらに，それぞれの平衡点におけるヒツジと牧羊犬のゴール周りの角速度 $\dot{\theta}_i$, $\dot{\Theta}_i$ は，(5.16) 式の $\dot{\theta}$, $\dot{\Theta}$ の式と，(5.28)，(5.29) 式から，

$$\dot{\theta}_1 = \dot{\Theta}_1 = K_4 r_e^{-1} \sin\phi_e, \tag{5.45}$$

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\Theta}_2 = -K_4 r_e^{-1} \sin\phi_e \tag{5.46}$$

と一定値になる．ただし，$\sin\phi_e > 0$ であるから，$\dot{\theta}_1, \dot{\Theta}_1 > 0, \dot{\theta}_2, \dot{\Theta}_2 < 0$ である．

これらの結果から，それぞれの平衡状態における牧羊犬とヒツジの振る舞いは以下のようになる．

1. $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{e1}$ でのシステムの挙動

   Fig. 5.3(a) に示すように，牧羊犬はゴール $\boldsymbol{G}$ を中心として，反時計回り ($\Theta > 0$ 方向) に半径 R_e の等速円運動を行う．ヒツジは，ゴール $\boldsymbol{G}$ を中心として，半径 $l_e(l_e < R_e)$ で牧羊犬と同じ角速度で円運動を行う．ただし，回転角度の位相差は牧羊犬に対して $\varphi_{e1} = \phi_e - \frac{\pi}{2}$ 進みである．

2. $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{e2}$ でのシステムの挙動

   Fig. 5.3(b) に示すように，牧羊犬はゴール $\boldsymbol{G}$ を中心として，時計回り ($\Theta < 0$ 方向) に半径 R_e の等速円運動を行う．ヒツジは，ゴール $\boldsymbol{G}$ を中心として，半径 l_e で牧羊犬と同じ角速度で円運動を行う．ただし，回転角度の位相差は牧羊犬に対してヒツジが $\varphi_{e2} = \phi_e - \frac{\pi}{2}$ 遅れである．

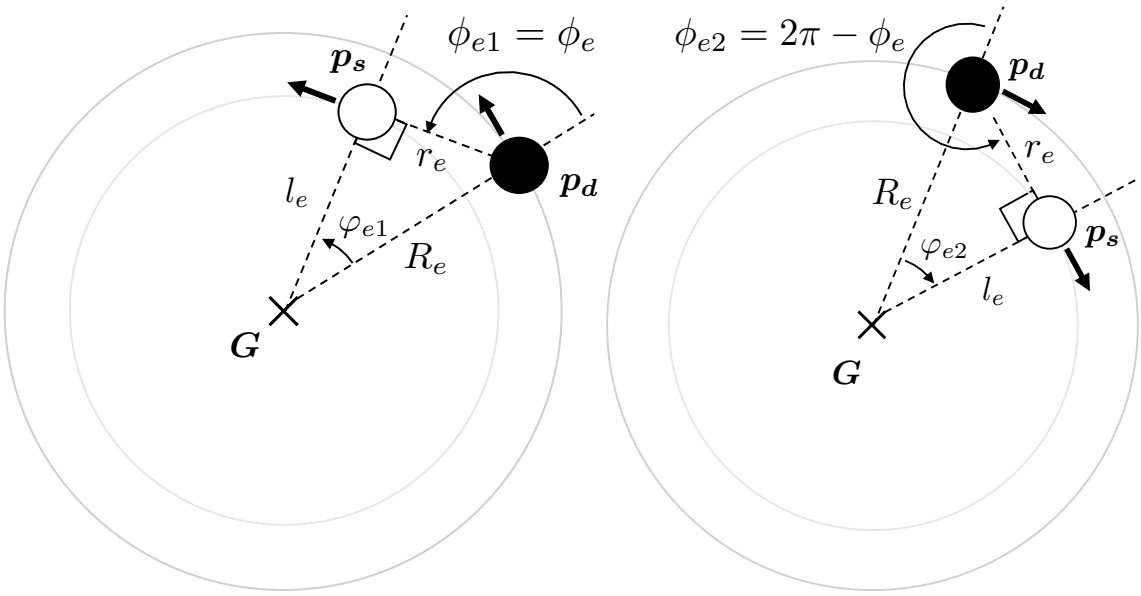
   さて，ここでは，平衡点におけるヒツジと牧羊犬の幾何的関係から，提案した機動制御則のカラクリについて考察する．平衡点では，$\cos\phi_e$ は (5.24) 式を満たすため，Fig. 5.3 に示すように，牧羊犬はヒツジの円軌道の接線方向に常に位置することを意味する．これは，ヒツジは牧羊犬の位置のみに基づいて逃避する，つまり，ヒツジの速度方向は牧羊犬からヒツジへのベクトル方向と同一なので，牧羊犬はヒツジの速度方向の延長線上に位置しながら追跡し続けることでヒツジを極限周期軌道に収束させることができることを示している．

   さて，平衡点におけるシステムの挙動について以下に定理としてまとめる．

   定理 2　システム (5.17) において，(5.27) 式で表される条件のもとで，(5.28)，(5.29) 式で表される平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ $(i = 1, 2)$ はどちらも漸近安定である．また，平衡点近傍において，ヒツジとゴールとの距離は (5.42) 式で表される l_e に収束する．

$$\lim_{t\to\infty} \|\boldsymbol{p_s}(t) - \boldsymbol{G}\| = l_e \tag{5.47}$$

これにより，5.2.2 項の [制御問題] の解は，(5.27) 式である．



(a) Equilibrium point $\boldsymbol{x}_{e1}$ (b) Equilibrium point $\boldsymbol{x}_{e2}$

Fig. 5.3: Behavior of two equilibrium points

5.3.4 平衡点に収束しない初期値集合

さて，今まではシステム (5.17) の 2 つの平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}, \boldsymbol{x}_{e2}$ を求め，線形近似によりどちらも平衡点近傍で漸近安定であることを示した．ここでは，5.3.1 項で平衡点を求める際に除いた $\phi = n\pi$ $(n \in \mathbb{Z})$ について考察する．$\phi = n\pi$ でのシステムの微分方程式は以下の (5.48), (5.49) 式で与えられる．

n が偶数のとき,

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{R} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_2 + (K_1 + K_3)r^{-2} - K_4 \\ K_4 + K_2 - K_3 r^{-2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.48}$$

n が奇数のとき,

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{R} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_2 + (K_1 + K_3)r^{-2} + K_4 \\ K_4 - K_2 + K_3 r^{-2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.49}$$

(5.48), (5.49) 式より，システム (5.17) の解 $\boldsymbol{x}(t)$ の初期値 $\boldsymbol{x}(0)$ が $\phi(0) = n\pi$ となれば，$t \geq 0$ で $\dot{\phi} \equiv 0$ であるから，$\phi(t) \equiv n\pi$ $(t \geq 0)$ である．したがって，$\phi = n\pi$ となる集合は不変集合となり，$x(0) = [r(0), R(0), n\pi]^{\mathrm{T}} (r(0), R(0) \in \mathbb{R}_+)$ を初期値とする解 $x(t)$ はこの不変集合に

とどまり，(5.28)，(5.29) 式の平衡点には収束しない．この不変集合上では，ヒツジと牧羊犬の運動はヒツジ，牧羊犬，ゴールの 3 つを結んだ直線上に拘束されることになる．本稿では，第 5.5 節で $\phi(0) = 0, \pi$ の場合のシミュレーション検証について述べる．

5.4 牧羊犬の機動制御則設計法

本節では，前節までの結果を踏まえて，ヒツジをあらかじめ与えられた目標円軌道へ追い込むための牧羊犬の機動制御則の設計法について述べる．以下の機動制御則設計問題について考える．

[機動制御則設計問題] 逃避戦略 (5.4)，ゲイン $K_1 \in \mathbb{R}_+$ で逃避するヒツジを，ゴール $\boldsymbol{G}$ を中心とした半径 $L \in \mathbb{R}_+$ の円軌道に収束させるために，牧羊犬に対する機動制御則 (5.5) の各ゲイン $K_2, K_3, K_4 \in \mathbb{R}_+$ が満たすべき条件を求めよ．

5.3.3 項で述べたように，システム (5.17) の平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}(i = 1, 2)$ において，ゴールからヒツジの距離は (5.42) 式の l_e に収束する．この l_e をあらかじめ設定した L とする．このとき，(5.42) 式をゲイン K_3 について整理すると，

$$K_3 = \frac{K_1 L^2 (K_1 K_2 - {K_4}^2 L^2)}{{K_4}^2 L^4 - {K_1}^2} \tag{5.50}$$

となる．ここで，平衡点が存在する条件である $K_2 > K_4 > 0$ と，$K_1 > 0$，$K_3 > 0$，K_3 の分子，分母の正負が一致することから，他のゲインの条件が求まる．詳細な計算は付録 2 を参照されたい．以下に設計法をまとめる．

定理 3 逃避戦略 (5.4)，ゲイン K_1 で逃避するヒツジに対し，上記の設計問題を達成するために各ゲイン K_2, K_3, K_4 が満たすべき条件は以下の通りである．

$$1).\ K_2 > \frac{K_1}{L^2} \tag{5.51}$$

$$2).\ \frac{K_1}{L^2} < K_4 < \frac{\sqrt{K_1 K_2}}{L} \tag{5.52}$$

$$3).\ K_3 = \frac{K_1 L^2 (K_1 K_2 - {K_4}^2 L^2)}{{K_4}^2 L^4 - {K_1}^2} \tag{5.53}$$

以下に考察を述べる．まず，牧羊犬がヒツジに近づくベクトルのゲイン K_2 の設計に関して，1) の条件より，大きい K_1 をもつヒツジ (より逃げ足の速いヒツジ) を誘導するためには

その値と比例して大きなゲイン K_2 が要求されることがわかる．つまり，牧羊犬に要求される機動性の条件が求められたことになる．また，より小さな円軌道半径 L を達成するためには，その 2 乗に反比例して大きなゲイン K_2 が要求されることがわかる．このことから，牧羊犬の機動性を上げることでより小さな円軌道にヒツジを留めることが可能であるといえる．

5.5 シミュレーションによる検証

得られた結果の妥当性を検証するため，誘導シミュレーションを行った．ここでは，平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ に収束する場合と，収束しない場合との 2 通りのシミュレーション結果を示す．シミュレーションは 4 次の Runge-Kutta 法を用いて行った．シミュレーションステップは $T = 100$ [step], ステップ幅は $h = 0.005$ とした．

5.5.1 平衡点に収束する場合

システム (5.17) において，初期値が $\phi(0) \neq 0, \pi$ となる解が，$K_2 > K_4 > 0$ において安定平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ に収束し，かつ，定理 3 の牧羊犬のゲインの条件により，ヒツジの円軌道の半径をあらかじめ設定した L に収束させることができることを検証する．ヒツジの目標円軌道半径を $L = 1.0$，ヒツジの牧羊犬から逃避するベクトルのゲイン K_1 を $K_1 = 2.0$ と設定とした．定理 3 の条件から，各ゲインは 1). $K_2 > \frac{K_1}{L^2} = 2.0$ より，$K_2 = 3.0$，2). $2.0 < K_4 < \sqrt{6}$ より，$K_4 = 2.2$，3). $K_3 = 2.7619$ と設定した．ヒツジの初期位置は $\boldsymbol{p_s}(0) = [-2, -1]^{\mathrm{T}}$, 牧羊犬の初期位置は $\boldsymbol{p_d}(0) = [2, 2]^{\mathrm{T}}$ とした．シミュレーションにおけるヒツジと牧羊犬の軌跡を Fig. 5.4 に示す．●を牧羊犬，牧羊犬の軌跡を破線，○をヒツジ，ヒツジの軌跡を実線で表す．Fig. 5.4 に示すように，牧羊犬とヒツジはゴール (ここでは原点) を中心とした円軌道に収束することがわかる．また，牧羊犬はヒツジをゴールを中心に反時計回りに回転して誘導する．このことから，システムが平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}$ に収束していることがわかる．さらに，Fig. 5.5 から，ヒツジと原点の距離が目標円軌道半径 $L = 1.0$ に収束することがわかる．

また，このシミュレーションにおけるベクトル軌跡とヌルクラインを Fig. 5.6 に示す．編目の曲面が $\dot{r}$，黒色の曲面が $\dot{R} = 0$，濃灰色の曲面が $\dot{\phi} = 0$ を示す．これら 3 種類のヌルクラインの交点がシステムの平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}, \boldsymbol{x}_{e2}$ となる．Fig. 5.6 から，点 $\boldsymbol{x} = [r, R, \phi]^{\mathrm{T}}$ が相空間上を移動し，平衡点 $\boldsymbol{x}_{e1}$ に収束することが確認できる．

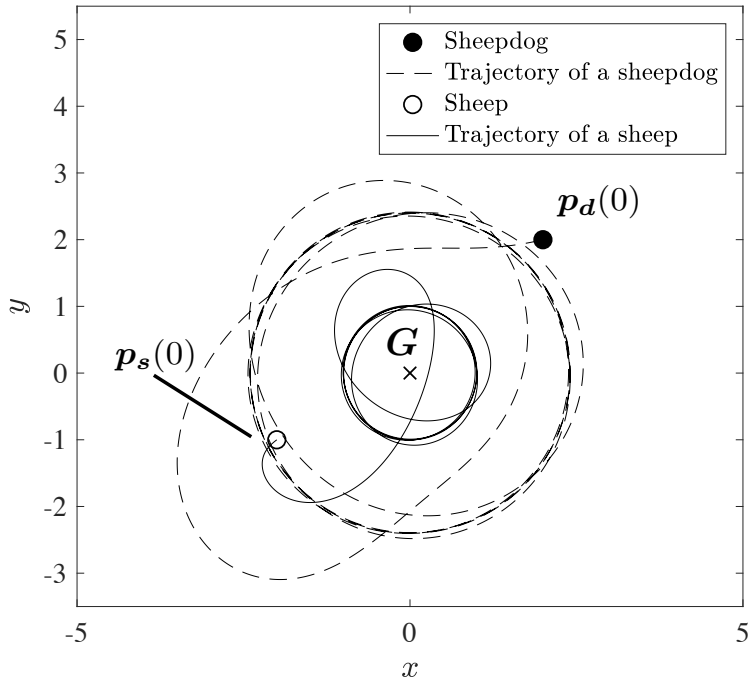


Fig. 5.4: Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $K_2 > K_4 > 0$

5.5.2 平衡点に収束しない場合

システム (5.17) において，5.3.4 項で議論の通り，初期値 $\phi(0) = 0, \pi$ である解は平衡点 $\boldsymbol{x}_{ei}$ に収束しないことを検証する．まず，$\phi(0) = 0$ の場合について示す．シミュレーション設定と各ゲインは上記のシミュレーションと同じとした．ヒツジと牧羊犬の初期位置を $\boldsymbol{p_s}(0) = [2, 2]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{p_d}(0) = [1, 1]^{\mathrm{T}}$ としたときのヒツジと牧羊犬の軌跡を Fig. 5.7 に示す．この図に示すように，牧羊犬はゴールとは逆方向にヒツジを追い続ける．次に，$\phi(0) = \pi$ の場合について示す．$\boldsymbol{p_s}(0) = [1, 1]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{p_d}(0) = [2, 2]^{\mathrm{T}}$ としたときの牧羊犬とヒツジの軌跡を Fig. 5.8 に示す．Fig. 5.8 に示すように，牧羊犬はヒツジをゴール方向に追跡し，ゴールを通過した後も追い続けることがわかる．また，紙面の都合上詳細は割愛するが，$\phi(0) = \pi$ であり，かつヒツジと牧羊犬がゴールを挟んで位置する場合，牧羊犬はゴールを通過した後もヒツジを追跡し続ける．

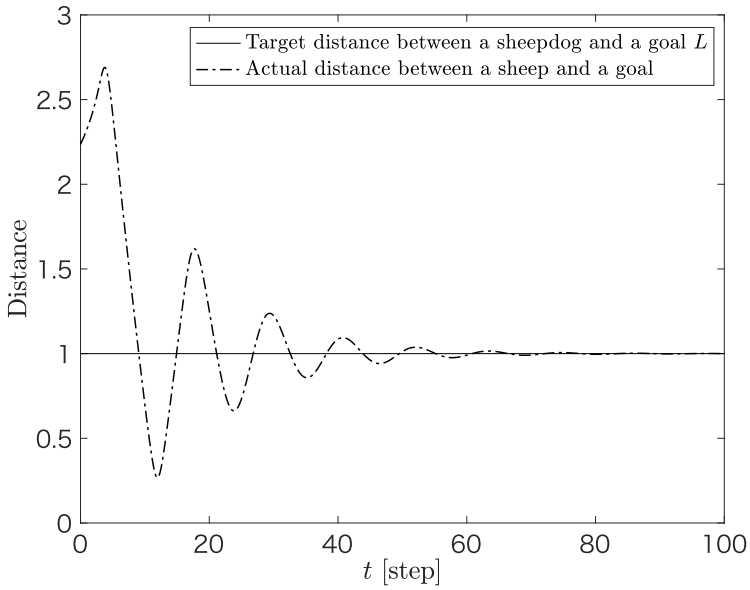


Fig. 5.5: Plot showing the convergence of the distance between a sheep and a goal

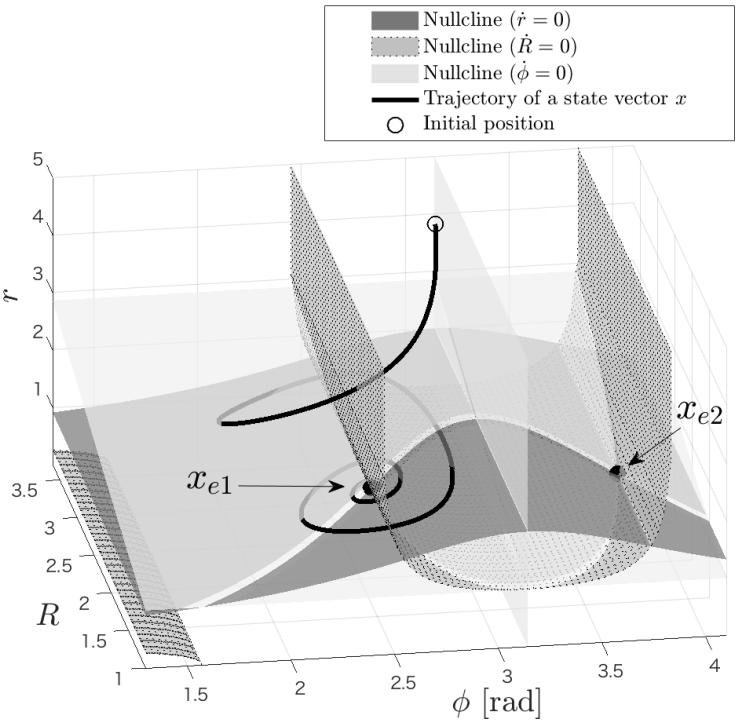


Fig. 5.6: 3D nullcline and vector locus in the case of $K_2 > K_4 > 0$

5.6 まとめと今後の展望

本稿では，シープドッグシステムに着想を得たマルチエージェントの機動制御法として，1 体の牧羊犬が，1 体のヒツジをあるゴールを中心とした円周上に追い込む機動制御則について

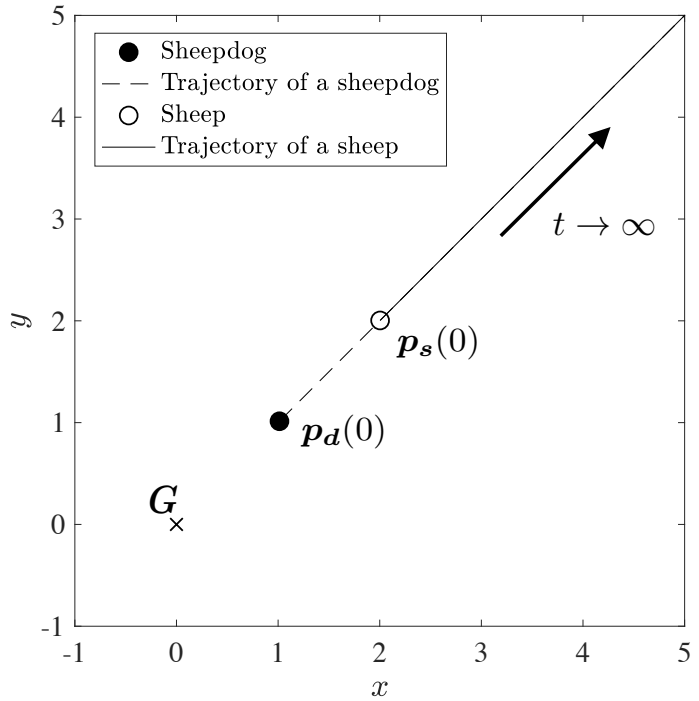


Fig. 5.7: Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $\phi(0) = 0$

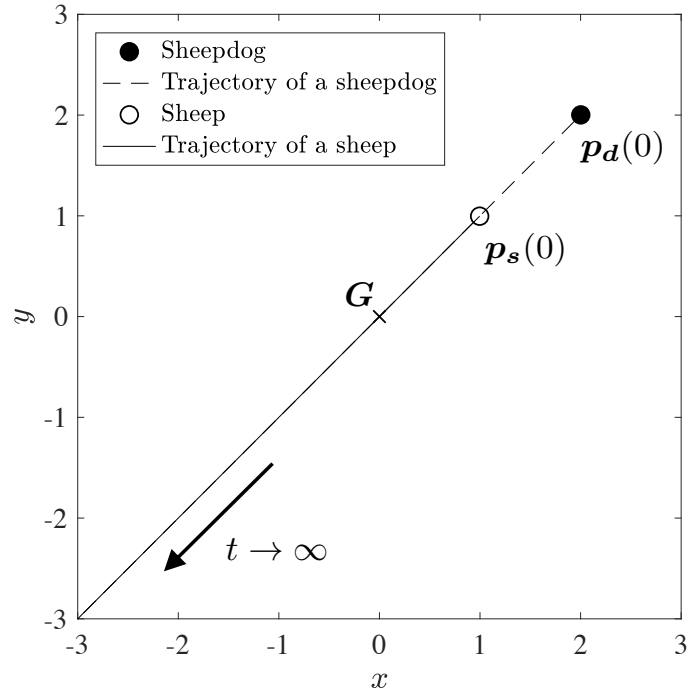


Fig. 5.8: Trajectories of a sheep and a sheepdog in the case of $\phi(0) = \pi$

理論解析を行った．結果，牧羊犬がヒツジを追うベクトルのゲイン K_2 が，牧羊犬がゴールか

ら離れるベクトルのゲイン K_4 より大きい場合に平衡点が 2 つ存在し，かつ線形近似による平衡点の安定性解析により，2 つの平衡点は平衡点近傍で漸近安定であることがわかった．また，初期位置でヒツジ，牧羊犬，ゴールの 3 つが一直線上に配置される場合には，平衡点に収束しないことを示した．加えて，ヒツジをあらかじめ与えられた目標円軌道に追い込むための牧羊犬の機動制御則の設計方法を明らかにした．牧羊犬から逃げるベクトルのゲイン K_1 を有するヒツジを，ある半径の円周上に留めるような牧羊犬の各ゲインが満たすべき条件を求めたことから，牧羊犬に必要な機動性を定式化したといえる．今後は，本稿で述べた平衡点へ収束する解の初期値集合を解析的に求めることを予定している．

また，第節でも述べたように，本研究では複数のヒツジの群れの誘導について解析的に明らかにすることを目指している．本稿ではヒツジ 1 体のみの誘導について述べたが，この結果をもとにヒツジ同士が十分に群れている場合における n 体のヒツジ群の誘導についても理論解析を試みたい．また，被制御対象である多数のロボット群 (ヒツジ群) を少数のコントローラロボット (牧羊犬) で制御するシステムの実機検証を行う予定である．これにより，ロボットの位置情報の誤差の許容範囲や，ロボット間のネットワークがどこまで簡素化できるかなど，実機検証から得られる知見を得て，よりシステムへの理解を深めていきたい．

第 6 章　牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:設計法と実機検証

6.1　研究背景

前章では，ヒツジ 1 体，牧羊犬 1 体の誘導における機動制御則の平衡点の安定性，およびその制御設計法について述べた．本章では，この制御設計法をもとに，ヒツジが複数の場合の誘導に適用可能な制御設計法を示し，その妥当性をシミュレーションと実機を用いて検証する．本論文では，ヒツジ群のモデルにヒツジ同士に引力・斥力が働くモデルを適用することで，群れを円形のフォーメーションに収束させる．そして，「各ヒツジは十分に時間を経たあと円形の相対位置を保ち続ける」という仮定のもとで，ヒツジ群の重心の振る舞いをヒツジ 1 体の振る舞いとみなすこととする．この条件下で，牧羊犬と群れの重心との収束距離の新たに条件として制御設計法に加えることで，ヒツジ群の誘導における機動制御則の制御設計法を示す．最後に，数値シミュレーションと，モーションキャプチャシステムを用いた実機システムにより，提案した制御設計法の妥当性を検証する．

[記法] $\mathbb{R}$ は実数の集合，$\mathbb{Z}$ は整数の集合，$\mathbb{N}$ は自然数の集合，$\mathbb{R}_+$ は正の実数の集合を意味する．また，ベクトル $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^2$ のユークリッドノルムを $\|\boldsymbol{x}\|$ で表す．

6.2　シープドッグシステムのモデリング

ここでは，本研究で扱うシープドッグシステムのモデルについて述べる．

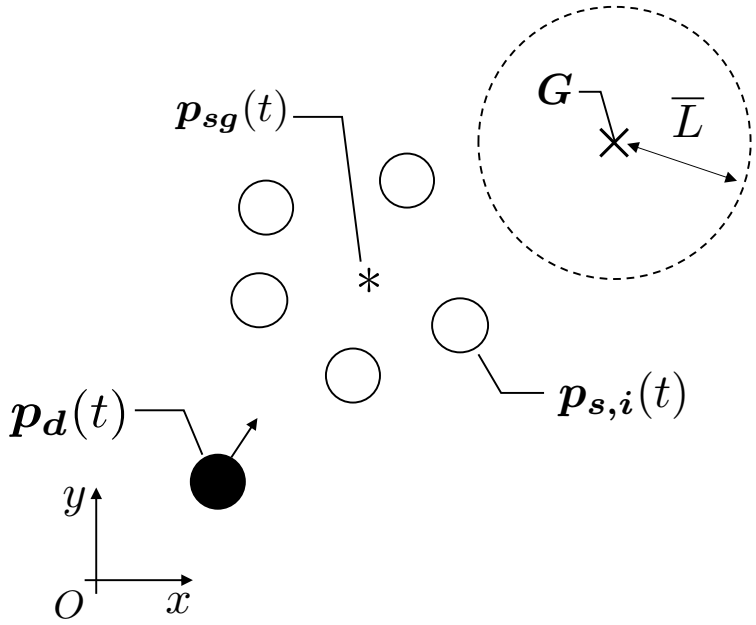


Fig. 6.1: Position of sheep, a sheepdog, and a goal (○:sheep, ●:sheepdog, ×:goal, ∗:center of sheep flock)

6.2.1 制御対象と制御目的

本稿では，2 次元平面上を運動する $n \in \mathbb{N}$ 体のヒツジと 1 体の牧羊犬を取り扱う．ヒツジ $i\ (i = 1, \cdots, n)$ と牧羊犬の動作は，1 階の微分方程式

$$\dot{\boldsymbol{p}}_{s,i}(t) = \boldsymbol{u}_{s,i}(t), \tag{6.1}$$

$$\dot{\boldsymbol{p}}_{d}(t) = \boldsymbol{u}_{d}(t) \tag{6.2}$$

で表されるとする．ここで，$\boldsymbol{p}_{s,i}(t) = [x_{s,i}(t), y_{s,i}(t)]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{p}_d(t) = [x_d(t), y_d(t)]^{\mathrm{T}}$ は，それぞれ時刻 $t\ (t \geq 0)$ におけるヒツジ i と牧羊犬の位置，$\boldsymbol{u}_{s,i}, \boldsymbol{u}_d \in \mathbb{R}^2$ は，それぞれヒツジの制御則，牧羊犬の機動制御則を表す制御入力であり，それらの具体的な関数形は次項で与える．

本研究における制御目的は，牧羊犬 $\boldsymbol{p}_d$ によりヒツジ群の重心 $\boldsymbol{p}_{sg}(t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{p}_{s,i}(t)$ をゴール $\boldsymbol{G} = [x_g, y_g]^{\mathrm{T}}$ を中心としたある半径 $\overline{L} \in \mathbb{R}_+$ の円周上に誘導することである．この制御目的は次のように定式化される．

$$\exists \overline{L}\ :\ \lim_{t\to\infty} \|\boldsymbol{p}_{sg}(t) - \boldsymbol{G}\| = \overline{L}. \tag{6.3}$$

Fig. 6.1 にこの制御目的を図示する．○はヒツジ，●は牧羊犬，∗ はヒツジの重心，破線円は

ヒツジの重心の極限周期軌道，× は極限周期軌道の中心 (ここではゴール $\boldsymbol{G}$ を指す) である．

6.2.2 ヒツジ群のモデル

まず，ヒツジ群のモデルについて述べる．実際のヒツジの群れが示す 2 つの特徴である

(i) ヒツジ同士は群れる

(ii) 各ヒツジは牧羊犬から逃げる

を踏まえて，文献 [76] の群れモデルを参考にモデリングを行った．ヒツジ i $(i = 1, \cdots, n)$ の制御入力を次式で与える．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{u}_{s,i}(t) = \ & -K_1 \sum_{1 \le j \le n, j \ne i} \frac{\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_{s,j}}{\|\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_{s,j}\|} \\ & +K_2 \sum_{1 \le j \le n, j \ne i} \frac{\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_{s,j}}{\|\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_{s,j}\|^3} \\ & +K_3 \frac{\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_d}{\|\boldsymbol{p}_{s,i} - \boldsymbol{p}_d\|^3}. \end{aligned} \tag{6.4}$$

ただし，$K_1, K_2, K_3 \in \mathbb{R}_+$ は各ベクトルの定数ゲインである．第 1 項はヒツジ i が他のヒツジに近づくベクトル，第 2 項はヒツジ i が他のヒツジに近づきすぎないように離れるベクトル，第 3 項はヒツジ i が牧羊犬から離れるベクトルである．

文献 [76] の群れモデルでは，(6.4) 式の 1，2 項目の他のヒツジへの引力・斥力ベクトルが，どちらも他のヒツジとの距離の 3 乗に反比例するベクトルとして設定されており，ヒツジ間の距離を別の定数ベクトル $\boldsymbol{L}$ で調節している．しかし本稿では，調節するパラメータの削減と収束スピードの向上のために，引力ベクトルを単位ベクトルに変更し，$\boldsymbol{L}$ を削除している．また，文献 [76] では円形の壁内での誘導を想定しているため，モデルの中に衝突回避のための壁からの斥力ベクトルが含まれていた．しかし本稿では，壁のない 2 次元平面を想定しているため，壁からの斥力ベクトルは削除している．

6.2.3 牧羊犬の機動制御則

次に，制御目的 (6.3) を達成するための牧羊犬の機動制御則を次式で与える．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{u}_d(t) = \quad & K_4(-\frac{\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{p}_{sg}}{\|\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{p}_{sg}\|}) + K_5\frac{\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{p}_{sg}}{\|\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{p}_{sg}\|^3} \\ & +K_6\frac{\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{G}}{\|\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{G}\|}. \end{aligned} \tag{6.5}$$

ただし，$K_4, K_5, K_6 \in \mathbb{R}_+$ は各ベクトルの定数ゲインである．第 1 項は牧羊犬がヒツジの重心に近づくベクトル，第 2 項は牧羊犬がヒツジの重心に近づきすぎないように離れるベクトル，第 3 項は牧羊犬がゴールから離れるベクトルである．なお，ヒツジが 1 体（$n = 1$）のみの場合には，(6.5) 式は文献 [107] における牧羊犬の機動制御則となっている．

(6.5) 式の制御入力は，文献 [76] で提案された牧羊犬の誘導法である中心追跡制御法を参考にしている．文献 [76] では，(6.5) 式の第 1 項のヒツジの重心に近づくベクトルを，距離に比例した $\boldsymbol{p}_{sg} - \boldsymbol{p_d}$ の定数ゲイン倍としていたのに対し，本稿では単位ベクトルの定数ゲイン倍に変更している．これにより，円形の壁が無く，ヒツジに対する壁からの斥力が存在せずとも，あるゲインの条件の下でヒツジの重心は極限周期軌道に収束することをシミュレーションにより確認している．

6.3 複数体のヒツジに対する機動制御則の設計

本節では，制御目的 (6.3) が達成されるために必要なヒツジ群と牧羊犬の制御入力 (6.4), (6.5) の各ゲインの条件を求め，複数のヒツジに対する牧羊犬の機動制御則の設計法について示す．文献 [107] で筆者らはすでにヒツジ 1 体，牧羊犬 1 体の誘導における機動制御則の設計法を示しており，本論文ではこれを複数のヒツジの誘導に適用可能な制御則へ拡張する．本節ではまず初めに，文献 [107] で示したヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬の機動制御則の設計法について紹介する．

6.3.1 ヒツジ 1 体に対する機動制御則の設計法

文献 [107] で示したヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬の機動制御則の設計法は以下の通りである．

[**ヒツジ 1 体に対する機動制御則の設計法** [107]] 制御入力 (6.4)，ゲイン $K_3 \in \mathbb{R}_+$ で逃避する 1 体のヒツジを，ゴール $\boldsymbol{G}$ を中心とした半径 $\overline{L} \in \mathbb{R}_+$ の円軌道に収束させるために，牧羊犬の機動制御則 (6.5) の各ゲイン $K_4, K_5, K_6 \in \mathbb{R}_+$ が満たすべき条件は以下の通りである．

$$1).\ K_4 > \frac{K_3}{\overline{L}^2}, \tag{6.6}$$

$$2).\ \frac{K_3}{\overline{L}^2} < K_6 < \frac{\sqrt{K_3 K_4}}{\overline{L}}, \tag{6.7}$$

$$3).\ K_5 = \frac{K_3 \overline{L}^2 (K_3 K_4 - {K_6}^2 \overline{L}^2)}{{K_6}^2 \overline{L}^4 - {K_3}^2}. \tag{6.8}$$

導出の詳細な解説は文献 [107] を参照されたい．

6.3.2 複数のヒツジに対する機動制御則の設計法

次に，(6.6)〜(6.8) 式を，制御対象が複数のヒツジでも適用可能になるように拡張する方法を考える．

$n(\in \mathbb{N})$ 体のヒツジの誘導では，(6.5) 式からわかるように，牧羊犬はヒツジ群の重心 $\boldsymbol{p}_{sg}$ をターゲットとして追跡する．しかし，群れ全体のサイズが増加すると各ヒツジと牧羊犬との距離は平均して大きくなるため，各ヒツジの牧羊犬からの斥力ベクトルの値が小さくなる．結果として，各ヒツジの逃避速度が相対的に小さくなり，牧羊犬が群れの重心に近づきすぎてしまい，ゴールと重心との距離の値が収束しない．このことから，複数のヒツジの誘導では，牧羊犬が群れの重心との距離を十分に保ちつつ追跡することが安定な誘導に重要であるといえる．このことを踏まえて，Fig. 6.2 に示すように，ヒツジ群を「ある群れ半径を有する 1 つの円板体」とみなし，牧羊犬が群れの重心に対して適切な距離を保ちつつ追跡するように (6.5) 式のゲイン K_4, K_5, K_6 が満たすべき条件を求めよう．

ヒツジ間距離が発散しないと仮定し，ヒツジの群れ半径 $\bar{l}_s$ を以下のように定義する．

$$\bar{l}_s := \max_{1 \le i \le n} \limsup_{t \to \infty} \|\boldsymbol{p}_{sg}(t) - \boldsymbol{p}_{s,i}(t)\|. \tag{6.9}$$

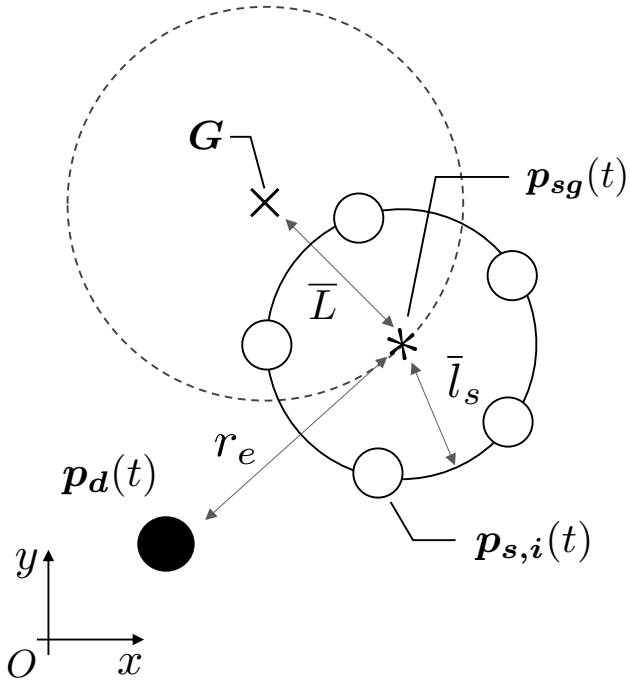


Fig. 6.2: Designing the mobile control law applicable to the multiple sheep agents

つまり，十分に時間が経てば，ヒツジ群は重心を中心とする半径 $\bar{l}_s$ の円板体とみなすことができる．

そこで，十分に時間が経過したとして，ヒツジ群を 1 つの円板体とみなせる場合について議論しよう．このとき，ヒツジ群の重心を文献 [107] におけるヒツジ 1 体に置き換えて考える．文献 [107] によると，ゲイン条件 $K_4 > K_6$ のもとで牧羊犬とヒツジ群の重心との距離の収束値は,

$$r_e = \sqrt{\frac{(K_3 + 2K_5)K_4 + \sqrt{D}}{2({K_4}^2 - {K_6}^2)}} \tag{6.10}$$

と得られる．ただし D は $D = (K_3K_4)^2 + 4{K_6}^2(K_3 + K_5)K_5$ である．この r_e は，文献 [107] で述べているように,

$$r_e > \sqrt{\frac{K_5}{K_4}} \tag{6.11}$$

の関係があることがわかっている．このことから，Fig. 6.2 に示すように，牧羊犬と群れの重心とが適切な距離を保てるように

$$\bar{l}_s < \sqrt{\frac{K_5}{K_4}} < r_e \tag{6.12}$$

となるようなゲインの条件を新たに (6.6)〜(6.8) 式に加える．

(6.12) 式の左側不等式に (6.8) 式を代入して K_6 について整理すると，

$$0 < K_6 < \frac{1}{\overline{L}^2}\sqrt{\frac{(\overline{L}^2 + \bar{l}_s{}^2){K_3}^2 K_4}{K_3 + K_4 \bar{l}_s{}^2}} \tag{6.13}$$

となる．ここで，(6.6)，(6.7)，(6.13) 式から，不等式

$$\frac{1}{\overline{L}^2}\sqrt{\frac{(\overline{L}^2 + \bar{l}_s{}^2){K_3}^2 K_4}{K_3 + K_4 \bar{l}_s{}^2}} < \frac{\sqrt{K_3 K_4}}{\overline{L}} \tag{6.14}$$

が得られるので，新たな K_6 の値の範囲は，

$$\frac{K_3}{\overline{L}^2} < K_6 < \frac{1}{\overline{L}^2}\sqrt{\frac{(\overline{L}^2 + \bar{l}_s{}^2){K_3}^2 K_4}{K_3 + K_4 \bar{l}_s{}^2}} \tag{6.15}$$

となる．この式と，(6.6)，(6.8) 式から，n 体のヒツジに対する機動制御則設計法は以下のように求められる．

[**n体のヒツジ群に対する機動制御則設計法**] (6.4) 式に基づいて移動する $n \in \mathbb{N}$ 体のヒツジ群の群れ半径が $\bar{l}_s \in \mathbb{R}_+$ であるとする．この群れの重心 $\boldsymbol{p}_{sg}$ をゴール $\boldsymbol{G}$ を中心とした半径 $\overline{L} \in \mathbb{R}_+$ の円軌道に収束させるために，牧羊犬に対する機動制御則 (6.5) の各ゲイン $K_4, K_5, K_6 \in \mathbb{R}_+$ が満たすべき条件は以下の通りである．

$$1).\ K_4 > \frac{K_3}{\overline{L}^2}, \tag{6.16}$$

$$2).\ \frac{K_3}{\overline{L}^2} < K_6 < \frac{1}{\overline{L}^2}\sqrt{\frac{(\overline{L}^2 + \bar{l}_s{}^2){K_3}^2 K_4}{K_3 + K_4 \bar{l}_s{}^2}}, \tag{6.17}$$

$$3).\ K_5 = \frac{K_3 \overline{L}^2 (K_3 K_4 - {K_6}^2 \overline{L}^2)}{{K_6}^2 \overline{L}^4 - {K_3}^2}. \tag{6.18}$$

なお，(6.9) 式で定義される群れ半径 $\bar{l}_s$ の値は，6.4.1 項で例示するように，数値シミュレーションによって，あらかじめ求めておくとする．また，(6.16) 式と (6.17) 式の右側不等式から，(6.10) 式のためのゲイン条件 $K_4 > K_6$ が満たされていることを付け加えておく．

6.4 数値シミュレーションによる検証

本節では，前節で示した n 体のヒツジ群に対する機動制御則設計法の妥当性を数値シミュレーションにより検証する．

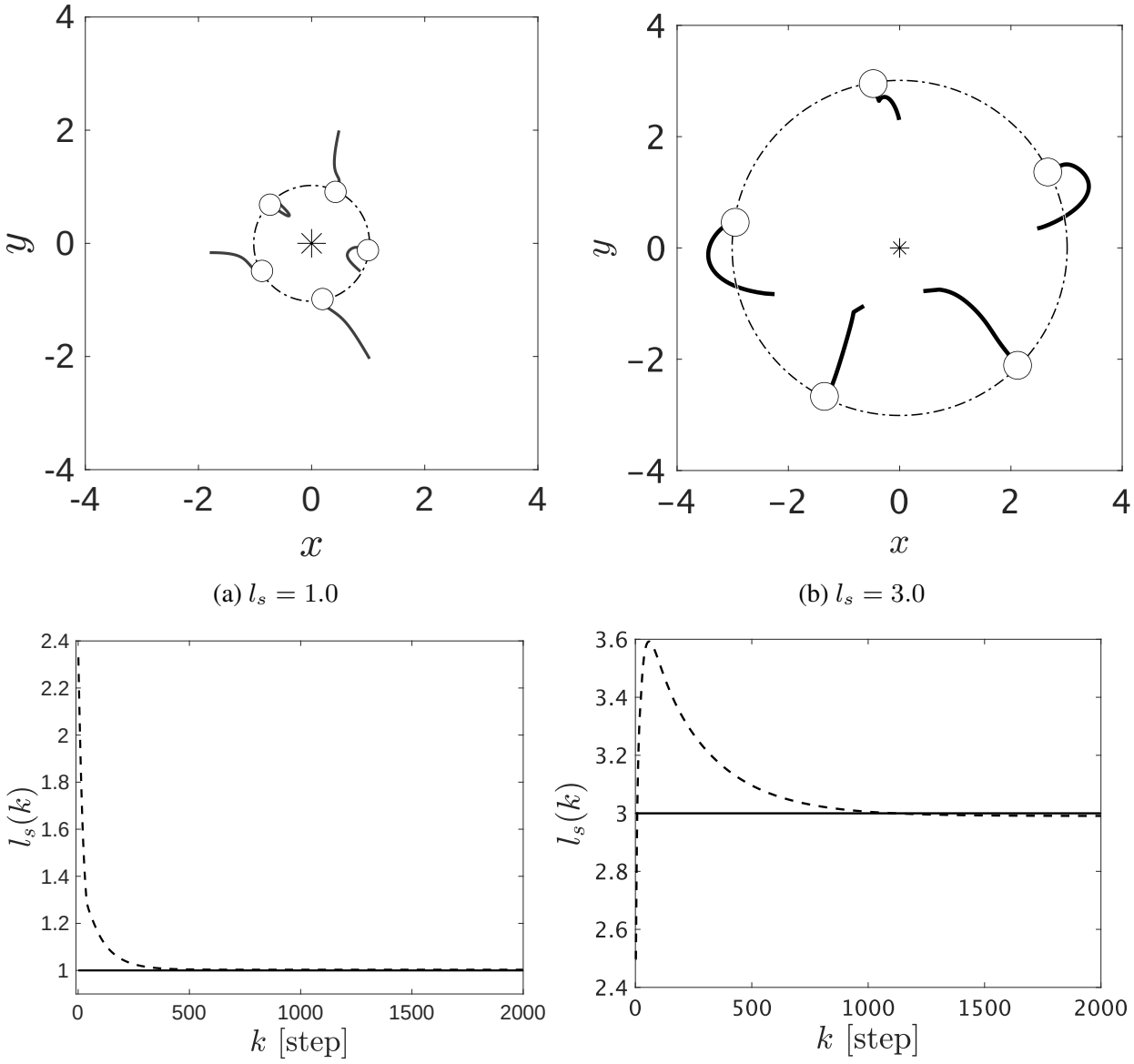
6.4.1 ヒツジ群の振る舞いと群れ半径に関する検証

まず，(6.4) 式に従い移動するヒツジの群れ半径 $\bar{l}_s$ が，ゲイン K_1, K_2 を調節することでどのように変化するかを検証する．ここでは，ヒツジ同士の引力・斥力ベクトルが $\bar{l}_s$ に与える影響のみを確認するため，牧羊犬からの逃避ベクトルのゲインは $K_3 = 0.0$ とする．5 体のヒツジをゴール $\boldsymbol{G} = [0, 0]^{\mathrm{T}}$ を中心とした半径 4.0 の円内にランダムに初期配置し，シミュレーション時間は 2000[step] とした．数値シミュレーションの結果，(i)$K_1 = 0.02,\ K_2 = 0.045$ の場合，群れ半径が $\bar{l}_s = 1.0$，(ii)$K_1 = 0.02,\ K_2 = 0.4$ の場合，$\bar{l}_s = 3.0$ となることがわかっている．本稿ではこの 2 通りの場合のシミュレーションの結果について述べる．

Fig. 6.3(a), (b) に各ケースでのヒツジ群の移動軌跡を，Fig. 6.3(c), (d) に離散時刻 k ($k \geq 0$)[step] における群れ半径

$$l_s(k) := \max_{1 \leq i \leq n} \|\boldsymbol{p}_{sg}(k) - \boldsymbol{p}_{s,i}(k)\| \tag{6.19}$$

の時間変化を示す．Fig. 6.3(a), (b) において，○はヒツジ，実線はヒツジの移動軌跡，$*$ はヒツジ群の重心を指す．なお，(6.4) 式から，ヒツジの制御入力はヒツジ同士の相対位置関係のみ用いているので，絶対座標系に対する並進・回転は考慮しなくてよい．そのため，Fig. 6.3(a), (b) には，各ヒツジの位置 $\boldsymbol{p}_{s,i}(k)$ を群れの重心 $\boldsymbol{p}_{sg}(k)$ が原点に一致するように平行移動した軌跡を示している．Fig. 6.3(a), (b) から，各ヒツジは重心を中心とした円周上に収束することがわかる．また，Fig. 6.3(c), (d) において，破線はステップ k における群れ半径 $l_s(k)$ の時間変化，実線はそれぞれ $\bar{l}_s = 1.0, 3.0$ の直線を指す．Fig. 6.3(c), (d) から，適切にゲインを調節することで群れ半径を所望の値に収束させることが可能であることをシミュレーションにより確認した．



(a) $l_s = 1.0$

(b) $l_s = 3.0$

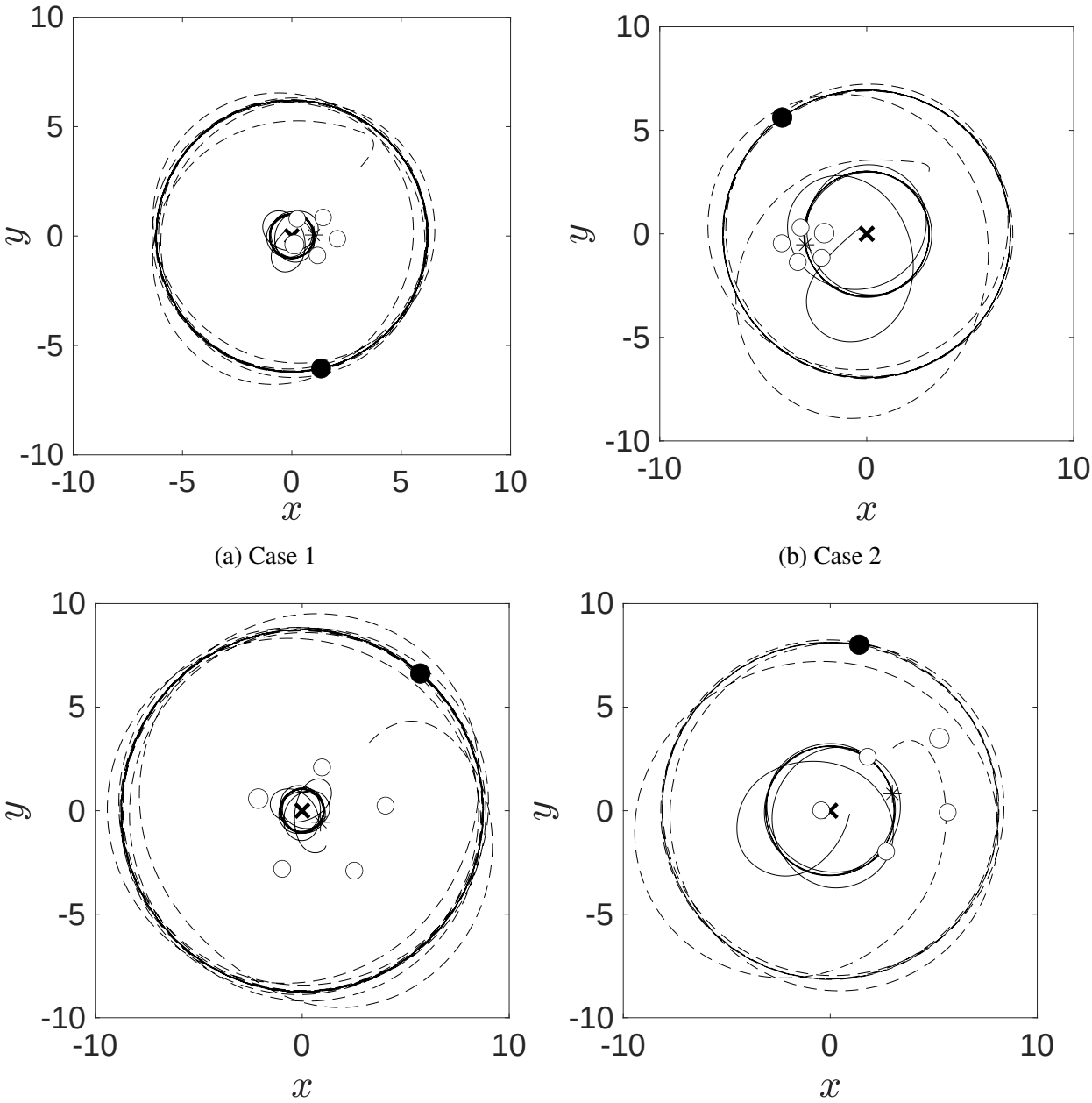
(c) $l_s = 1.0$

(d) $l_s = 3.0$

Fig. 6.3: (a), (b): Trajectories of sheep and the center of the sheep flock in each case (○:sheep, $*$:center of sheep flock, $-$: trajectories of sheep), (c), (d): Plots showing the convergence of the radius of sheep flock $\bar{l}_s$ in each case

6.4.2 牧羊犬の機動制御則の検証

6.4.1 項を踏まえて，(6.16)〜(6.18) 式に基づいて牧羊犬の機動制御則を設計し，誘導シミュレーションを行った．牧羊犬は 1 体，ヒツジは 5 体，ゴールは $\boldsymbol{G} = [0, 0]^{\mathrm{T}}$，ヒツジの初期配



(a) Case 1

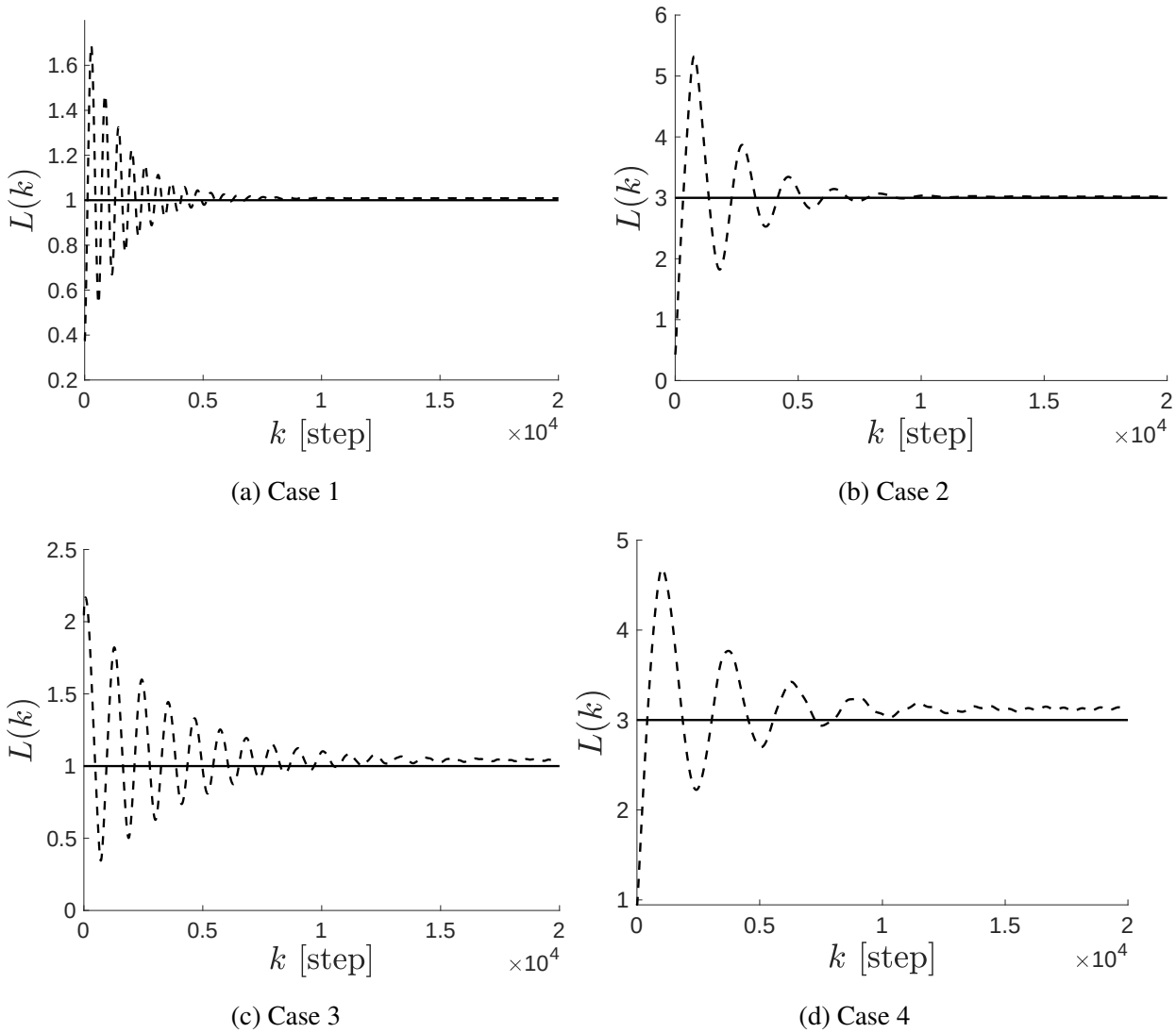
(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 6.4: Trajectories of the sheepdog and the center of the sheep flock in each case (○:sheep, $*$:center of sheep flock, $-$: trajectory of the center of sheep flock, ●:sheepdog, $--$:trajectory of the sheepdog, $\times$:goal)

置 $\boldsymbol{p}_{s,i}(0)$ は $[-2,-2]^{\mathrm{T}}$ から $[2,2]^{\mathrm{T}}$ の正方領域にランダムに分布させ，牧羊犬の初期位置は $\boldsymbol{p}_d(0) = [3,3]^{\mathrm{T}}$ とした．また，シミュレーション時間は 20000[step] とした．本論文では，群



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 6.5: Plots showing the convergence of the length between the center of the flock and the goal in each case ($--$: actual distance $L(k)$, $-$: target distance $\overline{L}$)

れ半径を 6.4.1 項で検証した [a1] $\bar{l}_s = 1.0$ と [a2] $\bar{l}_s = 3.0$ の 2 通り，群れの重心の収束半径 $\overline{L}$ を [b1] $\overline{L} = 1.0$ と [b2] $\overline{L} = 3.0$ の 2 通りについて，Case 1: [a1,b1]，Case 2: [a1,b2]，Case 3: [a2,b1]，Case 4: [a2,b2] の計 4 通りのケースをシミュレーションした．各ケースで設計したゲイン値を Table 6.1 に示す．各ケースにおける誘導軌跡と，離散時刻 k $(k \geq 0)$[step] におけるヒツジの重心とゴールとの距離

$$L(k) := \|\boldsymbol{p}_{sg}(k) - \boldsymbol{G}\| \tag{6.20}$$

Table 6.1: Gains designed based on the mobile control for the flock of sheep in 4 cases

<table>
<tr><th>Case</th><th>K_1</th><th>K_2</th><th>K_3</th><th>K_4</th><th>K_5</th><th>K_6</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="4">0.02</td><td rowspan="2">0.045</td><td rowspan="4">0.3</td><td>0.5</td><td>7.15</td><td>0.304</td></tr>
<tr><td>2</td><td>0.05</td><td>0.346</td><td>0.037</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="2">0.4</td><td>0.5</td><td>14.65</td><td>0.302</td></tr>
<tr><td>4</td><td>0.05</td><td>0.601</td><td>0.036</td></tr>
</table>

の時間変化をそれぞれ Fig. 6.4，6.5 に示す．Fig. 6.4 において，○はヒツジ，$*$ はヒツジ群の重心，実線は重心の移動軌跡，●は牧羊犬，破線は牧羊犬の移動軌跡，$\times$ はゴール $\boldsymbol{G}$ を指す．また，Fig. 6.5 において，破線は重心とゴールとの距離 $L(k)$ の時間変化，実線は収束半径 $\overline{L}$ の値を指す．これらの結果から，(6.16)〜(6.18) 式をもとに牧羊犬の各ゲインを設計することで，制御目的が達成されたといえる．

なお，(6.4)，(6.5) 式からなるシステムには不変集合が存在することを確認している．すなわち，初期状態で n 体のヒツジと牧羊犬とゴールが一直線上に並ぶ場合では，誘導は収束せずに運動が一直線上に拘束されて発散する．

6.5 実機実験による検証

本節では，(6.16)〜(6.18) 式の妥当性を検証するために行った実機実験について述べる．

6.5.1 モーションキャプチャシステムに基づくロボット群の制御

本論文では，OptiTrack (SPICE 社) と呼ばれるモーションキャプチャシステムを用いて実験システムを構築した [74]．構築した実験システムの概略，実験システムのフローチャートをそれぞれ Fig. 6.6，Fig. 6.7 に示す．実験エリアの周囲に，Fig. 6.6 左上に示すカメラ (Flex13, (OptiTrack, 解像度 : 1280 × 1024，フレームレート:最大 120[fps])) を複数配置する．これらを用いて Fig. 6.6 下の移動ロボット (Pololu m3pi robot) 上部に設置された反射マーカー (灰色の球体) の 3 次元空間の位置を計測することができる．この反射マーカーを各ロボットに 3 つ搭載することで，各ロボットの 3 次元空間における位置と姿勢を取得できる．ホスト PC で得られた情報をもとに制御入力を計算し，Fig. 6.6 右上の Xbee S2C(DIGI 社) を用いて各ロボッ

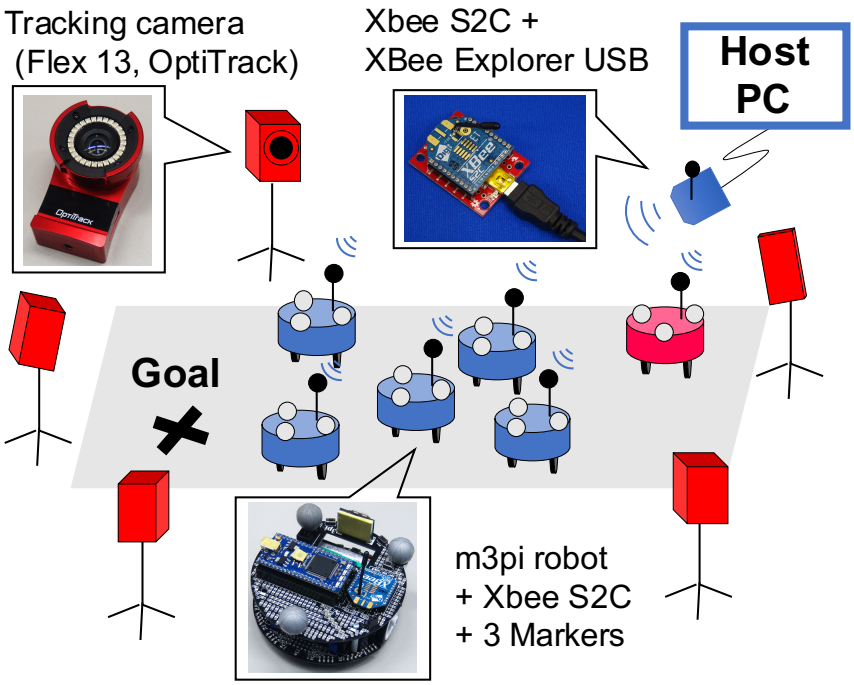


Fig. 6.6: Scheme of demonstration of sheepdog-type robot navigation

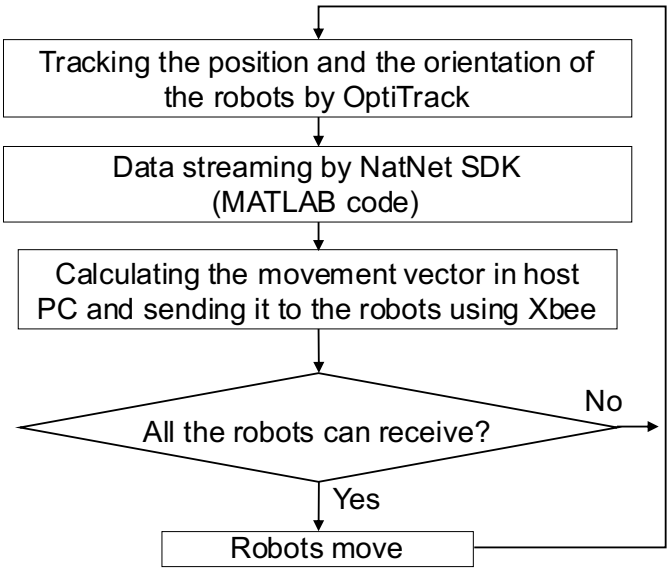


Fig. 6.7: Algorithm for robots

トに制御入力をシリアル通信する．実験システムの詳細は文献 [74] を参照されたい．

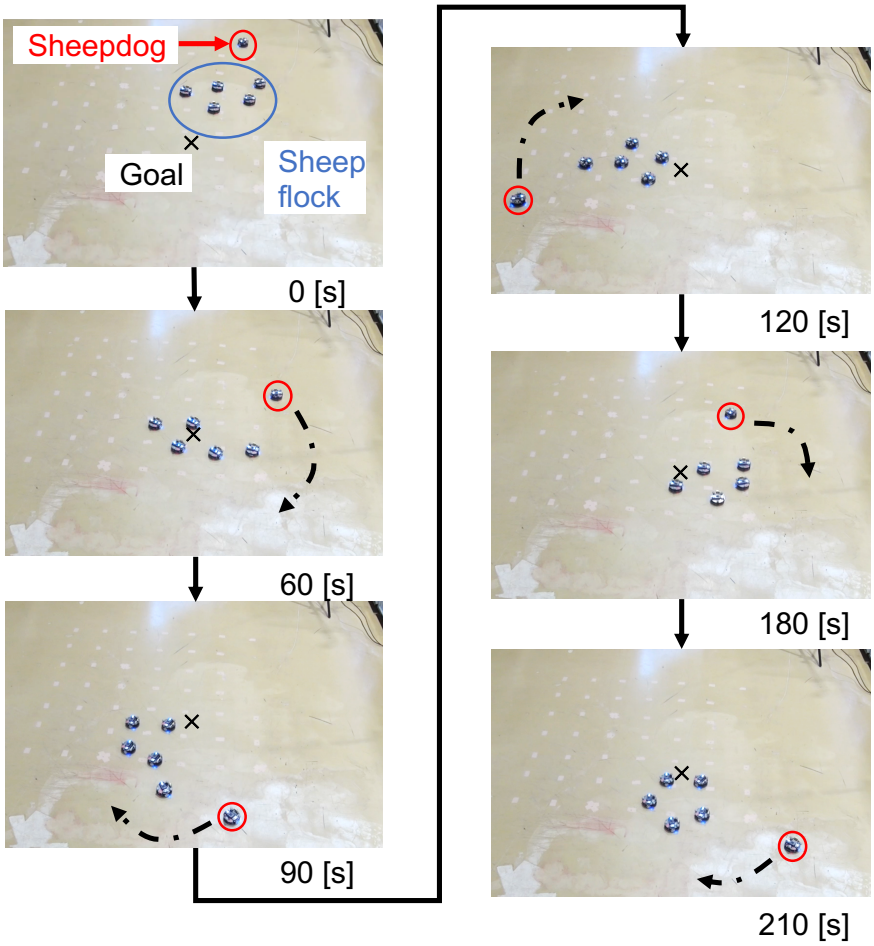


Fig. 6.8: Snapshots of robot demonstration in which a sheepdog robot succeeds in herding five sheep robots

6.5.2 実機実験および考察

実験エリアは縦 3[m]，横 2.5[m] の屋内の 2 次元平面であり，実験エリアの周囲に 5 台のカメラを設置した．用いた牧羊犬ロボットは 1 台，ヒツジロボットは $n = 5$ 台とした．まず，ヒツジの制御則のゲインは $K_1 = 0.02$, $K_2 = 0.002$, $K_3 = 0.03$ とし，重心の収束半径を $\overline{L} = 0.251$[m] と設定した．K_1, K_2 がこの値の場合，シミュレーションにおいてヒツジの群れ半径は $\bar{l}_s = 0.22$ となる．これらを踏まえて，(6.16)〜(6.18) 式に基づいて機動制御則を設計する．各ゲイン K_4, K_5, K_6 の値を 1). $K_4 > \frac{K_3}{\overline{L}^2} = 0.476$ より $K_4 = 0.85$, 2). $0.48 < K_6 < 0.553$ より $K_6 = 0.5$, 3). $K_5 = 0.2$ とした．誘導のスナップショットを Fig. 6.8

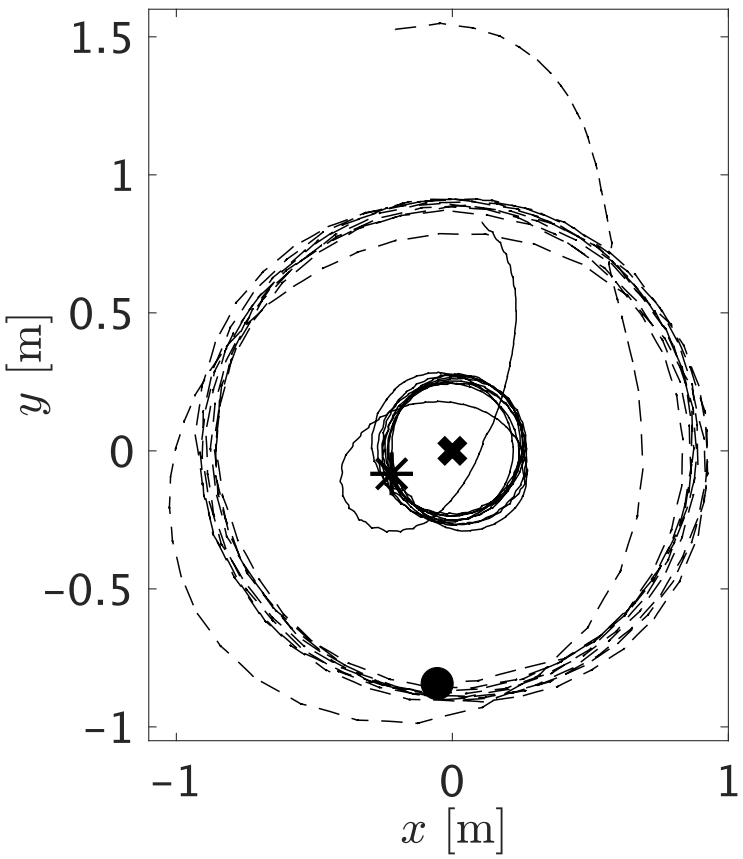


Fig. 6.9: Trajectries of the sheepdog robot and five sheep robots ($*$:center of sheep flock, $-$: trajectory of the center of sheep flock, ●:sheepdog, $--$:trajectory of the sheepdog, $\times$:goal)

に，牧羊犬とヒツジ群の誘導軌跡を Fig. 6.9 に，ヒツジの重心 $\boldsymbol{p}_{sg}$ のゴールからの距離の時間変化のデータを Fig. 6.10 に示す [74]．Fig. 6.9 において，$*$ はヒツジ群の重心，実線は重心の移動軌跡，●は牧羊犬，破線は牧羊犬の移動軌跡，$\times$ はゴール $\boldsymbol{G}$ を指す．また，Fig. 6.10 において，破線は重心とゴールとの距離 $L(t)$ の時間変化，実線は収束半径 $\overline{L}$ の値を指す．Fig. 6.8, 6.9 から，シミュレーションでの誘導を実機で実現していることがわかる．また，Fig. 6.10 から，収束半径の $\overline{L} = 0.251$[m] 付近に値が収束していることがわかる．以上から，(6.16)〜(6.18) 式による設計法の妥当性を確認できた．

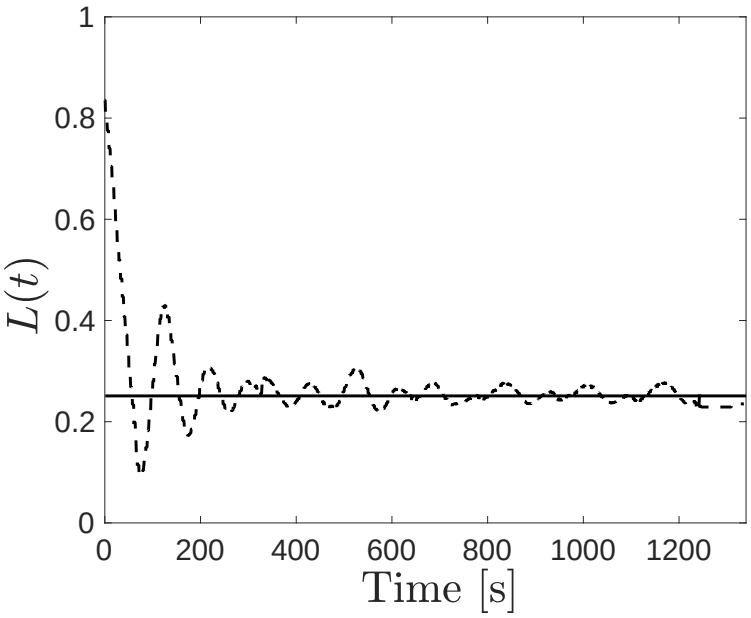


Fig. 6.10: Plot showing the convergence of the length between a center of the flock and the goal ($--$: actual distance $L(t)$, $-$: target distance $\overline{L}$)

6.6 まとめと今後の展望

本研究では，マルチエージェントシステムにおいて「少数のコントローラを用いて多数のエージェント群をいかに制御するか」という制御問題に対し，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得て，制御対象であるヒツジ群を，サイズを有する 1 体の円体とみなすことで 1 体の牧羊犬で動的に制御する機動制御則を構築した．ヒツジ群を 1 体のヒツジとして近似することで理論解析を適用し，それを複数のヒツジの誘導に適用可能な機動制御則の設計法に拡張した．結果，牧羊犬がヒツジ群の群れのサイズを考慮し，重心との距離を十分に保ちながら誘導することで，設計した極限円軌道に収束させることができることを示した．この結果は，群れのサイズが同じであれば，群内のヒツジの数に依らず同じ 1 体として扱うことができるスケールフリー性を有することを意味し，数千台規模のエージェント群を 1 体エージェントの誘導と同様のコントローラで制御できる可能性を示唆している．今後の研究では，システムの有するスケールフリー性に着目して，複数のエージェント群を，それぞれサイズを有するクラスタに分割して複数ゴールに誘導するといった，シープドッグシステムに学ぶフラクタル階層制御システムを構築することを目指す．

第 7 章　牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導:誘導性能の検証

7.1　研究背景

第 6 章では，ヒツジ同士は常にすべての他のヒツジとネットワークが連結されている場合の誘導の安定性および牧羊犬の機動制御則の設計論について述べた．それに対しこの章では，実世界の群ロボットシステムへの応用を想定し，分散制御された複数のヒツジに対する機動制御則の誘導を扱う．本章では，従来提案されてきた 2 つの牧羊犬の制御則と，機動制御則のターゲットを変更した提案法を含めた 3 つのコントローラの誘導性能をシミュレーションにより統計的に解析する．ヒツジには，一般的な群れモデルである Boid モデルを用い，ヒツジの分散度合いを変えて誘導を行い，性能を比較する．

さらに，牧羊犬ロボットの取得するヒツジの位置情報を削減するために，牧羊犬の有するカメラセンサーの情報に制限を加えた場合の誘導性能を比較・検討する．実際の牧羊犬の視野範囲に着想を得て，ヒツジに大きさを仮定し，ヒツジ同士の重なり合いによる牧羊犬の認識領域に制限を加え，統計的解析を行う．最後に，より現実的なシチュエーションを想定し，提案法の牧羊犬のカメラが許容できる精度限界や，初期状態に対するロバスト性についても検討する．

7.2 シープドッグシステムのモデリング

まず，ヒツジのモデルについて設計する．その後，従来の 2 つの牧羊犬の誘導コントローラと，提案するコントローラについて紹介する．

7.3 ヒツジ群のモデルの設計

本研究では，ヒツジのモデルに Reynolds により提案された Boid モデルを採用する [33]．このモデルは，個々のエージェントの意思決定により安定な群れの形状を生成する．この Boid モデルは最も典型的な群れモデルであり，各エージェントが周囲のエージェントとの相対位置関係に応じて以下の 3 種類の力を受けることで群れ行動を生み出すことが知られている．

- 衝突回避力：近隣の個体との衝突を回避するために離れる．
- 整列力：近隣の個体との速度を揃えようとする．
- 凝集力：近隣の個体と近づこうとする．

このモデルに基づいて，以下のようなヒツジ群のモデルを提案する．まず，ヒツジ i (i はヒツジの ID 番号) は，自身を中心とした半径 R の円形の視野範囲をもつ．この範囲は他の個体との相互作用を行うエリアを意味する．ヒツジ i は，他のヒツジが円形の視野範囲内にいる場合，その近隣個体から離れる．また，近隣個体の姿勢に従って向きを揃え，かつ近づこうとする力を受ける．加えて，Fig. 7.1 に示すように，ヒツジ i は牧羊犬から逃げる斥力を受ける．

ステップ k でのヒツジ i の移動ベクトル $v_i^s(k)$ は，以下のように表される．

$$v_i^s(k) = K_{s_1} v_i^1(k) + K_{s_2} v_i^2(k) + K_{s_3} v_i^3(k) + K_{s_4} v_i^4(k) \tag{7.1}$$

ここで， $K_{s_1}, K_{s_2}, K_{s_3}, K_{s_4}$ は，各ベクトルのゲインを示す．また，$v_i^1(k), v_i^2(k), v_i^3(k)$ はそ

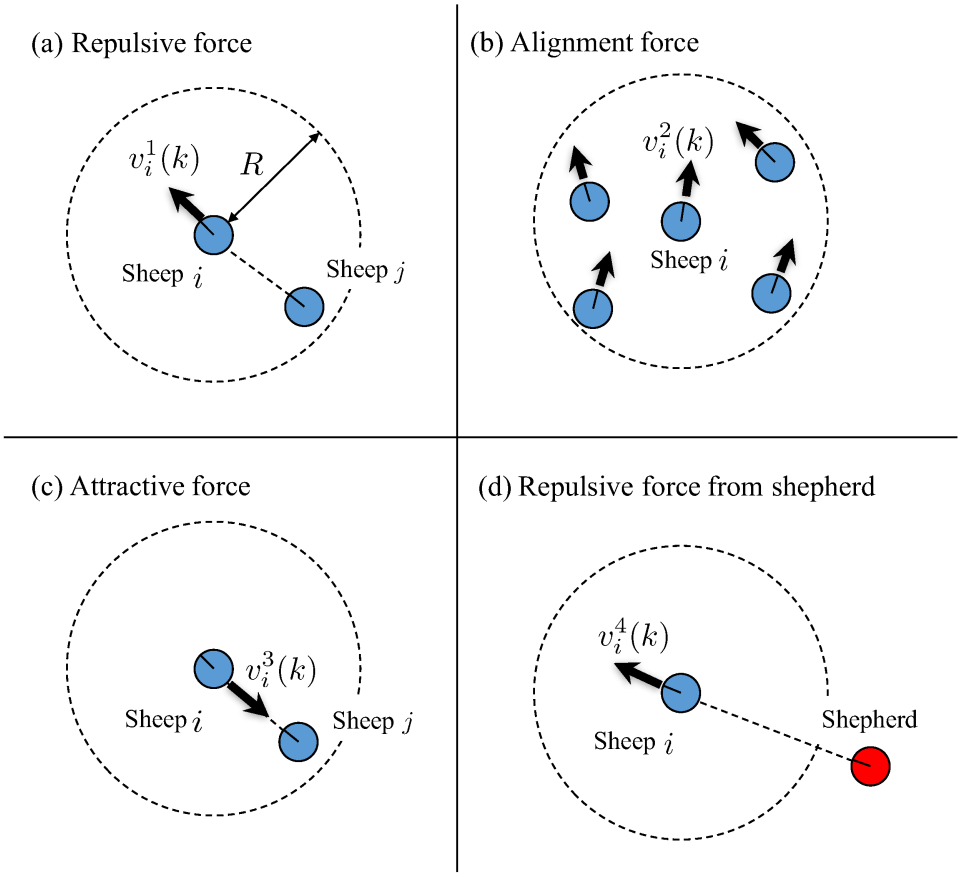


Fig. 7.1: Schematic explanation of the sheep flock model. A sheep at the center is influenced by the neighboring agents within its vision area.

れぞれ斥力，整列力，引力を示しており，それらは以下の式で表される．

$$v_i^1(k) = -\frac{1}{N_{S_i}} \sum_{j \in S_i} \frac{x_j^s(k) - x_i^s(k)}{\|x_j^s(k) - x_i^s(k)\|^3} \tag{7.2}$$

$$v_i^2(k) = \frac{1}{N_{S_i}} \sum_{j \in S_i} \frac{v_j^s(k-1)}{\|v_j^s(k-1)\|} \tag{7.3}$$

$$v_i^3(k) = \frac{1}{N_{S_i}} \sum_{j \in S_i} \frac{x_j^s(k) - x_i^s(k)}{\|x_j^s(k) - x_i^s(k)\|} \tag{7.4}$$

また，牧羊犬からの斥力 $v_i^4(k)$ は，

$$v_i^4(k) = -\frac{x_d(k) - x_i^s(k)}{\|x_d(k) - x_i^s(k)\|^3}, \tag{7.5}$$

で与えられる．ここで，$x_i^s(k), x_j^s(k), x_d(k)$ はそれぞれヒツジ i, j，牧羊犬の位置であり，S_i

はエージェント i の視野範囲円内に存在する近接ヒツジの集合を，N_{S_i} は，視野範囲円内に存在する近接ヒツジの数を意味する．ここで注意したいのは，本研究で Boid モデルを採用したのは，実際のヒツジの群れの誘導を再現するためではないという点である．本研究ではヒツジの群れの特徴を変えて，牧羊犬に設計するコントローラの誘導性能を評価するためにこのモデルを採用していることを強調しておく．

7.3.1 先行研究における牧羊犬の誘導コントローラ

ここでは，3 種類の牧羊犬の誘導コントローラについて述べる．一つ目は，実際のヒツジの群れを深く観察しそれを誘導するためのモデルが提案されており，中心追跡制御と呼ばれている [76]．このモデルでは，牧羊犬はヒツジの群れの重心に接近するように設計されており，実世界で移動ロボットによるアヒルの群れの誘導を達成しており，その有効性が示されている．二つ目は，実際の牧羊犬のヒツジ追い現象におけるヒツジと牧羊犬の位置データをもとに設計した動的ターゲット切り替え制御法を用いる．三つ目は，機動制御則のターゲットを，ヒツジ群の重心ではなくゴールから最も遠い個体を追跡するものであり，最遠個体追跡制御と称する．

従来のコントローラ: 中心追跡制御

中心追跡制御では，牧羊犬は群れの重心に接近する (Fig. 7.2(a))．ステップ k における牧羊犬の移動ベクトル $u(k)$ は，

$$u(k) = K_{d_1}u_1(k) + K_{d_2}u_2(k) + K_{d_3}u_3(k), \tag{7.6}$$

と与えられる．ここで，$K_{d_1}, K_{d_2}, K_{d_3}$ は，それぞれのベクトルのゲインであり，各ベクトルは，$u_1(k) = \frac{\vec{DC}}{|\vec{DC}|}, u_2(k) = -\frac{\vec{DC}}{|\vec{DC}|^3}, u_3(k) = -\frac{\vec{DG}}{|\vec{DG}|}$ を表す．

動的ターゲット切り替え制御

次に，動的ターゲット切り替え制御と呼ばれる牧羊犬のコントローラを紹介する．このコントローラは，牧羊犬は群れの状態に基づいてターゲットを切り替えながら誘導する [85]．この制御では，Fig. 7.2(b) に示すように，牧羊犬は群れのサイズに従ってターゲットを切り替え，群れを収集・誘導する．群れのサイズ (ここでは，群れの重心から各ヒツジとの距離の最大値)

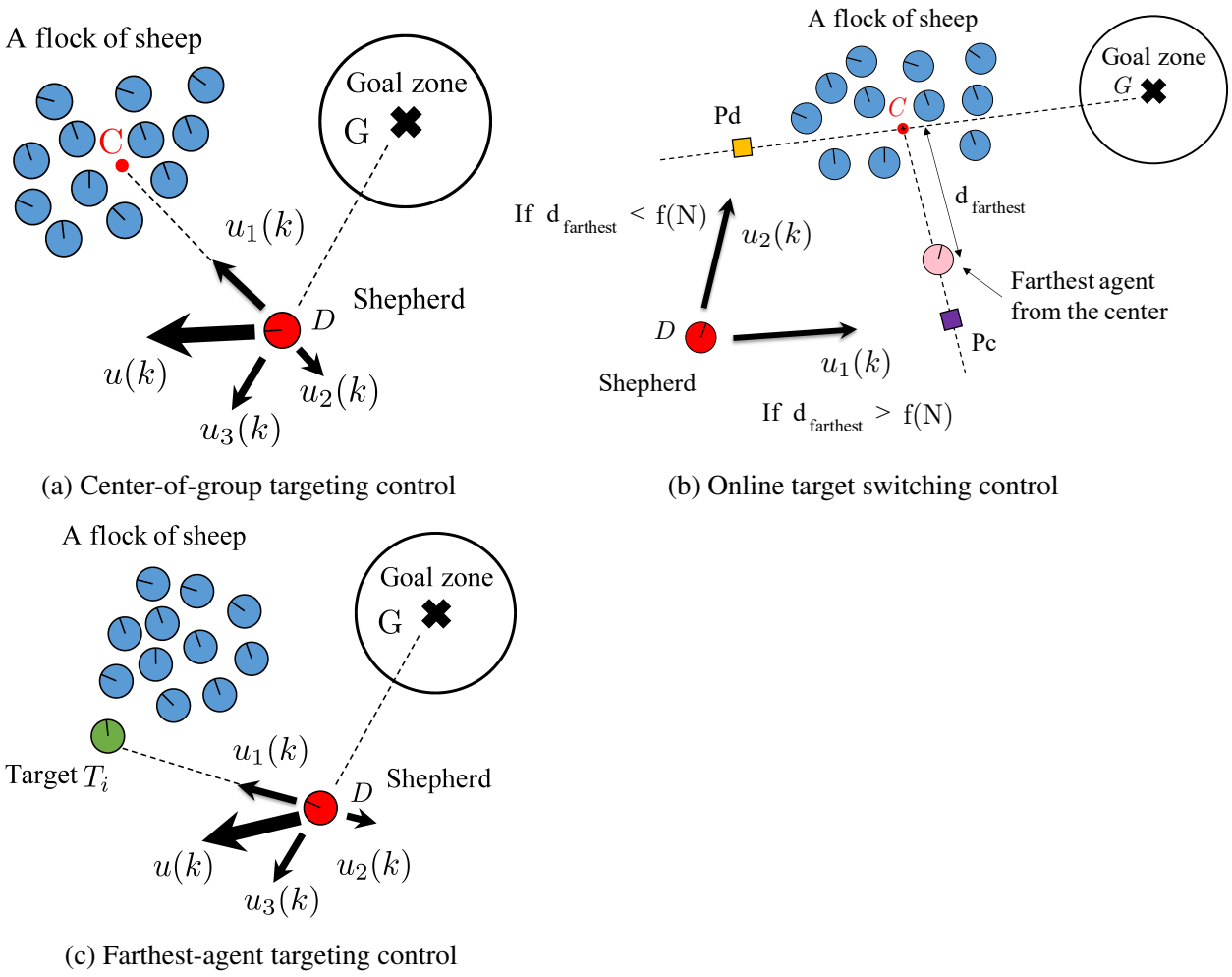


Fig. 7.2: Shepherd controllers proposed in previous studies and this study

$d_{farthest}$ が，サイズに対する閾値 $f(N)$ より大きい場合，ヒツジを重心に集めるため点 Pc に向かい移動する．また，$d_{farthest}$ が閾値 $f(N)$ 以下の場合は，誘導するため点 Pd に向かい移動する．そして，牧羊犬は，どのヒツジに対する距離が c_0R (R はヒツジ同士の相互作用半径，c_0 は正の定数) より小さくなる場合，速度をゼロに設定する．以上から，ステップ k における牧羊犬の速度ベクトル $u(k)$ は以下の式で表される．

$$u(k) = \begin{cases} S_{d_1}u_1(k) & (d_{farthest} > f(N)) \\ S_{d_2}u_2(k) & (d_{farthest} < f(N)) \\ 0 & (L_{sD} < c_0R) \end{cases} \tag{7.7}$$

ここで，S_{d_1}, S_{d_2} はそれぞれ $u_1(k) = \frac{D\vec{P}c}{|D\vec{P}c|}$，$u_2(k) = \frac{D\vec{P}d}{|D\vec{P}d|}$ のゲイン，L_{sD} は全てのヒツジと牧羊犬との距離の集合である．また，$f(N), Pc, Pd$ は，それぞれ文献 [85] で用いられている値を参考に，$f(N) = c_1 RN^{2/3}, Pc = c_2 RN, Pd = c_3 R$ とした (c_1, c_2, c_3 は定数ゲインであり，適切な値を選択する).

7.3.2 提案する誘導コントローラ：最遠個体追跡制御

ここでは最遠個体追跡制御という新たなコントローラを提案する．筆者は，分散度の高いヒツジ群の誘導において，群れの中のゴールから最も遠い個体が，最も「問題な」ヒツジであるという理由から，牧羊犬がゴールから最遠の個体を追跡することで効果的に誘導できると考えた．牧羊犬が，ゴールからの最遠個体を追跡し続ける限りは，ヒツジは群れから (ゴールゾーンから) 離れた個体は Boid モデルによる凝集作用により近くのヒツジに引き付けられる．このことから，牧羊犬は各ヒツジを徐々にゴールゾーンに集め，最終的にゴールゾーンに囲いこめることが想定される．

Fig. 7.2(c) に示すように，最遠個体を T_i とすると，牧羊犬の移動ベクトルは，(7.6) 式と同様に表され，各ベクトルは $u_1(k) = \frac{D\vec{T}_i}{|D\vec{T}_i|}, u_2(k) = -\frac{D\vec{T}_i}{|D\vec{T}_i|^3}, u_3(k) = -\frac{D\vec{G}}{|D\vec{G}|}$ と表現される．

7.4 グローバルカメラを有する牧羊犬の誘導の解析

ここでは，牧羊犬が全てのヒツジが見える (グローバルカメラを用いる) 場合の中心追跡制御，動的ターゲット切り替え制御，最遠個体追跡制御の誘導性能を比較，検討する．

7.4.1 評価指標

まず，誘導性能を定量的に評価するために，複数の評価指標を提示する．

- 誘導成功：シミュレーションを開始してから 500 ステップ以内に全てのヒツジが目標領域内に存在する．
- 誘導時間：シミュレーション開始時から誘導完了までのステップ数とする．

Table 7.1: Parameters in shepherd navigation

R	Radius of view field	20
r	Size of each sheep	1
K_{s_1}	Coefficient of repulsive force among group agents	$10-100$
K_{s_2}	Coefficient of alignment force among group agents	0.5
K_{s_3}	Coefficient of attraction force among group agents	2.0
K_{s_4}	Coefficient of repulsion force from the shepherd	$5,000$
K_{d_1}	Coefficient of attraction force from sheep	10.0
K_{d_2}	Coefficient of repulsion force from sheep	200
K_{d_3}	Coefficient of repulsion force from goal	8.0

- 群れの分散度合いは各ステップにおける分散 σ で定義され，以下の式で表される．

$$\sigma(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\|C - x_i^s(k)\|^2. \tag{7.8}$$

ここで，N はヒツジの総数，C は群れの重心位置，$x_i^s(k)$ はステップ k におけるヒツジ i の位置である．

本研究では，ヒツジと牧羊犬のパラメータを Table 7.1 のように設定する．ヒツジの総数は $N = 30$ とし，ヒツジの初期位置を点 $[-20, -20]^{\mathrm{T}}$ を中心とした半径 10 の円内にランダムに分布させる．牧羊犬の数は 1 体で，点 $[15, 5]^{\mathrm{T}}$ に配置する．また，ゴールエリアを中心が点 $[20, 20]^{\mathrm{T}}$，半径が $r_g = 9.8$ の円形領域と設定する．

7.4.2 誘導解析

さて，統計的解析により，3 つの牧羊犬の誘導コントローラの誘導性能を検証しよう．

中心追跡制御の場合

本研究では，ヒツジの分散度合いに対応するヒツジ同士の斥力のゲイン K_{s_1} の値を変えて 50 回のシミュレーションを行う．Fig. 7.3 に異なる K_{s_1} の値の時のヒツジの分散度合いの変化を示す．K_{s_1} の増加に伴いヒツジの分散も増加し，ヒツジの群れは分裂する傾向が高まる．

さて，Table 7.2 と Table 7.3 に各 K_{s_1} の値における 50 回試行のうちの誘導成功回数と，誘

Table 7.2: Simulation results obtained from global-camera-based approach in each controller: Number of navigation successes in 50 trials

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pre.1 : Center-of-group targeting	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0
Pre.2 : Online target switching	0	0	0	50	50	50	0	0	0	0
Farthest-agent targeting	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Table 7.3: Simulation results obtained from global-camera-based approach in each controller: Average navigation time in 50 trials

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pre 1. Center-of-group targeting	66.74	102.08	155.64	-	-	-	-	-	-
Pre 2. Online target switching	-	-	-	216	136	119	-	-	-
Farthest-agent targeting	69.58	67.8	68.68	69.8	70.38	71.86	72.74	74.04	76.16

K_{s_1}	100
Pre 1. Center-of-group targeting	-
Pre 2. Online target switching	-
Farthest-agent targeting	78.28

導時間の平均を示す．この表からわかるように，K_{s_1} を増加していくにつれて，誘導は失敗することがわかる．典型的な失敗例は， Fig. 7.4 に示すように，牧羊犬がヒツジの群れの中に入り込んでしまい，群れを分割させてしまうものである．加えてこの結果から，中心追跡制御では，ヒツジの群れが密につながっている状態では，群れ中心をターゲットとした誘導が適切に機能することが示された．

動的ターゲット切り替え制御の場合

次に，動的ターゲット切り替え制御に基づく群れの誘導について述べる．シミュレーションで用いたパラメータは以下の通りである：$S_{d_1} = S_{d_2} = 3.0, c_0 = 0.001, f(N) = 1/2{\cdot}5{\cdot}30^{2/3} \approx 24.1, Pc = 3 \cdot 5 = 15, Pd = 1/5 \cdot 5 \cdot 30 = 30$ と設定した．Table 7.2 と Table 7.3 に，K_{s_1} の値を変えた時のシミュレーション結果を示す．$K_{s_1} = 10 \sim 30$ の場合，つまり群れのサイズが小さい時，(7.7) 式に従い牧羊犬は群れの手前で停止する傾向にある．そのため，牧羊犬はヒツジの後方に回り込めないため誘導は失敗する．同様に，$K_{s_1} = 70 \sim 100$ でも誘導は失敗している，これはヒツジの群れの分散度が大きいため分裂してしまうからである．Fig. 7.5 に誘導成功シミュレーションのスナップショットを示す．Fig. 7.5 に示すように，牧羊犬は，たとえ

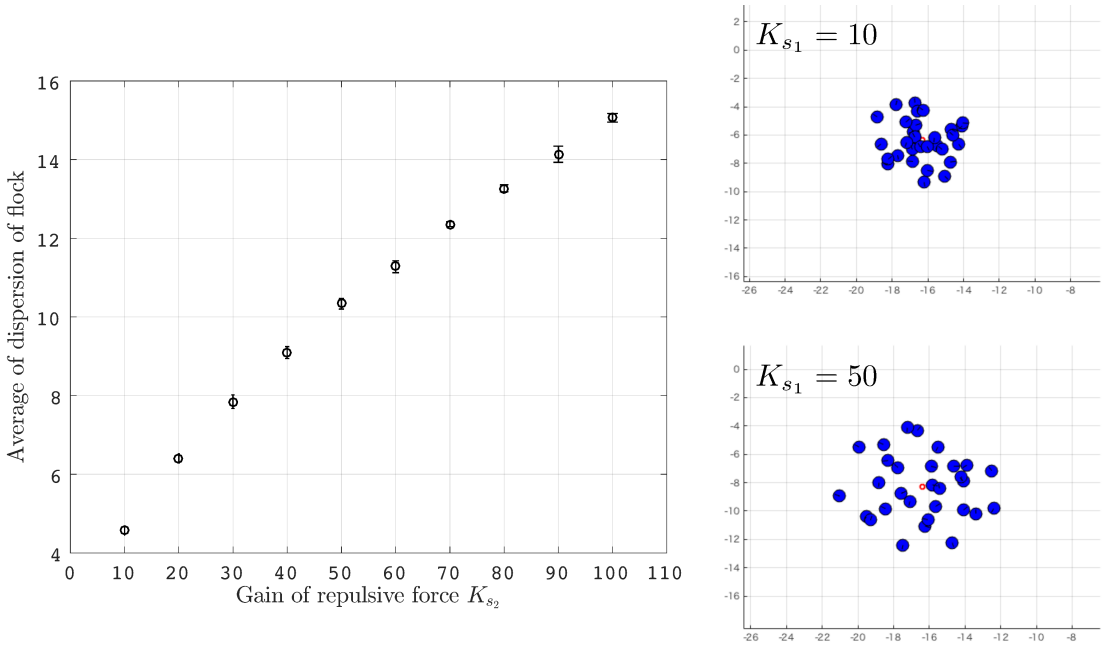


Fig. 7.3: Changes in sheep dispersion for different values of K_{s_1}

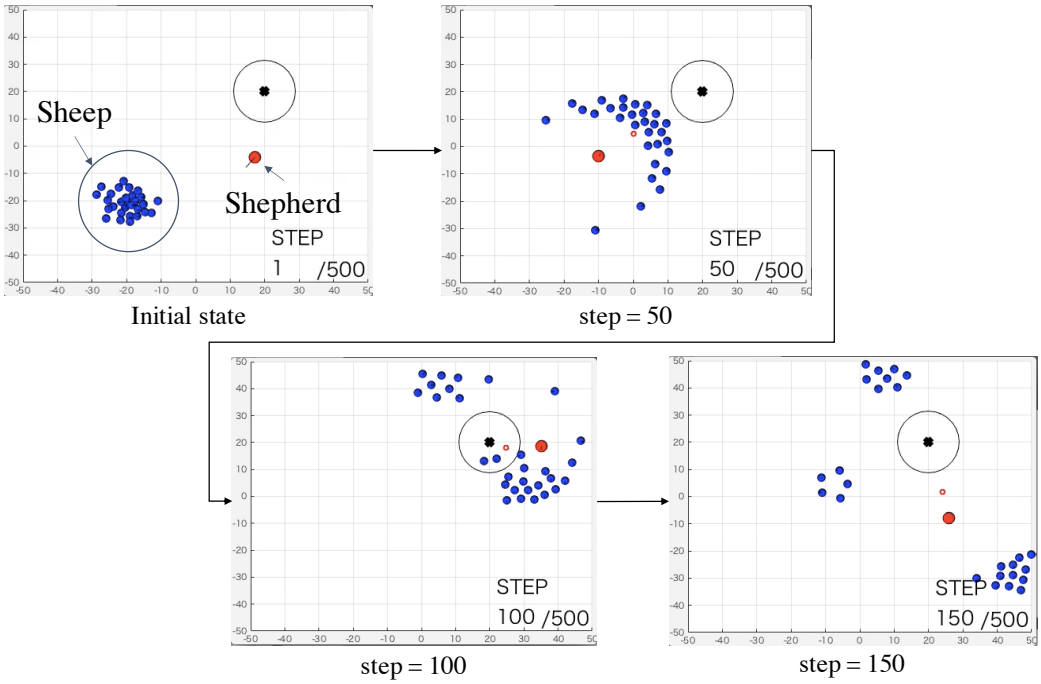


Fig. 7.4: Shepherding failure: sheep group splits into several groups

ゴールから逆方向に群れ全体が誘導されるとしてもヒツジを集めるために重心から遠い個体を追いかける振る舞いを示す．収集モードでは，牧羊犬は群れを重心に集めるのに対して，誘導

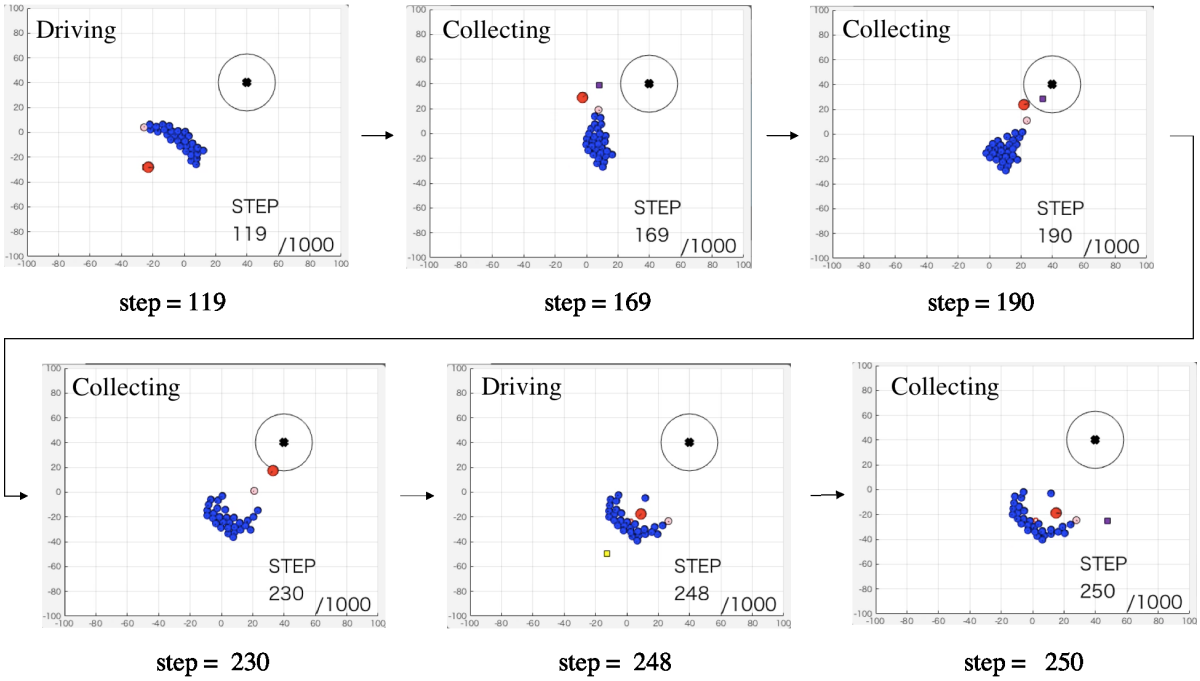


Fig. 7.5: Example of shepherding based on the target-switching controller

モードではゴール方向に群れを誘導する．つまり，牧羊犬は誘導から収集へとモードを適応的に切り替える．しかしながら，群れの分散度が上がると 2 つのモードを繰り返す動きも確認している．つまり，収集モードで群れを集めた後に，牧羊犬が誘導モードで群れを分割し，再び収集モードに切り替わるといった振る舞いを繰り返し続ける．

ここで注意すべきは，文献 [85] では，このコントローラは牧羊犬が実際のヒツジを誘導する際の実際の動きに着想を得ているため，Boid モデルに基づいた群れを誘導することを想定していないことである．あくまで，後に提案する最遠個体追跡制御との誘導性能を比較することを目的として，このコントローラを用いてシミュレーション解析を行ったことを述べておく．

最遠個体追跡制御の場合

最後に，最遠個体追跡制御に基づく牧羊犬の誘導について議論する．先述した解析と同様に，K_{s_1} の値を変化させ 50 回のシミュレーションを行った．

Fig. 7.6 に最遠個体追跡制御での誘導のスナップショットを示す．また， Table 7.2 と Table 7.3 に K_{s_1} の値を増加していった場合でのシミュレーション結果を示す．Table 7.3 に示されるように，K_{s_1} の値の増加に伴い，誘導時間はかかるものの，Table 7.2 から誘導は成功す

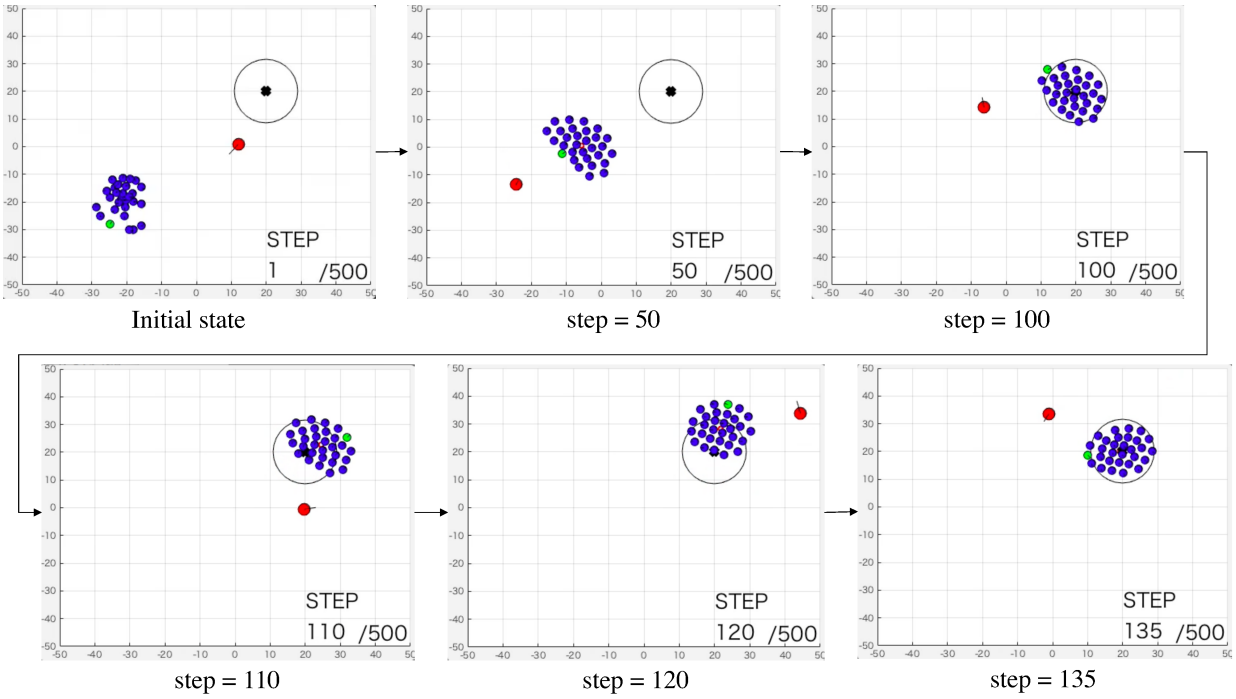


Fig. 7.6: Snapshots of sheep and shepherd positions based on farthest-agent targeting control

ることがわかる．これらの結果から，提案するコントローラは，凝集力が弱い群れを誘導する場合でも効率よく働くといえる．この理由は，牧羊犬は群れの重心にアプローチしようとするではなく，注意深く群れの側面から近づこうとするからである．

さて，ここではこの制御法の特徴について述べる．まず，このコントローラの設計法について簡潔に議論する．(7.6) 式のゲイン K_{d_1} と，K_{d_3} の値を変化させたシミュレーションから，$K_{d_1} > K_{d_3}$ の場合で誘導が成功していることを確認している．これは，第 5 章での理論解析でも述べたように，ヒツジ 1 体の誘導が安定に収束するゲインの条件が $K_{d_1} > K_{d_3}$ であることに対応している．次に，このコントローラと動的ターゲット切り替え制御とを比較する．このコントローラは動的ターゲット切り替え制御と類似しているが，その誘導の振る舞いは大きく異なる．最遠個体追跡制御では，各ステップにおけるゴールから最遠個体をターゲットとして切り替え追跡するだけで，陽にヒツジの群れを重心に集めようとするわけではない．しかし，自然とヒツジを集める収集行動が生じている．これは，ヒツジ同士が群れるという特性を活用しているからであり，この制御にはゴール方向にヒツジを集めるという機能が暗に埋め込められていると解釈できる．

Fig. 7.7 に上記の議論を裏付ける典型的な最遠個体追跡制御の誘導軌跡を示す．Fig. 7.7 か

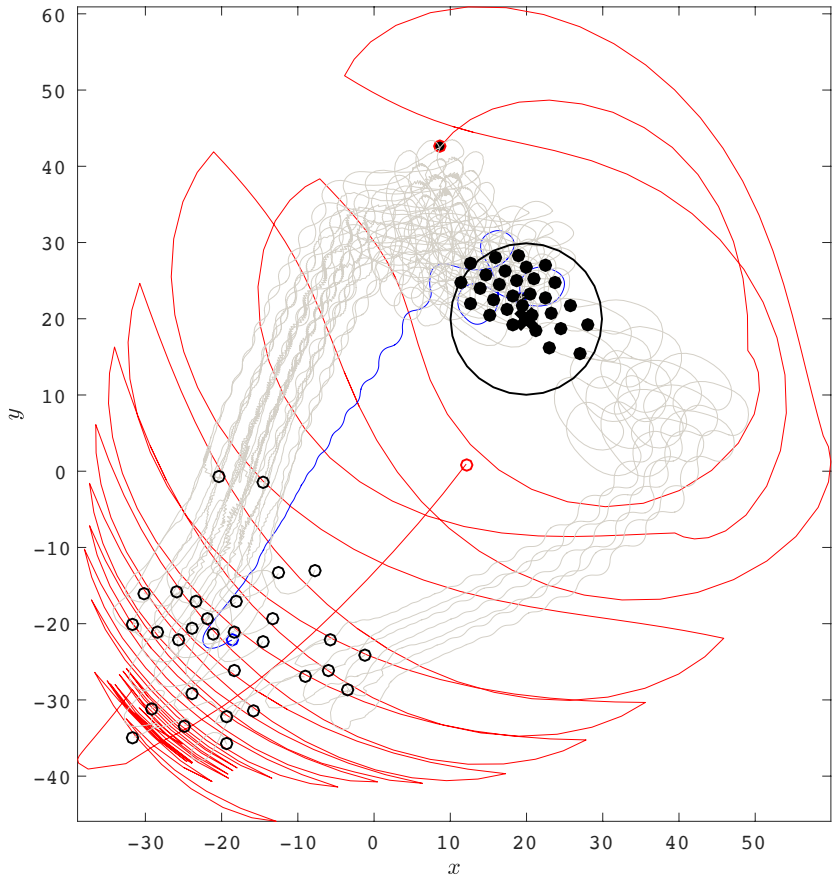


Fig. 7.7: Trajectories of all agents: red line is the shepherd's trajectory, blue line is the center of the flock's trajectory, and gray lines indicate each sheep's trajectory.

ら，ゴールゾーンに向かう途中で，群れ全体が 2 つのヒツジのグループに分割されていることがわかる．これは，牧羊犬がヒツジの群れの状態に基づいて全てのヒツジを集めようとしている (緩く群れに集めるような) のではないことを意味している．加えて，2 つの群れはゴールゾーン付近へ誘導されると，ゴール付近で一つにまとまっていることが分かる．言い換えれば，提案するコントローラはゴールから最遠のヒツジを集めつつ，群れをゴールへ誘導する 2 つの機能を併せて行うといえる．

7.5 ローカルカメラを有する牧羊犬の誘導の解析

次に，牧羊犬が全てのヒツジが見えない (ローカルカメラを用いる) 場合の中心追跡制御，動的ターゲット切り替え制御，最遠個体追跡制御の誘導性能を検証する．

7.5.1 牧羊犬のローカルカメラの定義

牧羊犬のローカルカメラの効果をシンプルなルールで検証するために，本研究では以下の牧羊犬の視野を定義する．Fig. 7.8(a) と Fig. 7.8(b) に牧羊犬の局所的な視野で知覚されるヒツジを図示する．まず，ヒツジは半径 r の円体であるとし，牧羊犬から最も近いヒツジに対して，2 つの直線 l_{i1}, l_{i2} を引き，ヒツジ s_i とそれらの直線がなす角度は，

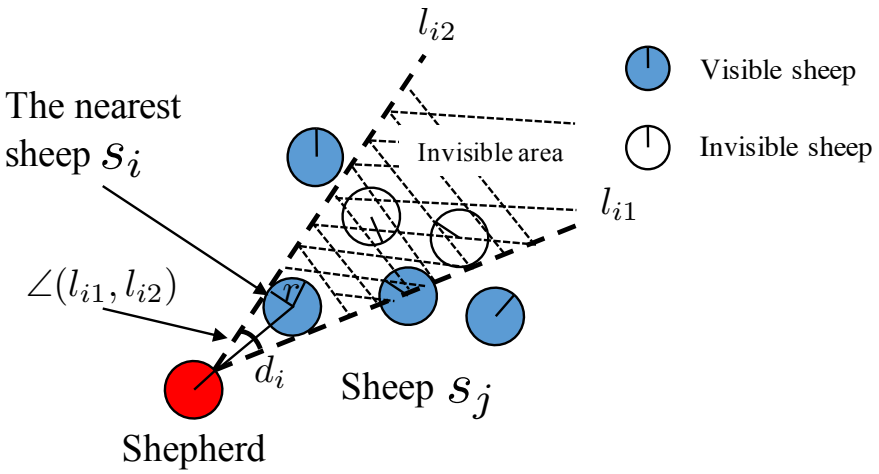
$$\angle(l_{i1}, l_{i2}) = 2\sin^{-1}\frac{r}{d_i} \tag{7.9}$$

と計算できる．Fig. 7.8(a) に示すように，牧羊犬から最も近い個体により，死角範囲が存在する．同様に，2 番目に近いヒツジ s_j に対しても死角範囲を計算し，死角範囲の総和を死角領域として定義する．本研究では，牧羊犬は死角領域以外に存在するヒツジのみ知覚することができ，視野領域に一部が存在するヒツジも同様に知覚することができる．

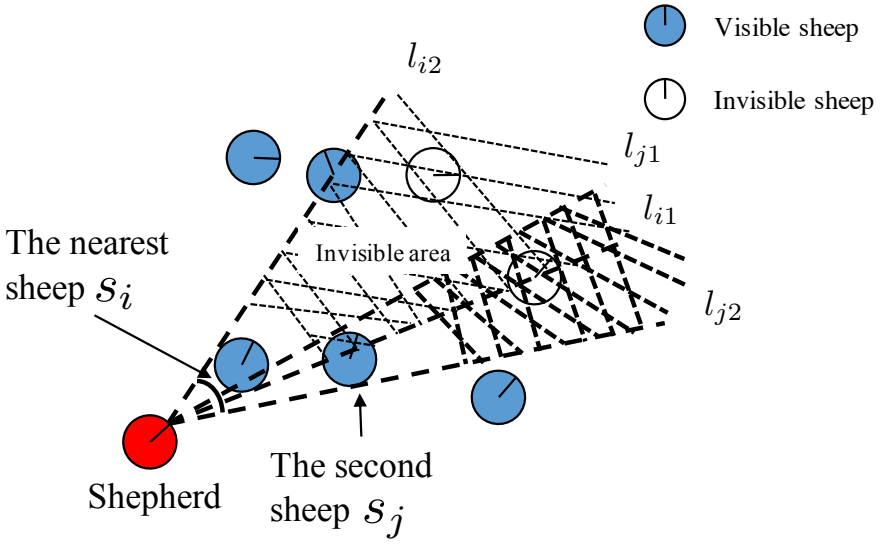
さて，3 つのコントローラにローカルカメラルールを適用する．Fig. 7.9(a) に示すように，中心追跡制御では牧羊犬は見えているヒツジ (図中の青色のヒツジ) の重心を追跡する．牧羊犬の移動ベクトル $u(k)$ は以下の 3 つのベクトルで決定される．重心 C に近づく力 $u_1(k)$，近づきすぎないよう離れる力 $u_2(k)$，ゴールから離れる力 $u_3(k)$ であり，各ベクトルはそれぞれ $u_1(k) = \frac{\vec{DC}}{|\vec{DC}|}, u_2(k) = -\frac{\vec{DC}}{|\vec{DC}|^3}, u_3(k) = -\frac{\vec{DG}}{|\vec{DG}|}$ である．(7.6) 式から，ステップ k における移動ベクトル $u(k)$ はこれらのベクトルの総和で表される．

動的ターゲット切り替え制御については，Fig. 7.9(b)) に示すように，牧羊犬は群れを収集，誘導するために見えるヒツジのサイズに応じてターゲットを切り替える．牧羊犬は群れのサイズが大きくなる，すなわち，牧羊犬が知覚できるヒツジと，見えるヒツジの重心 C との間の最大距離 $d_{farthest}$ が，閾値 $f(N)$ よりも大きい場合，位置 Pc に向かって移動する．また，$d_{farthest}$ が閾値 $f(N)$ よりも小さくなると、位置 Pd に向かって移動する．最後に，牧羊犬は目に見える全てのヒツジが c_0R 内に入ったときに停止する（c_0 は係数)．ステップ k における牧羊犬の移動ベクトル $u(k)$ は，(7.7) 式で与えられる．

最遠個体追跡制御では，Fig. 7.9(c) に示すように，牧羊犬は見えるヒツジの内，ゴールから最遠のヒツジ T_i を選びそれに接近しようとする．移動ベクトル $u(k)$ は以下の 3 つの力により決定する．ターゲットのヒツジ T_i に近づく力，近づきすぎないように離れる力，ゴールから離れる力である．ここで，各ベクトル $u_1(k), u_2(k), u_3(k)$ は $u_1(k) = \frac{\vec{DT_i}}{|\vec{DT_i}|}, u_2(k) =$



(a) Dead angle region generalized by the nearest sheep



(b) Integrated dead angle region created by the first and second nearest sheep

Fig. 7.8: Definition of the invisible area

$-\frac{\vec{DT_i}}{|\vec{DT_i}|^3}, u_3(k) = -\frac{\vec{DG}}{|\vec{DG}|}$ で表現される．ステップ k における移動ベクトル $u(k)$ は，(7.7) 式にあるように，これら 3 つの総和により与えられる．

7.5.2 中心追跡制御の場合

牧羊犬にローカルカメラを設定した場合での中心追跡制御によるヒツジ群の誘導を検証する．ヒツジ同士の斥力ゲイン K_{s_1} を変化させ，50 回のシミュレーションを行った．Table 7.4

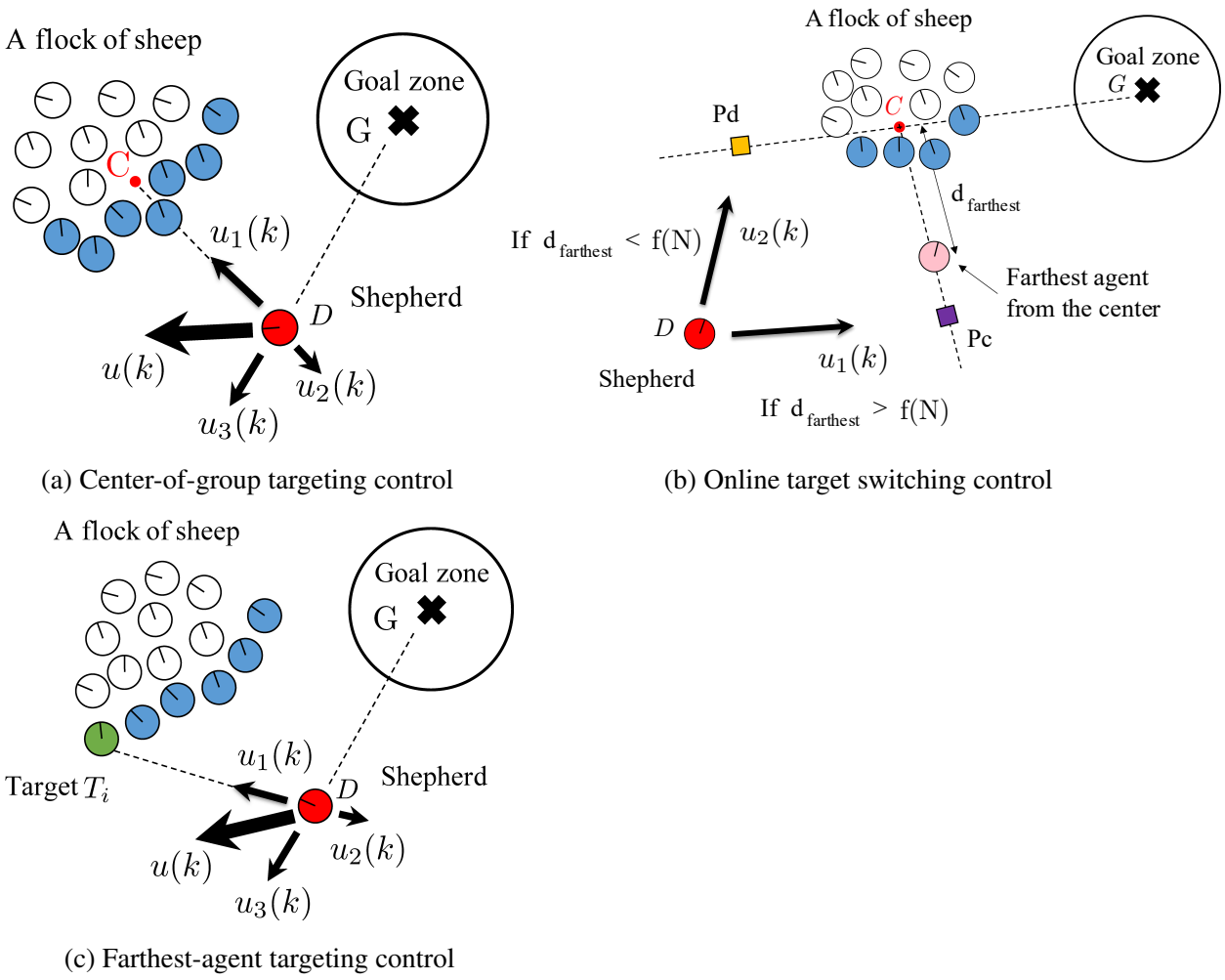


Fig. 7.9: Controllers in consideration of shepherd view

と Table 7.5 にシミュレーション結果を示す．これらから分かるように，K_{s_1} の値が小さい場合，中心追跡制御は誘導に成功する．グローバルカメラを用いた誘導の結果と比較しても，誘導性能はほとんど変化しないことがわかる．

7.5.3 動的ターゲット切り替え制御の場合

動的ターゲット切り替え制御の場合も同様に，ローカルカメラに基づくヒツジ群の誘導を検証する．ヒツジ同士の斥力ゲイン K_{s_1} を変化させ，50 回のシミュレーションを行った．Table 7.4 と Table 7.5 にシミュレーション結果を示す．これらから分かるように，ほとんどのケースで誘導は失敗する．この理由として，ローカルカメラを考慮すると牧羊犬は正確に群

Table 7.4: Simulation results obtained from local-camera-based approach in each controller: Number of navigation successes in 50 trails

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pre.1 : Center-of-group targeting	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0
Pre.2 : Online target switching	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Farthest-agent targeting	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Table 7.5: Simulation results obtained from local-camera based approach in each controller: Average time of navigation in 50 trials

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pre 1. Center-of-group targeting	63.66	64.7	67.78	84.02	-	-	-	-	-
Pre 2. Online target switching	-	490	-	-	-	-	-	-	-
Farthest-agent targeting	70.04	67.04	67.68	68.9	70.22	70.6	71.94	73.6	74.98

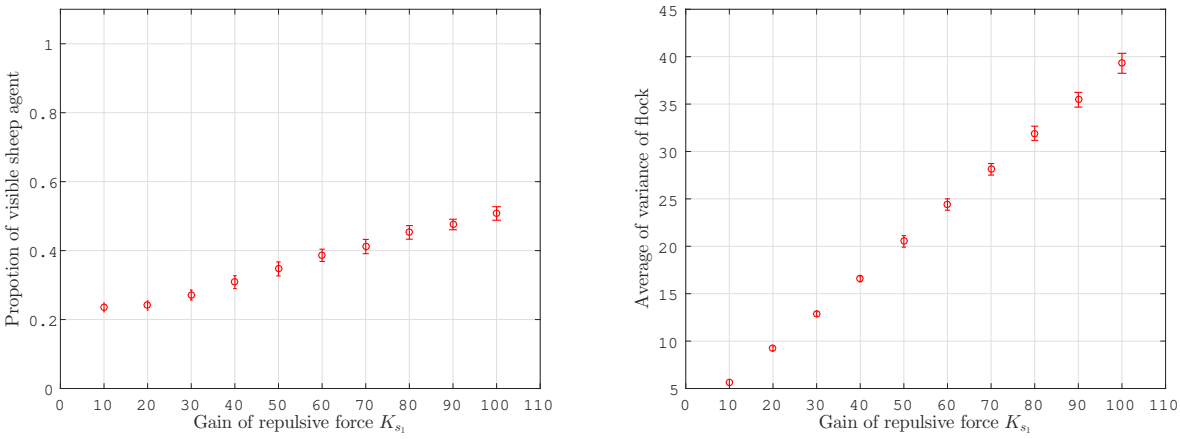
K_{s_1}	100
Pre 1. Center-of-group targeting	-
Pre 2. Online target switching	-
Farthest-agent targeting	78.08

れの重心を知覚することができなくなるため，群れから離れた位置にいるヒツジを追いかけなくなることが挙げられる．

7.5.4 最遠個体追跡制御の場合

Table 7.4 と Table 7.5 に K_{s_1} の値を変えつつ行った 50 回のシミュレーション結果を示す．また，Fig. 7.10(a) に全てのヒツジに対する見えるヒツジの割合のシミュレーション時間の平均値を，Fig. 7.10(b) にヒツジの群れの分散の平均値を示す．

Fig. 7.10(a) から，K_{s_1} の値が増加するに従い，牧羊犬が知覚できるヒツジの数が増えているのがわかる．例えば，$K_{s_1} = 100$ の場合，牧羊犬がシミュレーション中にヒツジの群れの半分も知覚できないにもかかわらず誘導に成功している．その上，Table 7.3 から，グローバルカメラによる誘導の結果と比較してもほぼ同様の誘導性能を示すことがわかる．ヒツジの群れのサイズは K_{s_1} が減少するに従い小さくなる．これにより，牧羊犬が知覚するヒツジの割合が減少する．例えば，$K_{s_1} = 10$ では牧羊犬は全ヒツジの 20% のヒツジを知覚できるのに対し，$K_{s_1} = 100$ では全ヒツジの 50% のヒツジを知覚できる．このことから，最遠個体追跡制御では群れ全体のうち 50% 以下のヒツジしか見えなくても誘導に成功すると結論づけられる．



(a) Proportion of visible sheep

(b) Changes in sheep dispersion

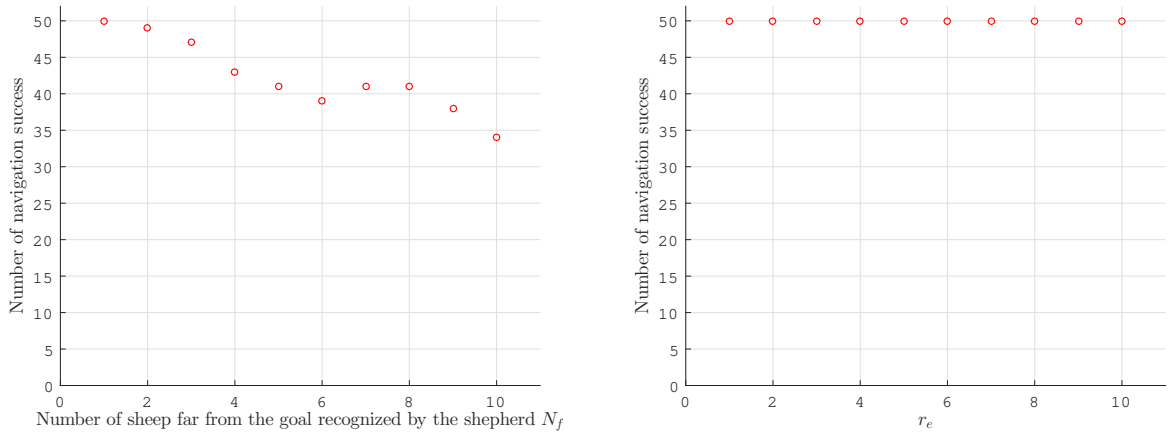
Fig. 7.10: Analysis of situations in local-camera cases for farthest-agent targeting control

7.6 ローカルカメラの精度が誘導に与える影響の解析

この節では，提案した最遠個体追跡制御のロバスト性について議論する．まず，牧羊犬がターゲットのヒツジを見失う場合について解析するために，牧羊犬が常にゴールから最遠のヒツジを選択するのではなく，他のヒツジを選択した場合の誘導効果を検討する．次に，実世界でのカメラ精度を考慮して，ターゲットであるヒツジに位置誤差を加えた場合のナビゲーション性能を検討する．最後に，牧羊犬とヒツジの初期位置がナビゲーション性能に与える影響を分析する．

7.6.1 遠方個体追跡制御の提案

本研究では，提案した最遠個体追跡制御を拡張した，最遠個体から他のターゲットをランダムに選択する制御法を遠方個体追跡制御と称する．各ステップにおいて，牧羊犬は知覚できるヒツジのうち，ゴールから遠い順に N_f 体の中からランダムにターゲットを選択する (最遠個体追跡制御では $N_f = 1$)．さて，N_f の値を変えて 50 回のシミュレーションを行った場合の誘導成功回数を Fig. 7.11(a) に示す．この図から，最遠個体追跡制御は適切に機能し，N_f が大きくなるとナビゲーションが困難になることがわかる．これにより，提案手法は牧羊犬が常にゴールから最遠のヒツジの位置を認識していない場合でも適用できるといえる．



(a) Number of successes in 50 trials based on far-side-agent targeting control

(b) Number of successes in 50 trials based on far-side-agent targeting control with position error

Fig. 7.11: Analysis of the effect of sensor accuracy on Local-camera-based farthrest-agent targeting control

7.6.2 カメラセンサーの精度に関する解析

次に，実世界での牧羊犬のカメラ精度を評価するために，位置誤差を加えてナビゲーション性能を検討する．牧羊犬は見えるヒツジのうち，最遠個体の位置である実際のターゲットの位置 $[x_i, y_i]^{\mathrm{T}}$ に統計的な誤差を加えて与えられる位置 $[\hat{x}_i, \hat{y}_i]^{\mathrm{T}}$ に基づき誘導する．$[\hat{x}_i, \hat{y}_i]^{\mathrm{T}}$ は以下の式で表される．

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + r_e \begin{bmatrix} \cos\theta_{rand} \\ \sin\theta_{rand} \end{bmatrix} \tag{7.10}$$

ここで，r_e は位置に加えられる誤差の最大値を，θ_{rand} は 0 から 2π までの正規分布に従う乱数を意味する．Fig. 7.11(b) に，誤差の最大値 r_e を 1.0 ∼ 10.0 に変化させ，50 回の誘導シミュレーションを行った場合の誘導成功回数を示す．この結果から，牧羊犬が知覚するターゲットの位置に誤差が含まれる場合でも誘導は成功することがわかる．

7.6.3 初期状態が誘導性能に与える影響の解析

最後に，ヒツジの群れと牧羊犬の初期位置関係を変えてナビゲーション性能を解析する．本論文では，3 つの初期状況を設定する．

Table 7.6: Simulation results obtained from global-camera-based approach in farthest-targeting control: Number of navigation successes in 50 trials in regards to patterns of three initial positions

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Case 1 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Case 2 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Case 3 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Table 7.7: Simulation results obtained from global-camera-based approach in farthest-targeting control: Average time of navigation in 50 trials in regards to patterns of three initial positions

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Case 1 :	74.1	70.64	68.46	69.42	70.38	72.94	73.62	75.52	78.18	79.78
Case 2 :	46.38	46.48	47.62	49.32	50.92	51	51.92	53.24	54.38	56.54
Case 3 :	66.02	63.26	62.84	62.78	63.2	63.52	63.98	65.26	66.62	68.2

Table 7.8: Simulation results obtained from local-camera-based approach in farthest-targeting control: Number of navigation successes in 50 trials in regards to patterns of three initial positions

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Case 1 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Case 2 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Case 3 :	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Case1 ゴールゾーンの中心を $[20, 20]^{\mathrm{T}}$, 牧羊犬を $[0, 0]^{\mathrm{T}}$ に置き, ヒツジを半径 10, $[-20, -20]^{\mathrm{T}}$ を中心とした円形のエリアにランダムに配置する.

Case 2 ゴールゾーンの中心を $[0, 0]^{\mathrm{T}}$, 牧羊犬を $[20, 20]^{\mathrm{T}}$ に置き, ヒツジを半径 10, $[-20, -20]^{\mathrm{T}}$ を中心とした円形のエリアにランダムに配置する.

Case 3 ゴールゾーンの中心を $[0, 0]^{\mathrm{T}}$, 牧羊犬を $[-20, -20]^{\mathrm{T}}$ に置き, ヒツジを半径 10, $[-20, -20]^{\mathrm{T}}$ を中心とした円形のエリアにランダムに配置する.

ヒツジの斥力ベクトルのゲイン K_{s_1} を変化させた場合の誘導シミュレーションを行った. Table 7.6 と Table 7.7 にグローバルカメラを用いた場合のシミュレーション結果を示す. また, Table 7.8 及び Table 7.9 にローカルカメラを用いた場合のシミュレーション結果を示す. これらの結果から, 初期状態で牧羊犬がゴールを挟んで群れの反対側に配置されても, 群れの内側に配置されても, 提案手法に基づくナビゲーションが成功していることがわかる.

Table 7.9: Simulation results obtained from local-camera-based approach in farthest-targeting control : Average time of navigation in 50 trials in regards to patterns of three initial positions

K_{s_1}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Case 1 :	71.58	67.8	67.9	68.54	69.88	71.12	71.68	73.42	74.94	78.24
Case 2 :	72.36	68.1	67.2	68.34	69.46	70.9	72.3	73.46	74.74	78.2
Case 3 :	67.04	63.18	62.84	63	62.98	63.12	63.3	64.58	65.98	67.56

7.7 まとめと今後の展望

本論文では，実世界での機動制御則によるエージェント群の誘導の実現を目指し，シミュレーションによる誘導性能の解析を行った．まず，ヒツジ群に対して，最も一般的な群れモデルである Boid モデルを適用し，それに対して 3 つの牧羊犬の誘導コントローラを提示した．1 つ目は伝統的な制御則である，牧羊犬が群れの重心をターゲットとして追跡する中心追跡制御である．2 つ目は，実際のヒツジ追い現象における牧羊犬の一データをもとに提案された，群れのサイズに応じて収集と誘導の 2 つのモードを切り替える動的ターゲット切り替え制御である．そして最後に，機動制御則を応用し，ゴールから最遠のヒツジをターゲットとして追跡する最遠個体追跡制御を提案した．これら 3 つのコントローラに対し，まず牧羊犬が全てのヒツジが知覚できる (グローバルなカメラを有する) 場合の誘導性能を評価した．ヒツジ群の分散度を斥力ゲイン K_{s_1} により調節しつつ，シミュレーション解析を行い，誘導成功回数と誘導時間を求め，それらを比較した．その結果，中心追跡制御と動的ターゲット切り替え制御に関しては，ヒツジの分散度合いが大きくなるにつれて誘導性能が低下することがわかった．それに対して，最遠個体追跡制御では，ヒツジ群の分散度合いが増加してもロバストに誘導することが可能であることがわかった．この原因は，最遠個体追跡制御にヒツジをゴール方向に押し続け最後にまとめるという，収集と誘導の 2 つの機能が埋め込まれているからであった．

次に，牧羊犬のセンシング能力をできるだけ削ぎ落とすことを目的として，実際の牧羊犬の視野に着想を得たローカルカメラに基づくヒツジ群の誘導を提案した．実際の誘導では，牧羊犬はヒツジより背が低く，ヒツジには大きさが存在するため，ヒツジ同士の重なり合いにより手前の羊しか見えていないと想定される．この着想をヒントに，ヒツジがある半径を有する円体と仮定し，牧羊犬からその奥側のヒツジは遮られると設定することで局所的なカメラを有する牧羊犬の誘導を実現した．3 つのコントローラにこの設定を適用し，誘導解析を行った結果，

中心追跡制御ではほとんどグローバルカメラを有する誘導と性能は変化せず，動的ターゲット切り替え制御では，牧羊犬が正確なヒツジの重心を知覚できないため，誘導性能が低くなることが示された．一方で，最遠個体追跡制御では牧羊犬は一部のヒツジしか知覚できないのにもかかわらず，誘導性能は非常に高いことがわかった．

最後に，最遠個体追跡制御に基づく誘導において，牧羊犬のカメラのセンサ精度，および各エージェントの初期状態が誘導に与える影響を解析した．1 つ目に，ターゲットのヒツジを，見えるヒツジのうちゴールから最遠の個体ではない場合に誘導が成功するかを検証した．牧羊犬は知覚できるヒツジのうち，ゴールから遠い順に N_f 体の中からランダムにターゲットを選択する制御を遠方個体追跡制御と称し，解析を行った結果，常に最遠個体を追跡せずとも，誘導できるケースもあることがわかった．2 つ目に，ターゲットの位置に誤差が存在する場合の解析を行った結果，誤差が大きい場合でも誘導が成功することも示された．3 つ目に，ヒツジと牧羊犬の初期状態を，(1) 牧羊犬がゴールとヒツジの群れの中間に位置する場合，(2) 牧羊犬がゴールを挟んでヒツジの群れの逆側にある場合，(3) 牧羊犬がヒツジ群の中にいる場合．の 3 ケースの誘導を行った．結果，どのケースにおいてもロバストに誘導可能であることが示された．

今後は，シープドッグシステムをよりシンプルに実機実現するために，最小限の機能で群れを形成するヒツジロボットのモデリングに取り組む予定である．また，ヒツジ同士の相互作用を廃した群れないヒツジや，自律走行性を有する走り回るヒツジ群に対して，誘導が可能な牧羊犬のコントローラ設計にも注力していく．速度の大きいヒツジを誘導可能であることは，群システムを実際の現場で効率よく運用することができることを意味している．そのようなヒツジ群を誘導するために必要な牧羊犬の機動性と，牧羊犬の数のバランスを明らかにし，システム設計論の構築を目指していく．

第 8 章　結言

8.1　本論文の目的と結果

アリや魚などの群れをなす生物は，過酷な自然環境にうまく適応しながら，しなやかに，かつタフに生き抜いている．本研究の最終目標は，そのような群れをなす生物に負けないほどの，未知環境に対するリアルタイム適応性を有する群ロボットシステムの制御系設計論を構築することである．この目標を達成するために，筆者はロボット自らがシステムを所望の状態に導くための「場」を環境に対して創出・制御し，ロボットに設計された制御則と「場」との相互作用を最大限に生かすアプローチを提案した．本博士論文は，最終目標への第一歩として，多数のエージェント群に直接与えられる陽的な制御則と，エージェント群同士の相互作用が創成する「場」とが絶妙に絡み合うことで，システム全体として自然に制御目的が達成されるような制御を**「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導**と称し，エージェント群の誘導問題に対して各エージェントの制御則および「場」の設計・制御法の構築に取り組むことで，提案する誘導システムの設計論を見出すことを目指した．

第 3 章ではまず，「音場」の制御に基づくロボットの陰的誘導を扱った．ロボットをある目的地へ誘導するという最も基本的な誘導問題に対して，我々が意図的に設計する音場と，それに従い移動するロボットとの設計・制御法を 2 種類提案し，実機実験によりその妥当性を示した．一つ目は，音の強さを仮想的なポテンシャル場としてそれに沿って移動するロボットを製作し，それに対して複数の同質な音場を配置し，音場の位置を空・時間的に制御することで，移動ロボットの陰的ルート誘導を行った．二つ目は，同様の誘導問題に対して，音の強さのみをセンシングできるロボットを想定し，センシング感度を自律的に制御することでポテンシャル場の頂点へ誘導されるロボットを製作した．さらに，このロボットに対して，ロボットの初期位置から目的地まで 4 つの異なる音場を空間に固定することで，音場トレールによる陰的誘

導を行った．これら 2 つの誘導実験から，陰的誘導システムにおいてロボットに与える制御器と音場との設計・制御法には自由度が存在し，それらの性能のバランスによりシステムの安定性や収束性が変化することを明らかにした．

第 5-7 章では，第 3 章で得た知見をもとに，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導システムの構築に取り組んだ．このシステムは，第 3 章で述べた誘導システムの「場」を，制御対象とは異なるヘテロなエージェントとして扱い，陽的に制御される「場」と，多数のエージェント群が生成する「場」との相互作用を活かした陰的誘導システムである．第 5 章では，過去羽尻らにより提案された牧羊犬の機動制御則によるエージェント群の誘導システムをヒントにシステム設計を行った．本論文では，1 体の牧羊犬が，多数のヒツジをあるゴールエリアに囲い込み誘導する問題に対して，実際のヒツジと牧羊犬の振る舞いをヒントにヒツジと牧羊犬の制御則を構築した．続いて，ヒツジ 1 体と牧羊犬 1 体の 2 体の誘導システムに対して非線形力学に基づく安定性解析を行った．その結果，システムの平衡点が存在し，かつ誘導が収束するシステムのゲインの条件を明らかに，それをもとにヒツジ 1 体の誘導における牧羊犬の機動制御則の設計法を示した．また，牧羊犬の機動性に応じてヒツジの収束範囲を拡大・縮小することが可能なシステムであることを見出した．

第 6 章では，第 5 章の結果をもとに，機動制御則を用いた複数のヒツジの陰的誘導に着手した．この章では，機動制御則に基づく 1 体の牧羊犬が n 体のヒツジ群の重心をターゲットとして誘導を行い，ヒツジ群をゴールの周辺へ誘導するシステムを提示した．筆者は，ヒツジ同士の相互作用を，群れ全体が安定した円形のフォーメーションをなすように設計すれば，ヒツジ群を「ヒツジの中心 (重心) に位置する 1 体のヒツジ」と近似でき，ヒツジ 1 体の誘導における機動制御則の設計法を適用可能となると考えた．この考えに基づいて，ヒツジ群をある群れ半径を有する一つの円板体とみなし，重心と牧羊犬の収束距離をヒツジの群れ半径より大きくなるような条件を，第 5 章で示した機動制御則の設計法に追加することで，1 体のヒツジの誘導と同様の制御構造を用いて誘導できることをシミュレーションと実機検証を通して示した．

第 7 章では，第 5 章で設計した牧羊犬の機動制御則に基づいて，分散度の高い散らばるヒツジ群の誘導に取り組んだ．ヒツジの群れモデルとしては，周囲の個体の位置に基づいて自律的に行動を決定する Boid モデルを適用した．それに対する牧羊犬の誘導コントローラとして，第 6 章で述べた機動制御則を応用し，ゴールから最も遠いヒツジをターゲットとして追跡する

最遠個体追跡制御を提案した．この制御則と，過去提案された中心追跡制御，実際の牧羊犬とヒツジの誘導をもとにモデリングされた動的ターゲット切り替え制御との，3 つのコントローラによる分散度の異なるヒツジ群に対する誘導を行い，誘導性能の評価を行った．結果，中心追跡制御と動的ターゲット切り替え制御は，散らばるヒツジの誘導は難しく，最遠個体追跡制御はヒツジの分散度に対してロバストに誘導することが可能であることがわかった．次に，システムの工学的応用を見据えて，牧羊犬の認識するヒツジの位置情報を削減するために牧羊犬のローカルな視野範囲に着想を得たローカルカメラを導入した．ヒツジ群を，サイズをもつ円体と設定し，ヒツジ同士の重なり合いによる死角を牧羊犬に与え統計的解析を行うことで誘導性能への影響を明らかにした．結果，最遠個体追跡制御は牧羊犬の視野を制限しても，高い誘導性能を保持することがわかった．また，牧羊犬のターゲット位置に誤差がある場合にも，ロバストに誘導できることも明らかになった．

ここで，第 5-7 章までの結果をまとめよう．Fig. 8.1 に示すように，本博士論文では，少数の設計可能なコントローラエージェントを用いて多数のエージェント群をある決められたゴールへ誘導する問題に対し，複数のエージェントが創り出す誘導に対し陰的な「場」の特性 (ここではエージェント群の分散度) と，我々が陽的に設計可能な「場」を創るコントローラエージェント (牧羊犬) の機動性と群れのどこへ刺激を与えるかという適応性とのバランスを明らかにしたといえる．ヒツジ同士が全て連結され，ほぼ剛体のようにみなせる場合は，重心にいる 1 体のヒツジとしてみなし，1 体の誘導における制御則がそのまま適用できる．そして，分散制御されたヒツジ群の誘導では，ヒツジ群の群度合いが高ければ，牧羊犬は群れの外縁部だけ見て，その重心を押せば十分である．そこからヒツジ群の分散度を上げていくと，重心ではなくゴールから遠い個体を素早く追跡する必要がある．このことから，誘導において群れるヒツジの「ツボ」は「群れの重心」であり，分散するヒツジの「ツボ」は「ゴールから最遠の個体」であると解釈でき，牧羊犬がその点をターゲットとして追い立てるだけで，自然と群れ全体を誘導することが可能となるといえる．そして，牧羊犬という陽的に制御された「場」と，ヒツジ同士，および牧羊犬との相互作用により生じる，「ヒツジ同士が群れる」という陰的な作用とのバランスをうまく設計することが，自然な誘導を実現するためには重要であると結論づけられる．

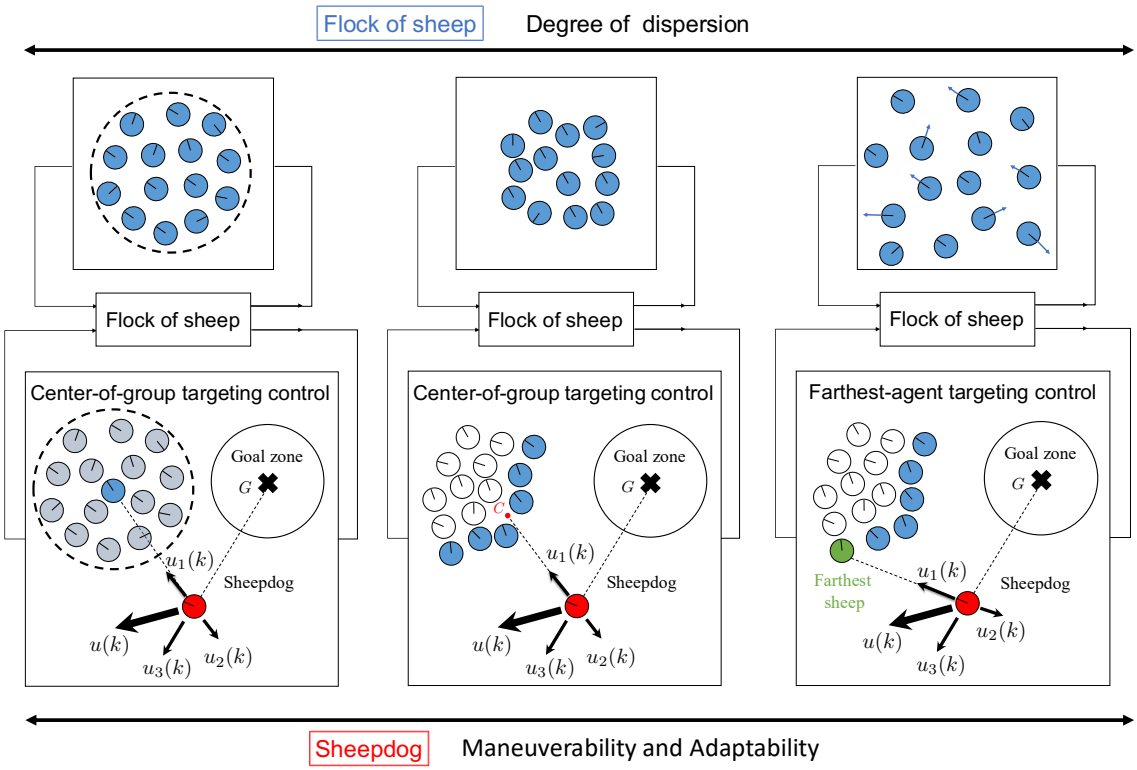


Fig. 8.1: Summary of the contents in section 5-7

8.2 まとめと今後の展望

最後に，本論文の主要な結果と意義をまとめ，今後の展望を述べて本博士論文を締めることとする．本博士論文の結果から，我々が陽的に設計・制御する「場」の機能性 (本論文では機動性や適応性を意味する) は，被制御対象であるエージェント群に与える特性に応じて変化すべきであり，それらのバランスを巧みに設計することで，シンプルな制御によるエージェント群の適応的な誘導を実現できることが示唆された．環境に対し適応的に振舞う人工物を設計するためには，陰陽制御のバランスが重要である，ということはすでに文献 [17] で示唆されていた．しかし，実際の人工物で陰陽制御のバランスの重要性を実証・議論した研究はいまだに少なく，本論文はその足掛かり的な結果であると言えるだろう．また，今までの研究では，1 個体と環境との相互作用をどううまく設計するかに主眼が置かれていたが，本論文では複数個体と「場」(環境) との相互作用について扱っている．この場合，ある個体にとって，周囲にい

る他のエージェントも全て環境とみなすことができる．つまり，A，B，C という個体を考えると，A にとって，B，C は「場」になり得る上に，B にとっては A，C も「場」になり得るということである．大須賀は文献 [14] においてこの現象を「複数個体間の陰陽制御則のネットワーク」と表現している．このような概念は，人間社会や経済システム，インターネット，エネルギーネットワークなどの大規模システムを運用するにあたり，適切な陽的分散制御則を設計する重要な指針となると考えられる．加えて，本論文で提案した，少数のある種中枢のような働きを担うコントローラエージェントを用いて，自律分散的に制御されたロボット群を誘導する制御方式は，群ロボットシステムの制御において非常に新規性が高い．この方式を今後発展し，中枢系と自律分散系とをうまく複合した新たな階層制御型群ロボットシステムを構築することができると考えられる．さらに本論文では，実際の牧羊犬のヒツジ追いの振る舞いをヒントにシステムをモデリングし，定性的ではあるが実際の誘導に近しい挙動を再現できている．この結果は，生物の動作を理解する手法である構成論的アプローチに即しており，非自明な生物の振る舞いの謎を解き明かす一助になると言える．

さて，今後の研究では，音だけでなく，光や熱，匂い，磁場といったさまざまな物理メディアを用いて「場」に基づく陰的誘導に取り組み，様々な物理メディアに通底する「場」の制御に基づくロボット群の制御系設計論の構築を目指していく．本研究で扱った音を例にとると，音の回折現象を利用して，壁で遮られたロボット群を誘導するなど，物理メディアの持つ物理的特性を生かした誘導に取り組む予定である．このような実験を通して物理メディアの特性を活かした「場」の創成・制御法の設計論を構築することは，さまざまな未知環境へ適用可能な「場」の制御に基づく群ロボットシステムの実現につながるといえる．

また，牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導に関しては，現実世界での実現可能性と工学的応用にフォーカスし研究を続けていく．今までの研究では，ヒツジ同士に群れモデルを適用していたが，ヒツジの台数が千台，万台規模に増加するとシステム設計が大変複雑になることが容易に想像できる．そこで，ヒツジ同士の相互作用を廃し，牧羊犬から反射的に逃避するヒツジを設計することでマイコンレスなエージェント群の誘導に取り組む予定である．また，牧羊犬から逃げるばかりでなく，直進性の高いヒツジや，そもそも群れモデルを適用していないヒツジの群れを誘導するのに必要な牧羊犬の数や機動性の上限の関係を明らかにしていきたい．

最後に，最も重要なことは，提案した制御法が実際の未知環境で有効なのかを実機検証することに尽きる．そこで重要となるのが群ロボットシステムの特徴である「冗長性」であると考えている．一台のロボットの踏破性を向上する試みは長年多くの研究者により行われてきており，近年では実際の未知環境を踏破可能な自律移動ロボットも登場してきている．しかし，不遜を承知で述べるなら，全ての未知環境を踏破できるロボットを製作するのはほぼ不可能であり，やはりタスク達成のために「数の利」，つまり群システムの冗長性に頼る必要が生じてくると考えられる．その場合，未知環境を群ロボットシステムが踏破していくために，幾つかのロボットは犠牲となりつつも「場」となり，他のロボットの移動に貢献する，本論文の制御方式が生きてくるだろう．筆者はこの考えを胸に，今後も研究活動に邁進していく所存である．

謝辞

大須賀公一教授には，指導教官として本研究の実施の機会を与えて頂き，その遂行にあたって終始ご指導を頂きました．ここに深謝の意を表します．石川将人教授，並びに，東森充教授には，副査としてご助言を頂くとともに，本論文の細部にわたりご指導を頂きました．ここに深謝の意を表します．杉本靖博准教授には，計算機関連のご助言をはじめ，研究に関する数多くの有益なご指摘を頂き，研究活動を支援して頂きました．末岡裕一郎助教には，研究に対する心構えから，研究方針まで全面的にご指導して頂き，筆者が研究の道に進もうと決意するきっかけをくださいました．和田光代特任准教授には，論文の執筆の仕方について一からご教示頂き，筆者の論文の添削をして頂きました．諸先生方に心より深く感謝申し上げます．

また，東北大学石黒章夫教授，広島大学小林亮教授，北海道大学青沼仁志准教授，東北大学加納剛史准教授には，学会やシンポジウム等様々な機会において貴重なご助言を頂きました．心より厚く御礼申し上げます．

研究を進めるにあたり活発な議論を交わし，長い研究室生活において支えてくれた大須賀・杉本研究室，石川・南研究室の学生の皆様には心から感謝申し上げます．また，筆者が学部時代から数々のご助言を賜りました，北海道大学浪花啓右学術研究員，松江高専中西大輔助教，コマツみらい建機協働研究所浦大介特任助教，同研究所 Mak Kwan Wai 特任助教には深く感謝申し上げます．

最後に，筆者の研究生活を支えてくれた父優生，母薫，弟啓太郎に厚く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Gordon D. *Ants at work*. The Free Press, 1999.

[2] Hansell M. *Built by Animals : The Natural History of Animal Architecture*. Oxford University Press, USA, 2009.

[3] 井上徹志. シロアリの生態. 化学と生物, Vol. 39, No. 5, pp. 326–332, 2001.

[4] 高橋伸弥, 井手翔太, 鶴田直之, 藍浩之. ミツバチ歩行軌跡の複数個体同時追跡アルゴリズムを用いた尻振りダンス軌跡の抽出. 人工知能学会全国大会論文集 第 29 回全国大会 (2015), pp. 1M54–1M54. 一般社団法人 人工知能学会, 2015.

[5] 益田玲爾. 1. 魚類の群れ行動の個体発生: 反射の連鎖から社会の形成まで. 日本水産学会誌, Vol. 77, No. 1, pp. 117–117, 2011.

[6] 早川美徳. 鳥の群れの動態解析と数理モデル. 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 207–212, 2013.

[7] ギュスターヴ・ル・ボン, 桜井成夫. 群衆心理. 講談社, 1993.

[8] 太田順. 適応的行動と協調の発現原理. 計測と制御, Vol. 44, No. 9, pp. 628–633, 2005.

[9] 倉林大輔. 群の知的振る舞いに見る行動決定規範. 計測と制御, Vol. 46, No. 11, pp. 829–834, 2007.

[10] 久保正男. スワームロボティクスの実践的課題. 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 258–263, 2013.

[11] 大倉和博. スワーム: 群れの創発的挙動生成. 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 179–182, 2013.

[12] 小林亮. 環境を友とする制御法の創成. システム/制御/情報, Vol. 63, No. 6, pp. 218–222, 2019.

[13] 高草木薫, 淺間一. 移動知: 行動からの知能理解-構成論的観点と生物学的観点から. 計測と制御, Vol. 44, No. 9, pp. 580–589, 2005.

[14] 大須賀公一. 知能はどこから生まれるのか? 近代科学社, 2018.

[15] 杉本靖博, 吉岡秀隆, 大須賀公一. 超多脚型受動的動歩行の実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 8, pp. 961–969, 2010.

[16] Dai Owaki, Takeshi Kano, Ko Nagasawa, Atsushi Tero, and Akio Ishiguro. Simple robot suggests physical interlimb communication is essential for quadruped walking. *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 10, No. 78, p. 20120669, 2013.

[17] 大須賀公一. i-centipot で知の源泉を捕まえる. システム/制御/情報, Vol. 63, No. 6, pp. 240–245, 2019.

[18] 末岡裕一郎, 北卓人, 石川将人, 杉本靖博, 大須賀公一. シープドッグシステムにおける誘導制御と性能解析: 離散解析によるアプローチ. 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 809, pp. DR0014–DR0014, 2014.

[19] 東俊一, 田淵絢子, 杉江俊治. 牧羊犬制御のモデル化. 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 12, pp. 882–888, 2012.

[20] 松野文俊, 花本惣平. アリの行動シミュレータ構築と生態の理解. 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 227–233, 2013.

[21] Nigel R Franks, Ana B Sendova-Franks, and Carl Anderson. Division of labour within teams of new world and old world army ants. *Animal Behaviour*, Vol. 62, No. 4, pp. 635–642, 2001.

[22] Carl Anderson, Guy Theraulaz, and J-L Deneubourg. Self-assemblages in insect societies. *Insectes sociaux*, Vol. 49, No. 2, pp. 99–110, 2002.

[23] 松野文俊. 群行動の理解と群ロボット研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 6, pp. 428–431, 2017.

[24] 新地辰朗, 西村治彦, 北添徹郎ほか. 魚行動モデルによる群行動パターンのフラクタル性評価. 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1592–1600, 2001.

[25] 青木一郎. A simulation study on the schooling mechanism in fish. 日本水産学会誌, Vol. 48, No. 8, pp. 1081–1088, 1982.

[26] Naohiko Shimoyama, Ken Sugawara, Tsuyoshi Mizuguchi, Yoshinori Hayakawa, and Masaki Sano. Collective motion in a system of motile elements. *Physical Review Letters*, Vol. 76, No. 20, p. 3870, 1996.

[27] Andreas Huth and Christian Wissel. The simulation of fish schools in comparison with experimental data. *Ecological modelling*, Vol. 75, pp. 135–146, 1994.

[28] Charlotte K Hemelrijk and Hanno Hildenbrandt. Self-organized shape and frontal density of fish schools. *Ethology*, Vol. 114, No. 3, pp. 245–254, 2008.

[29] I. D. Couzin, C. C. Ioannou, G. Demirel, T. Gross, C. J. Torney, A. Hartnett, L. Conradt, S. A. Levin, and N. E. Leonard. Uninformed individuals promote democratic consensus in animal groups. *science*, Vol. 334, No. 6062, pp. 1578–1580, 2011.

[30] Y. Katz, K. Tunstrøm, C. C. Ioannou, C. Huepe, and I. D. Couzin. Inferring the structure and dynamics of interactions in schooling fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 108, No. 46, pp. 18720–18725, 2011.

[31] W. L. Romey. Individual differences make a difference in the trajectories of simulated schools of fish. *Ecological Modelling*, Vol. 92, No. 1, pp. 65–77, 1996.

[32] H. Hildenbrandt, C. Carere, and C. K. Hemelrijk. Self-organized aerial displays of thousands of starlings: a model. *Behavioral Ecology*, Vol. 21, No. 6, pp. 1349–1359, 2010.

[33] C. W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 25–34, 1987.

[34] M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardina, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, M. Viale, et al. Empirical investigation of starling flocks: a benchmark study in collective animal behaviour. *Animal behaviour*, Vol. 76, No. 1, pp. 201–215, 2008.

[35] M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardina, V. Lecomte, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study. *Proceedings of the national academy of sciences*, Vol. 105, No. 4, pp. 1232–1237, 2008.

[36] A. Cavagna, A. Cimarelli, I. Giardina, G. Parisi, R. Santagati, F. Stefanini, and M. Viale.

Scale-free correlations in starling flocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, No. 26, pp. 11865–11870, 2010.

[37] E. Şahin. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. In *International workshop on swarm robotics*, pp. 10–20. Springer, 2004.

[38] Marco Dorigo, Elio Tuci, Roderich Groß, Vito Trianni, Thomas Halva Labella, Shervin Nouyan, Christos Ampatzis, Jean-Louis Deneubourg, Gianluca Baldassarre, Stefano Nolfi, et al. The swarm-bots project. In *International Workshop on Swarm Robotics*, pp. 31–44. Springer, 2004.

[39] Marco Dorigo, Dario Floreano, Luca Maria Gambardella, Francesco Mondada, Stefano Nolfi, Tarek Baaboura, Mauro Birattari, Michael Bonani, Manuele Brambilla, Arne Brutschy, et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 20, No. 4, pp. 60–71, 2013.

[40] Roderich Groß, Michael Bonani, Francesco Mondada, and Marco Dorigo. Autonomous self-assembly in swarm-bots. *IEEE transactions on robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1115–1130, 2006.

[41] Nithin Mathews, Anders Lyhne Christensen, Rehan O'Grady, and Marco Dorigo. Spatially targeted communication and self-assembly. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2678–2679. IEEE, 2012.

[42] M. Rubenstein, C. Ahler, N. Hoff, A. Cabrera, and R. Nagpal. Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 7, pp. 966–975, 2014.

[43] Kirstin Hagelskjaer Petersen, Radhika Nagpal, and Justin K Werfel. Termes: An autonomous robotic system for three-dimensional collective construction. *Robotics: science and systems VII*, 2011.

[44] Vishal Sharma and Rajesh Kumar. A cooperative network framework for multi-uav guided ground ad hoc networks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 77, No. 3-4, pp. 629–652, 2015.

[45] 滑川徹. マルチエージェントシステムにおけるダイナミクスと合意協調制御. 計測と制

御, Vol. 52, No. 3, pp. 264–270, 2013.

[46] 川上裕樹, 滑川徹. ビークル群によるネットワークの変化に依存しない協調取り囲み行動. 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 12, pp. 688–695, 2009.

[47] Tae-Hyoung Kim and Toshiharu Sugie. Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy. *Automatica*, Vol. 43, No. 8, pp. 1426–1431, 2007.

[48] 東俊一. マルチエージェントシステムの制御: V 被覆制御. システム/制御/情報, Vol. 58, No. 1, pp. 36–44, 2014.

[49] Hongxing Wei, Youdong Chen, Jindong Tan, and Tianmiao Wang. Sambot: A self-assembly modular robot system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4, No. 16, pp. 745–757, 2011.

[50] Lucian Cucu, Mike Rubenstein, and Radhika Nagpal. Towards self-assembled structures with mobile climbing robots. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1955–1961. IEEE, 2015.

[51] Takeshi Kano, Ryo Yoshizawa, and Akio Ishiguro. Tegotae-based control scheme for snake-like robots that enables scaffold-based locomotion. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, pp. 454–458. Springer, 2016.

[52] Takahide Sato, Takeshi Kano, and Akio Ishiguro. A snake-like robot driven by a decentralized control that enables both phasic and tonic control. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1881–1886. IEEE, 2011.

[53] 藤澤隆介, 土畑重人, 菅原研. 場を改変することでコミュニケーションするロボット群. 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 252–257, 2013.

[54] Luc Steels. Cooperation between distributed agents through self-organisation. In *EEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*, pp. 8–14. IEEE, 1990.

[55] Jean-Louis Deneubourg, Simon Goss, Nigel Franks, Ana Sendova-Franks, Claire Detrain, and Laeticia Chrétien. The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots. In *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats*, pp. 356–363. MIT press, 1991.

[56] Ralph Beckers, Owen E Holland, and Jean-Louis Deneubourg. Fom local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics. In *Prerational Intelligence: Adaptive Behavior and Intelligent Systems Without Symbols and Logic, Volume 1, Volume 2 Prerational Intelligence: Interdisciplinary Perspectives on the Behavior of Natural and Artificial Systems, Volume 3*, pp. 1008–1022. Springer, 2000.

[57] Nils Napp, Olive R Rappoli, Jessica M Wu, and Radhika Nagpal. Materials and mechanisms for amorphous robotic construction. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4879–4885. IEEE, 2012.

[58] Ken Sugawara, Yohei Doi, and Miki Shishido. Casualty-based cooperation in swarm robots. *Artificial Life and Robotics*, Vol. 23, No. 4, pp. 645–650, 2018.

[59] Ken Sugawara, Toshiya Kazama, and Toshinori Watanabe. Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)*, Vol. 3, pp. 3074–3079. IEEE, 2004.

[60] Simon Garnier, Faben Tache, Maud Combe, Anne Grimal, and Guy Theraulaz. Alice in pheromone land: An experimental setup for the study of ant-like robots. In *2007 IEEE swarm intelligence symposium*, pp. 37–44. IEEE, 2007.

[61] Enyu Luo, Xin Hui Fang, Yuting Ng, and Grace Xingxin Gao. Shinerbot: Bio-inspired collective robot swarm navigation platform. In *Proc. Institute of Navigation GNSS+ conference (ION GNSS+ 2016)*, 2016.

[62] R Andrew Russell. Heat trails as short-lived navigational markers for mobile robots. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3534–3539. IEEE, 1997.

[63] Ryusuke Fujisawa, Hikaru Imamura, Takashi Hashimoto, and Fumitoshi Matsuno. Communication using pheromone field for multiple robots. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1391–1396. IEEE, 2008.

[64] Ryusuke Fujisawa, Shigeto Dobata, Daisuke Kubota, Hikaru Imamura, and Fumitoshi Matsuno. Dependency by concentration of pheromone trail for multiple robots. In *International*

Conference on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, pp. 283–290. Springer, 2008.

[65] 大須賀公一, 石黒章夫, 鄭心知, 杉本靖博, 大脇大. 制御系に埋め込まれた陰的制御則が適応機能の鍵を握る!? 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 491–502, 2010.

[66] TG Brown. Decerebrate cat movie, 1939. *Video: The Basal Ganglia and Brainstem Locomotor Control*, 1989.

[67] 大須賀公一, 桐原謙一. 受動的歩行ロボット quartet ii の歩行解析と歩行実験. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 737–742, 2000.

[68] 杉本靖博, 大須賀公一. 受動的動歩行の安定性に関する一考察. システム制御情報学会論文誌, Vol. 18, No. 7, pp. 255–260, 2005.

[69] 坂東麻衣, 大須賀公一, 藤井隆雄, 山川宏. 円制限三体問題のラグランジュポイントの安定性に関する陰的制御的考察. 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 7, pp. 431–440, 2012.

[70] Rolf Pfeifer and Christian Scheier. *Understanding intelligence*. MIT press, 2001.

[71] 末岡裕一郎, 北卓人, 石川将人, 杉本靖博, 大須賀公一. 自律分散ロボット群による障害物クラスタ形成の解析と制御. 日本機械学会論文集Ｃ編, Vol. 79, No. 801, pp. 1718–1727, 2013.

[72] Yoichi Masuda, Keisuke Naniwa, Masato Ishikawa, and Koichi Osuka. Weak actuators generate adaptive animal gaits without a brain. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 2638–2645. IEEE, 2017.

[73] 羽尻皓一, 大須賀公一, 石川将人. 群移動体の制御における機動的制御について. 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2011, pp. 327–328, 2011.

[74] 角田祐輔, 末岡裕一郎, 和田光代, 大須賀公一. 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の機動制御に関する研究. システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, Vol. 64, pp. 799–806, 2020.

[75] Nathan K Long, Karl Sammut, Daniel Sgarioto, Matthew Garratt, and Hussein A Abbass. A comprehensive review of shepherding as a bio-inspired swarm-robotics guidance approach. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2020.

[76] Richard Vaughan, Neil Sumpter, Andy Frost, and Stephen Cameron. Robot sheepdog

project achieves automatic flock control. In *Proc. Fifth International Conference on the Simulation of Adaptive Behaviour*, Vol. 489, p. 493. 493, 489, 1998.

[77] Richard Vaughan, Neil Sumpter, Jane Henderson, Andy Frost, and Stephen Cameron. Experiments in automatic flock control. *Robotics and autonomous systems*, Vol. 31, No. 1-2, pp. 109–117, 2000.

[78] Neil Sumpter, Andrew J Bulpitt, Richard T Vaughan, Robin D Tillett, and Roger D Boyle. Learning models of animal behaviour for a robotic sheepdog. In *MVA*, pp. 577–580, 1998.

[79] A. Schultz and J. Grefenstette. Robo-shepherd: Learning complex robotic behaviors. 1996.

[80] Jyh-Ming Lien, O Burchan Bayazit, Ross T Sowell, Samuel Rodriguez, and Nancy M Amato. Shepherding behaviors. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, Vol. 4, pp. 4159–4164. IEEE, 2004.

[81] J. M. Lien, S. Rodriguez, J. P. Malric, and N. M. Amato. Shepherding behaviors with multiple shepherds. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pp. 3402–3407. IEEE, 2005.

[82] T. Miki and T. Nakamura. An effective simple shepherding algorithm suitable for implementation to a multi-mmobile robot system. In *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC'06)*, Vol. 3, pp. 161–165, 2006.

[83] Joseph F Harrison, Christopher Vo, and Jyh-Ming Lien. Scalable and robust shepherding via deformable shapes. In *International Conference on Motion in Games*, pp. 218–229. Springer, 2010.

[84] Brandon Bennett and Matthew Trafankowski. A comparative investigation of herding algorithms. In *Proc. Symp. on Understanding and Modelling Collective Phenomena (UMoCoP)*, pp. 33–38, 2012.

[85] D. Strömbom, R. P. Mann, A. M. Wilson, S. Hailes, A. J. Morton, D. J. Sumpter, and A. J. King. Solving the shepherding problem: heuristics for herding autonomous, interacting agents. *Journal of the royal society interface*, Vol. 11, No. 100, p. 20140719, 2014.

[86] Hiroyuki Hoshi, Ichiro Iimura, Shigeru Nakayama, Yoshifumi Moriyama, and Ken

Ishibashi. Robustness of herding algorithm with a single shepherd regarding agents' moving speeds. *Journal of Signal Processing*, Vol. 22, No. 6, pp. 327–335, 2018.

[87] Kaoru Fujioka and Sakiko Hayashi. Effective shepherding behaviours using multi-agent systems. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pp. 3179–3182. IEEE, 2016.

[88] Kaoru Fujioka. Effective herding in shepherding problem in v-formation control. *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 21–27, 2018.

[89] Alyssa Pierson and Mac Schwager. Bio-inspired non-cooperative multi-robot herding. In *ICRA*, pp. 1843–1849. Citeseer, 2015.

[90] Alyssa Pierson and Mac Schwager. Controlling noncooperative herds with robotic herders. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 2, pp. 517–525, 2017.

[91] Luiz Chaimowicz and Vijay Kumar. Aerial shepherds: Coordination among uavs and swarms of robots. In *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, pp. 243–252. Springer, 2007.

[92] Anil Özdemir, Melvin Gauci, and Roderich Groß. Shepherding with robots that do not compute. In *Artificial Life Conference Proceedings 14*, pp. 332–339. MIT Press, 2017.

[93] Y. Sueoka, M. Ishitani, and K. Osuka. Analysis of sheepdog-type robot navigation for goal-lost-situation. *Robotics*, Vol. 7, No. 2, p. 21, 2018.

[94] Mark Evered, Peter Burling, Mark Trotter, et al. An investigation of predator response in robotic herding of sheep. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, Vol. 63, pp. 49–54, 2014.

[95] Shripad Gade, Aditya A Paranjape, and Soon-Jo Chung. Herding a flock of birds approaching an airport using an unmanned aerial vehicle. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, p. 1540, 2015.

[96] Shripad Gade, Aditya A Paranjape, and Soon-Jo Chung. Robotic herding using wavefront algorithm: Performance and stability. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, p. 1378, 2016.

[97] Aditya A Paranjape, Soon-Jo Chung, Kyunam Kim, and David Hyunchul Shim. Robotic

herding of a flock of birds using an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 4, pp. 901–915, 2018.

[98] Byambasuren Bat-Erdene and Oyun-Erdene Mandakh. Shepherding algorithm of multi-mobile robot system. In *2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, pp. 358–361. IEEE, 2017.

[99] Alexander Gee and Hussein Abbass. Transparent machine education of neural networks for swarm shepherding using curriculum design. In *2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pp. 1–8. IEEE, 2019.

[100] Hung Nguyen, Matthew Garratt, and Hussein Abbass. Apprenticeship bootstrapping. In *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pp. 1–8. IEEE, 2018.

[101] Hung The Nguyen, Matthew Garratt, Lam Thu Bui, and Hussein Abbass. Apprenticeship bootstrapping: inverse reinforcement learning in a multi-skill uav-ugv coordination task. In *Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, pp. 2204–2206, 2018.

[102] Hung T Nguyen, Tung D Nguyen, Matthew Garratt, Kathryn Kasmarik, Sreenatha Anavatti, Michael Barlow, and Hussein A Abbass. A deep hierarchical reinforcement learner for aerial shepherding of ground swarms. In *International Conference on Neural Information Processing*, pp. 658–669. Springer, 2019.

[103] H. Singh, B. Campbell, S. Elsayed, A. Perry, R. Hunjet, and H. Abbass. Modulation of force vectors for effective shepherding of a swarm: A bi-objective approach. In *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 2941–2948, 2019.

[104] R. Vidal, O. Shakernia, H. J. Kim, D. H. Shim, and S. Sastry. Probabilistic pursuit-evasion games: theory, implementation, and experimental evaluation. *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 18, No. 5, pp. 662–669, 2002.

[105] J. P. Hespanha, H. J. Kim, and S. Sastry. Multiple-agent probabilistic pursuit-evasion games. In *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 99CH36304)*, Vol. 3, pp. 2432–2437. IEEE, 1999.

[106] 井村順一. システム制御のための安定論, 2000.

[107] 角田祐輔, 末岡裕一郎, 和田光代, 大須賀公一. 牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の機動制御法の理論解析. 計測自動制御学会論文集, Vol. 55, No. 8, pp. 507–515, 2019.

付録

1. 平衡点の導出

5.3.1 項の (5.25) 式以降の平衡点の導出過程を示す．(5.25) 式について，$s = r_e^2 \in \mathbb{R}_+$ として，s についての 2 次方程式

$$g(s) \triangleq ({K_2}^2 - {K_4}^2)s^2 - (K_1 + 2K_3)K_2 s + (K_1 + K_3)K_3 = 0 \tag{8.1}$$

の解を求める．ただし，(8.1) 式で表される方程式の解は (5.23) 式より，$s > \frac{K_3}{K_2}$ を満たさねばならない．

(a) $K_2 = K_4$ の場合

方程式 (8.1) を s について解くと，

$$s = \frac{(K_1 + K_3)K_3}{(K_1 + 2K_3)K_2} < \frac{K_3}{K_2} \tag{8.2}$$

となる．よって，(5.23) 式を満たさないので，不適．

(b) $K_2 \neq K_4$ の場合

$g(\frac{K_3}{K_2}) < 0$ であり，かつ，$g(0) > 0$ であるから，方程式 (8.1) が $s > \frac{K_3}{K_2}$ で解を持つ条件は，s^2 の係数が正，なすわち，$K_2 > K_4$ である．このとき，$s > \frac{K_3}{K_2}$ を満たす方程式 (8.1) の解は，

$$s = \frac{(K_1 + 2K_3)K_2 + \sqrt{D}}{2({K_2}^2 - {K_4}^2)} \tag{8.3}$$

$$\therefore r_e = \sqrt{\frac{(K_1 + 2K_3)K_2 + \sqrt{D}}{2({K_2}^2 - {K_4}^2)}} \tag{8.4}$$

となる．ただし，D は方程式 (8.1) の判別式

$$D \triangleq (K_1 K_2)^2 + 4{K_4}^2(K_1 + K_3)K_3 \tag{8.5}$$

である．この解を (5.22) 式に代入することで R_e が得られる．(5.22) 式で得られた R_e と (8.4) 式の r_e を (5.24) 式に代入すれば，$\cos\phi_e$ が求まる．次に，$-1 < \cos\phi_e < 0$ となることを以下に示す．(5.24) 式より，$\cos\phi_e = -\frac{r_e}{R_e}$ であるから，$R_e^2 - r_e^2$ を計算すると，

$$\begin{aligned}
&R_e^2 - r_e^2 \\
&=\Big\{\frac{r_e(K_2 - K_3 r_e^{-2})}{K_4}\Big\}^2 - r_e^2 \ \ (\because (5.22)\text{ 式}) \\
&=K_4{}^{-2} r_e^{-2}\big\{(K_2{}^2 - K_4{}^2) r_e^4 - 2K_2K_3 r_e^2 + K_3{}^2\big\} \\
&=K_1K_4{}^{-2} r_e^{-2}(K_2 r_e^2 - K_3) \ \ (\because (5.25)\text{ 式})
\end{aligned} \tag{8.6}$$

となる．ここで，(5.23) 式から，$K_2 r_e^2 - K_3 > 0$ より $R_e^2 - r_e^2 > 0$ となる．よって，$-1 < \cos\phi_e = -\frac{r_e}{R_e} < 0$ を満たす．

2. 機動制御則設計問題の解の導出

第 5.4 節の機動制御則設計問題の解の導出過程を記す．(5.42) 式より，平衡点におけるヒツジとゴールとの距離 l_e は，

$$l_e = \sqrt{\frac{(K_1K_2)^2 + K_1K_2\sqrt{D} + 2K_1K_3K_4{}^2}{K_4{}^2\big\{(K_1 + 2K_3)K_2 + \sqrt{D}\big\}}} \tag{8.7}$$

と表される．l_e をヒツジの目標円軌道の半径 L に置き換えて，K_3 について整理すると，

$$K_3 = \frac{K_1L^2(K_1K_2 - K_4{}^2L^2)}{K_4{}^2L^4 - K_1{}^2} \tag{8.8}$$

となる．ここで，平衡点が存在する条件である (5.27) 式の $K_2 > K_4 > 0$ と，$K_1 > 0$, $K_3 > 0$，K_3 の分子，分母の正負が一致することから，他のゲインの条件を求める．K_3 の分子 $d_1 = K_1L^2(K_1K_2 - K_4{}^2L^2)$，分母 $d_2 = K_4{}^2L^4 - K_1{}^2$ のそれぞれの正負は一致することを用いて場合分けをする．

1. $d_1 < 0, d_2 < 0$ の場合

$$\frac{\sqrt{K_1K_2}}{L} < K_4 < \frac{K_1}{L^2} \tag{8.9}$$

となる．この不等式を満たす K_4 が存在するのは，$\frac{\sqrt{K_1K_2}}{L} < \frac{K_1}{L^2}$，つまり $K_2 < \frac{K_1}{L^2}$ のときである．しかし，この不等式と (8.9) 式より，$K_2 < \frac{K_1}{L^2} < \frac{{K_4}^2}{K_2}$ となるので，$K_2 > K_4 > 0$ に矛盾する．

2. $d_1 > 0, d_2 > 0$ の場合

$$\frac{K_1}{L^2} < K_4 < \frac{\sqrt{K_1K_2}}{L} \tag{8.10}$$

となる．この不等式を満たす K_4 が存在するのは，$\frac{K_1}{L^2} < \frac{\sqrt{K_1K_2}}{L}$，つまり $K_2 > \frac{K_1}{L^2}$ のときである．この不等式と (8.10) 式より，$K_2 > \frac{K_1}{L^2} > \frac{{K_4}^2}{K_2}$ となるので，$K_2 > K_4 > 0$ を満たす．よって，K_4 の満たすべき条件は，(8.10) 式となる．したがって，各ゲインの条件は以下の式で表される．

$$K_2 > \frac{K_1}{L^2} \tag{8.11}$$

$$\frac{K_1}{L^2} < K_4 < \frac{\sqrt{K_1K_2}}{L} \tag{8.12}$$

$$K_3 = \frac{K_1L^2(K_1K_2 - {K_4}^2L^2)}{{K_4}^2L^4 - {K_1}^2} \tag{8.13}$$

研究業績

学術論文

1. Yusuke Tsunoda, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka: “Experimental Analysis of Acoustic Field Control-based Robot Navigation”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 31, No. 1, pp. 110-117, 2019.
2. Yusuke Tsunoda, Yuichiro Sueoka, Yuto Sato, Koichi Osuka: “Analysis of Local-camera based Shepherding Navigation”, Advanced Robotics, Vol. 32. No. 23, pp. 1217-1228, 2018.
3. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 和田 光代, 大須賀 公一: “牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の機動制御法の理論解析”, 計測自動制御学会論文集, Vo. 55. No. 8, pp. 507-515, 2019.
4. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 和田 光代, 大須賀 公一:“シープドッグシステムに学ぶエージェント群の機動制御則の設計法と実機検証”, システム制御情報学会論文誌 (採択済).

国際学会発表

1. Yusuke Tsunoda, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka: “On statistical analysis for shepherd guidance system”, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2017), 2017.
2. Yusuke Tsunoda, Makihiko Ishitani, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka : “Analysis of sheepdog-type navigation for a sheep model with dynamics”, In The Twenty-Fourth International Symposium on Articial Life and Robotics (AROB 24th 2019), pp. 499-503,

2019.

3. Yusuke Tsunoda, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka: “Exploration of sheepdog controller for sheep flock navigation based on the model derived from a real shepherding”, AMAM 2019, 2019.
4. Yusuke Tsunoda, Makihiko Ishitani, Yuichiro Sueoka, Koichi Osuka: “Analysis of sheepdog-type navigation for minimal sheep model”, Swarm 2019, pp. 197-200, 2019.
5. Yusuke Tsunoda, Yuichiro Sueoka, Teruyo Wada, Koichi Osuka: “Sheepdog-type robot navigation: Experimental verification based on a linear model”, Proceedings of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 1144-1149, 2020.

国内学会発表

1. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 近藤 鈴華, 杉本 靖博, 大須賀 公一: ““Mi-Nashi” Localization における位置情報のゆらぎが与える影響の解析”, 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（SI2015）, pp. 67-68, 2015.
2. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 近藤 鈴華, 杉本 靖博, 大須賀 公一: “音場の制御に基づく群れ行動の実現”, Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1A2-04a1, 2016.
3. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 高橋 良輔, 枝 知樹, 大須賀 公一: “音場に基づくロボットナビゲーション”, 平成 28 年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, pp. 123-124, 2017.
4. 角田 祐輔, 枝 知樹, 末岡 裕一郎, 南 裕樹, 大須賀 公一: “音場制御によるロボットナビゲーション”, Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1A1-G09, 2017.
5. 角田 祐輔, 枝 知樹, 末岡 裕一郎, 南 裕樹, 大須賀 公一: “音場制御型ロボットナビゲーション”, 第 23 回創発システムシンポジウム, P15, 2017.
6. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 高橋 良輔, 大須賀 公一 : “音の回折現象を利用したロボットナビゲーションのシミュレーション解析”, 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 (SI2017)，宮城，12 月，2017.

7. 角田 祐輔, 末岡 裕一郎, 和田 光代, 大須賀 公一 : “牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の機動制御に関する研究”, 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI’20), GS17-8, pp. 799-806, 2020.
8. 角田 祐輔，末岡 裕一郎，大須賀 公一: “擬似磁気モノポールを用いたマイコンレス型シープドッグシステムの実機実現”, Proceedings of the 2020 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-K09, 2020.

その他

1. Yuichiro Sueoka, Yusuke Tsunoda, Koichi Osuka: “Manipulation of the entire group navigation based on dynamic goal-preference switching”, Artificial Life and Robotics, Vol. 24, No. 1, pp. 88-93, 2019.
2. 末岡 裕一郎，角田 祐輔: “シープドッグシステムから紐解くマルチエージェントシステムの制御”, 計測と制御, Vol. 59, No 2, pp. 125-130, 2020.
3. Tomoha Kida, Yuichiro Sueoka, Hiro Shigeyoshi, Yusuke Tsunoda, Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka: “Verification of acoustic-wave-oriented simple state estimation and application to swarm navigation”, Journal of Robotics and Mechatronics (accept).
4. Yasuhiro Sugimoto, Yuichiro Sueoka, Takaki Okamoto, Yusuke Tsunoda, Yuto Sato, Kazuma Nakanishi, Ryosuke Takahashi, Yuki Takagi, Yuki, Minami, Koichi Osuka: “Walking and Swarming robots based on Implicit Control Law”, Proc. of the 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017), D12, 2017.
5. Yuichiro Sueoka, Yusuke Tsunoda, Takahiro Ide, Koichi Osuka: “Proposal of a flexible robot navigation method based on majority consensus”, 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB2018), 2018.
6. 近藤 鈴華，末岡 裕一郎，角田 祐輔，杉本 靖博，大須賀 公一: “RSSI 場に基づく群れの行動制御の基礎実験”, 平成 27 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学

会若手研究発表会, pp. 115-116, 2016.

7. 木田 友葉，末岡 裕一郎，高橋 良輔，角田 祐輔，高木 勇樹，大須賀 公一 : “音の到達時間差に基づく移動ロボットの姿勢推定法の提案”，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 (SI2017), 宮城, 12 月, 2017.
8. 重吉 比呂，末岡 裕一郎，木田 友葉，角田 祐輔，大須賀 公一: “磁石結合・分離機構を搭載した非自走型群ロボットによる協調行動の実現”, 第 63 回自動制御連合講演会, 1G3-02, 2019.
9. 石谷 槙彦，末岡 裕一郎，角田 祐輔．大須賀 公一: “非線形なシープドッグシステムにおける安定性解析” : 第 37 回日本ロボット学会学術講演会, 1H3-07, 2019.
10. 高橋 良輔，角田 祐輔，石谷 槙彦，末岡 裕一郎，大須賀 公一: “シープドッグシステムにおける安定性解析”, 第 31 回自律分散システム・シンポジウム, 2B2-1, 2019.
11. 重吉 比呂，橋本 拓実，末岡 裕一郎，角田 祐輔，杉本 靖博，大須賀 公一 : “身体反射回路を埋め込んだマイコンレス移動ロボット群の実機開発”, 第 21 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 (SI2020), 2020.
12. 橋本 拓実，角田 祐輔，末岡 裕一郎，杉本 靖博，大須賀 公一 : “センサ不感帯を活用した反射移動型ロボットによる物体クラスタリング”，第 21 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 (SI2020), 2020.
13. Runze Xiao, Yusuke Tsunoda, Koichi Osuka : “A New Robot Navigation Scheme Combining Implicit and Explicit control to Travel Through the Unknown Environment to Reach the Destination”, SICE SI2020 Annual Conference, 2020.