

Title	移動ロボット群のフォーメーション制御
Author(s)	藤井, 正範
Citation	
Issue Date	2003-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/445
Rights	
Description	Supervisor: 藤波 努, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

移動ロボット群のフォーメーション制御

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識社会システム学専攻

藤井正範

2003 年 3 月

修 士 論 文

移動ロボット群のフォーメーション制御

指導教官 藤波努 助教授

審査委員主査 國藤進 教授
審査委員 西本一志 助教授
審査委員 吉田武稔 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識社会システム学専攻

150061 藤井正範

提出年月: 2003 年 2 月

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.1.1	非線形システムとしての移動ロボット	1
1.1.2	ダイナミカルシステムの立場からのアプローチ	2
1.1.3	シンボリックシステムの立場からのアプローチ	2
1.1.4	ハイブリッドアプローチ	2
1.1.5	隊列形成への適用	4
1.2	論文の構成	5
第2章	隊列形成問題	6
2.1	隊列の定義	6
2.2	隊列形成手法	7
2.2.1	システム表現による分類	7
2.2.2	情報伝達方法による分類	9
2.3	隊列形成問題の技術課題	10
第3章	$l-\psi$ 制御法	11
3.1	制御則の詳細	11
3.2	隊列形成への適用	13
3.2.1	シミュレーション環境	13
3.2.2	任意の隊列の形成	13
3.2.3	隊列の収束性	14
3.2.4	隊列の大きさに対する影響	14
3.2.5	隊列切り替えの安定性	16
3.3	隊列形成への課題	18
第4章	ハイブリッドアプローチ	19
4.1	状態切り替え部の設計	19
4.1.1	基本方針	19
4.1.2	切り替え動作の構成	19
4.1.3	切り替えのタイミング	20
4.1.4	ステアリング角による拘束の導入	21

4.2	障害物回避モジュール	21
4.2.1	仮想ロボットの構成	22
4.2.2	障害物回避行動	22
4.3	全体構成	23
第5章	ハイブリッドアプローチと $l-\psi$ 制御法との比較	24
5.1	隊列切り替えにおける追従動作	24
5.1.1	line から column へ	24
5.1.2	diamond から column へ	24
5.1.3	wedge から column へ	26
5.1.4	triangle から column へ	27
5.2	リーダの状況変化への対応	28
5.2.1	リーダ軌道切り替えにおける追従動作	28
5.2.2	障害物回避における追従動作	30
第6章	評価と検証	32
6.1	状態切り替え部の動作	32
6.2	切り替え則における速度設定の評価	32
6.2.1	速度設定を変化させたときの振る舞い	32
6.2.2	speed controller の評価	35
6.3	切り替え角度の評価	36
6.3.1	切り替え角度を変化させたときの振る舞い	36
6.3.2	切り替え角度について	36
6.4	ステアリング角の評価	38
6.5	座標系の問題	38
6.5.1	リーダ中心の座標系の弊害	38
6.5.2	ビヘービアベースドの観点からの考察	38
6.6	実機への実装の試みと展望	39
6.6.1	自律移動ロボット Khepera	39
6.6.2	センサの問題	39
6.6.3	追従動作実験	41
6.6.4	実機への課題	42
第7章	結論	43
7.1	本研究の結論	43
7.2	今後の課題	44
7.2.1	ハイブリッドシステムとしての可能性	44
7.2.2	今後の課題	44

謝辞	45
付録 A：非ホロノミック拘束系	46

図 目 次

1.1	ハイブリッドダイナミカルシステム (HDS)	3
1.2	スイッチドシステム	4
2.1	隊列の形態 (左から line, column, diamond, wedge, triangle)	7
2.2	隊列形成手法 (左: Virtual structure, 右: Schema based)	8
2.3	情報伝達方法による分類 (左から中央集権型, リーダ参照型, 自律分散型)	9
3.1	2 輪移動ロボット	11
3.2	生成した隊列の軌跡 (左上から line, column, diamond, wedge, triangle)	15
3.3	図 3.2 における最後尾のロボットと目標距離との誤差 (図は図 3.2 と対応している)	15
3.4	隊列の大きさに対する影響 (6 台の場合: 図は 3 台での隊列形成と対応している)	16
3.5	隊列切り替え時の軌跡 (左から line, diamond, wedge, triangle)	17
3.6	隊列切り替え時の出力速度の変化 (図は図 3.5 と対応している)	17
4.1	切り替え制御部	20
4.2	初期相対角度による $l - \psi$ 制御側の影響 (概念図)	21
4.3	初期相対角度による $l - \psi$ 制御側の影響 (実験結果: 左から軌跡, 入力速度, 入力角速度)	21
4.4	仮想ロボットとセンサレンジ	22
4.5	$l - \psi$ を用いた 3 台のロボットによる障害物回避行動 (左上から, 軌跡, 速度入力の変化, 角速度入力の変化)	22
4.6	ハイブリッドアプローチを用いた制御アーキテクチャ	23
5.1	line から column(上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度)	25
5.2	diamond から column(上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))	26
5.3	wedge から column(上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))	27
5.4	triangle から column(上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))	28

5.5	6 台のロボットによる 2 回の 90 度回転に対する各手法の比較 (上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))	29
5.6	5 台のロボットによる障害物回避行動における各手法の比較 (上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))	31
6.1	ハイブリッドコントローラを用いた時の図 5.5 におけるコントローラの切り替えの様子 (左から follower1, 2, ... 5)	33
6.2	ステアリング角による抑制を用いたときの図 5.5 におけるコントローラの切り替えの様子 (左から follower1, 2, ... 5)	33
6.3	図 5.5 における speedcontroller を変化させた時の振る舞い (各段左から軌跡, 出力速度, 出力加速度)	34
6.4	図 5.5 における 切り替え角度 ψ を変化させた時の振る舞い (各段左から軌跡, 出力速度, 出力加速度)	37
6.5	自律移動ロボット Khepera (左から本体, K213 視覚モジュール搭載, リーダ機)	39
6.6	実験環境 (左: 照明を当てた状態, 右: グリッド)	40
6.7	K213 視覚センサの適用範囲 (左から 3cm, 5cm, 10cm)	40
6.8	実験結果 (左から探索動作 (1), 追従動作, 探索動作 (2))	42
1	自動車のロール, ピッチ, ヨー角	49
2	2 輪車両系のモデル	49
3	軌道追従制御のシミュレーション	51

表 目 次

2.1	情報伝達手法による分類	10
3.1	シミュレーション環境	13
3.2	シミュレーションにおけるパラメータの初期値	13
3.3	各ロボットの初期位置	14
6.1	ステアリング角の評価	36
6.2	Khepera を用いた追従実験の結果	42
7.1	ハイブリッドアプローチと $l - \psi$ 制御法との比較	44

第1章 序論

本研究では、非ホロノミック拘束を有する車両型移動ロボットを用いた隊列形成を目的とする。ここでは、その隊列形成を行うための研究背景および、その研究分野の現状について論じる。

1.1 研究の背景と目的

移動ロボットの制御問題については、現在多くの手法が提案されている。しかし、歩行のように構造的に複雑な移動形態を有しているロボットだけでなく、車輪移動という単純な機構を有するロボットでさえも、決定的な手法はまだ開発されていない。それは、この移動ロボットが非ホロノミックな拘束を持っているため、非線形なシステムとして捉えなければ、うまく扱えないからである。本節では、このような移動ロボットの特徴を概説し、本研究の動機について述べる。

1.1.1 非線形システムとしての移動ロボット

近年、制御理論の発達により、非線形なシステムにおいても、フィードバックと座標変換により可制御な線形システムに帰着することで、制御することが可能となった。これはすなわち、非線形システムを状態空間内のある点周りの微小区間内で、一次近似することにより、等価な線形システムに変換するフィードバック線形化手法である。このフィードバック線形化手法により、非線形なシステムも制御できるようになった [中村 94][中村 97]。

しかし、このような手法を容易には適用できない系が、ここ 10 年くらいの間に盛んに発見されるようになった。この系は、力学的拘束が積分不可能な微分方程式拘束をもっていることが特徴であり、通常の線形化手法が適用できないことが分かっている。

このような系は、機械力学でいう非ホロノミックな拘束を有している。たとえば、テーブルの上を転がるコインや、水泳の高飛び込みのフォーム、閉じた器の中の気体分子の運動、自動車のような車輪移動する移動体などに見られ、ロボットが移動する環境を考えると、必ず考慮しなければならない問題である。

1.1.2 ダイナミカルシステムの立場からのアプローチ

このように、非ホロノミックな拘束を有する系は、最近盛んに研究されている、ロボットサッカー [HV98] や、自律走行車 [BA98] などにも盛んに取り入れられ、その重要性が高まっている。特に、追従走行を考える上で、この考え方は大変有効であることが分かっており、様々なアプローチで研究が行われ、山彦 [YYFT90] などの実ロボットにおいても適用されるようになった。また、追従走行を発展させた、群ロボットの隊列形成問題を扱う際にも、この考え方を適用した研究が多い。

1.1.3 シンボリックシステムの立場からのアプローチ

一方、ロボットの移動について、目標値への制御問題としてではなく、その目的達成行動に着目した、ビヘービアベースドの考え方も、近年盛んに研究されている。この手法の特徴は、無数にある環境変数を限定させて、系を扱う制御的手法と違い、環境に対して自らの行動を限定させた、有限個の行動変数を用いて、目的を達成することにある。

このような、ビヘービアベースドの考え方をを用いた移動ロボットの研究においては、設定する行動変数の扱い方が問題になってくる。たとえば Brooks [Bro86] は、ビヘービア同士の競合により、行動変数を抑制するサブサンプシジョンアーキテクチャを提案し、Arkin [BA98] は状況にあわせたスキーマを設定し、それに応じてビヘービアの協調を行って行動変数を決定する、スキーマベースドを提案している。

このようにビヘービアベースドの考え方による移動ロボットは、解析的に制御することが困難である反面、適切な行動変数を選べば、非常に簡単に実用的なロボットを作成できることに特徴がある。

移動ロボットの分野において、制御的手法とビヘービアベースドは、互いに盛んに研究されており、その考え方に基づく実機も多数製作されている。しかし、これらの手法には、それぞれ欠点があり、どちらが移動ロボットに対して有効であるかは、判明していない。たとえば、制御的手法は、可制御な領域内であれば、ほぼ確実に動作することが保証されているため、工場などの理想的な環境において、大変普及している。しかし、例えば家庭内で作業するといった、実ロボットが移動することにより目的を遂行するような環境など、必ずしも可制御な領域で作業することが不確実な環境においては、うまく動作しないことが多い。一方、ビヘービアベースドに基づく移動ロボットは、環境に依存しないロバストな動作を実現することが出来る反面、解析的に行動することが出来ないため、最適な動作を選択することが困難であるという欠点がある。

1.1.4 ハイブリッドアプローチ

これら両者の欠点は、互いに相補的なものであるが、実ロボットが人間が生活する環境で作業することを考えたとき、解決しなければ問題である。このような背景から、ここ数

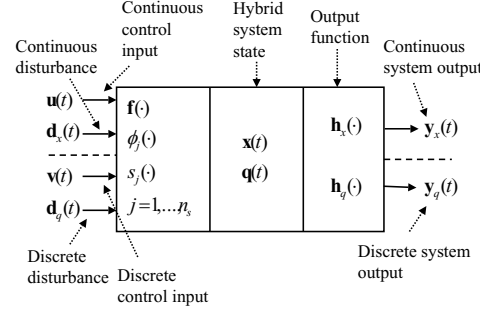


図 1.1: ハイブリッドダイナミカルシステム (HDS)

年，これらの両者を組み合わせたハイブリッド制御法や，スイッチング制御法が，盛んに研究され，その組み合わせ方が様々に提案されている．

ハイブリッドアプローチは，ハイブリッド制御やスイッチング制御，ハイブリッドダイナミカル制御などと呼ばれている．その定義は，潮 [潮 02] によれば，

- ハイブリッドシステム

- － 状態が連続変数と離散変数からなるダイナミカルシステム

と定義される．また，その扱いに関しては，ダイナミクスに重点を置くか，記号系に重点を置くかによって，その融合の度合いが異なる．たとえば，ダイナミクスに重点をおく場合，ベクトル場の切り替えを記号的に扱うが，離散事象システムの場合は事象の生起条件に連続値変数を用いることが多い．これらは，それぞれ対象とする系によって異なるアプローチをとり，その融合の度合いについて現在盛んに研究されている．

たとえば，Buss らによるハイブリッドダイナミカルシステム (HDS)[BGH⁺02] は連続系と離散系の入出力を以下のような状態表現を用いている．

図 1.1 のようなシステムにおいて，連続系の入力 $u(t)$ と外乱 $d_x(t)$ および離散系の入力 $v(t)$ や外乱 $d_q(t)$ が加わったとき，連続系の状態を x ，出力を h_x とすると，

$$\dot{x} = f(x, (u), (q), t^-) \text{ (if } s_j(x, u, q, v, t) \neq 0, j = 1, \dots, n_s) \quad (1.1)$$

$$(x(t^+), q(t^+))^T = \phi_j(x, u, q, v, t) \text{ (if } s_j(x, u, q, v, t) = 0, j = 1, \dots, n_s) \quad (1.2)$$

$$y = h(x, u, q, v, t) \quad (1.3)$$

という表現ができる．ここで，パラメータが変化することにより，ハイブリッドシステムの状態が切り替わり，出力が得られる．Buss らは，この HDS を用いて，2 自由度の劣駆動マニピレータを 7 つの切り替え器により安定化させた．

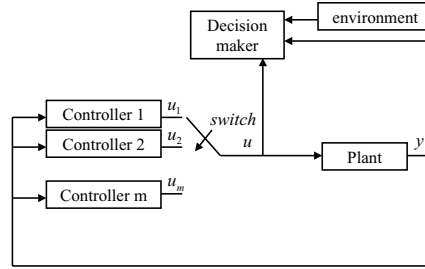


図 1.2: スイッチドシステム

また，Liberzon ら [LM99] は，スイッチドシステムとして図 1.2 のようなシステムを提案している．

このシステムは，環境などの外乱やフィードバックに応じて，意思決定部（図では Decision Maker）制御器の切り替えを行い，状況の変化に対応している．

このように，ハイブリッドなアプローチは現在多様な組み合わせ方が提案されており，いまだ決定打はない．しかし，この手法は劣駆動機械の隊列問題のように，連続系だけでは実用的に十分安定でない問題を解決するためには有効であると考えられる．本研究においては，このハイブリッドアプローチの概念を用いた制御法について提案する．また，その対象として隊列形成問題を扱う．

1.1.5 隊列形成への適用

本研究では，前述のとおりハイブリッド制御法やスイッチング制御法を用いて，隊列を形成することを目的とする．隊列形成とは，群ロボットが幾何学的な図形を形成することにより，ロボット単体では困難な運搬作業や，タスク分散，そして対故障性の向上が期待されるロボットの利用法である．また，状況に応じて任意の隊列を形成させることにより，移動ロボット [APS97] だけでなく，人工衛星や，飛行機のフォーメーションフライトにも応用可能 [BLH00][中須 01][MBK01] である．

さらに，最近盛んに研究されている ITS (Intelligent Transportation System) の一研究領域である AHS (Advanced Highway Systems) においても応用が期待される [DOK01]．このように，隊列形成は，移動を伴うタスクが必要とされるため，非ホロノミック系の研究と相性がよく，制御的アプローチとビヘービアベースドアプローチの両面から，盛んに研究されている．[DFK⁺ar][LBYar]

移動ロボットの隊列形成には，主に 2 つのアプローチがある [LOS98][MLGV02][TL96]．一つはリーダ追従型であり，もう一つはビヘービアベースドである．前者は，任意に設定したリーダ機に従属機が追従することで，隊列を形成する制御的なアプローチである

[TPKar][FSDK02] . この方法では，隊列を仮想的なリンク系とみなし，リーダー機との相対距離と相対角度を参照することで隊列を形成する制御法がよく利用される．また，実ロボットの間に仮想ロボットを設定し，そこからの相対距離，相対角度を追従させる仮想ロボット型のアプローチもよく利用される．一方，ビヘービアベースドでは，例えば各ロボットに割り振ったIDに基づき，各ロボット間の距離と角度をセンサで測定するビヘービアと，それに応じてモータを動作させるビヘービアを組み合わせることで隊列を形成するといったように，予め設定したロボットのビヘービアを，状況に応じて利用することにより，隊列を形成させるアプローチである [JF01][BA98] .

これら両者は，非ホロノミックな拘束を有する移動ロボットを利用するため，制御的手法では環境変化に弱く，ビヘービアベースドでは最適な動作が保証されないという問題点がある．そこで，本研究では，環境変化，特に状況に応じて隊列を切り替える動作に注目し，それをハイブリッドなアプローチで解決することを試みる．

1.2 論文の構成

以下に本論文の構成を示す．まず2章では，隊列形成問題について，隊列の定義および，隊列の形成手法について2種類の観点から論じる．3章では，隊列形成を行うためのダイナミカルアプローチとして $l-\psi$ 制御法を採り上げ，その特徴および隊列形成における問題点について，シミュレーションによる実験を行い，明らかにした．そして4章では，本研究で提案するハイブリッドアプローチについて論じる．5章ではハイブリッドアプローチの有効性について， $l-\psi$ 制御法との比較をシミュレーションにより検証した．6章では，実験の結果から考察を行い，本研究で提案した手法の有効性や問題点を指摘する．最後に7章にて結論を述べる．

第2章 隊列形成問題

移動ロボットが集団で組織的に作業を行うとき，ロボット単体では困難な荷物の配送や，複雑なタスクの実現，そして対故障性の向上が期待される．その中でも，ロボット群の移動に注目した場合，任意の幾何学図形を形成して組織的に移動する隊列をいかにして形成させるかは，重要な問題である．特に，非ホロノミック拘束を有する系，とりわけ劣駆動機械系が，隊列を形成して行動する場合，その適用範囲は移動ロボットだけではなく，自動車の自動運転まで広がるため大変重要である．本節では，このような非ホロノミック拘束を有する移動体群の隊列形成について，その定義と制御手法による分類を行い，隊列形成における課題を説明する．なお，非ホロノミック拘束系と劣駆動機械についての定義は付録 A で述べた．

2.1 隊列の定義

ロボット群が集団で行動を行うとき，規則的かつ組織的に行動することができれば，より効率的な作業を行うことが可能になる．たとえば，

1. (移動ロボット) 単体では移動できない大きな物体の配送
2. (移動ロボット) 地理情報の取得
3. (移動ロボット) 災害時の救助活動
4. (移動ロボット) 地雷除去活動
5. (自動車) プラトーン走行の実現
6. (自然界) 攻撃者から身を守る可能性の向上

などの利点がある．このように集団で行動することは，ロボットだけでなく産業界や自然界にとっても多くの利点があるとされている．

本研究においても，このような集団的かつ組織的な移動ロボット群の隊列形成を実現することを目的としている．しかし，集団的かつ組織的な群れがそのまま隊列と呼べるかどうかは議論の余地がある．そこでまず本研究における隊列形成について定義を行い，その定義のもとで隊列形成問題について考える．

隊列形成について，Mataric[JF01] に基づき以下のように定義する．

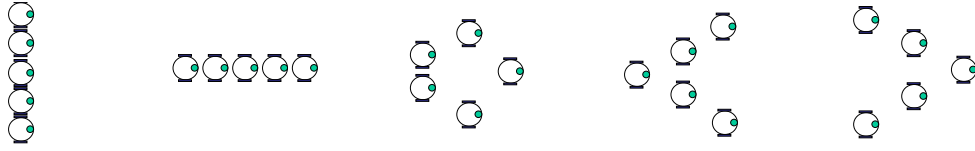


図 2.1: 隊列の形態 (左から line, column, diamond, wedge, triangle)

● 隊列の定義

- 移動体群が移動しながら全体として幾何学図形を形成し，それを維持すること

この定義により，たとえば単なる群れは隊列には含まれないことになる．しかしこの定義だけでは，隊列が幾何学図形の数だけ含まれることになり，本論文で評価することが困難になる．そこで，Arkin[BA98] が採用した隊列形態 line, column, diamond, wedge を用い，さらに triangle を加えた以下の 5 種類の隊列により，隊列形成の評価を行うこととする．図 2.1 にそれを示す．

以上の定義を元に，これから隊列を考える．

2.2 隊列形成手法

本節では，移動ロボットの隊列形成問題について，システム表現による分類と情報伝達手法による分類を用いて説明する．

2.2.1 システム表現による分類

移動ロボット，特に非ホロノミック拘束を有するロボット群が隊列形成を行う場合，システム表現による分類を行うと，以下のように分類できる．

- ダイナミカルアプローチ
- ビヘービアベースド（シンボリック）アプローチ

ダイナミカルアプローチは，隊列形成を行う際，ターゲットとなるロボットを参照して，そこからの相対距離，相対角度を逐次計測する．そして，それを入力として制御器にかけ，連続的に出力を行いながら誤差を修正し，目標とする隊列を形成する．このアプローチには，仮想ロボットを設定し，それをターゲットとして，位置や速度の補正を行う仮想ロボット法 [TL96]，予め設定されたリーダーロボットとの誤差を補正していくリーダー追従法 [DOK01][Des98] がある．

たとえば，仮想ロボット法 (Virtual Structure) は，図 2.2(左) のように，隊列全体を仮想リンクによる，一つの構造体として移動を行う．また，構造体から離れたロボットは，

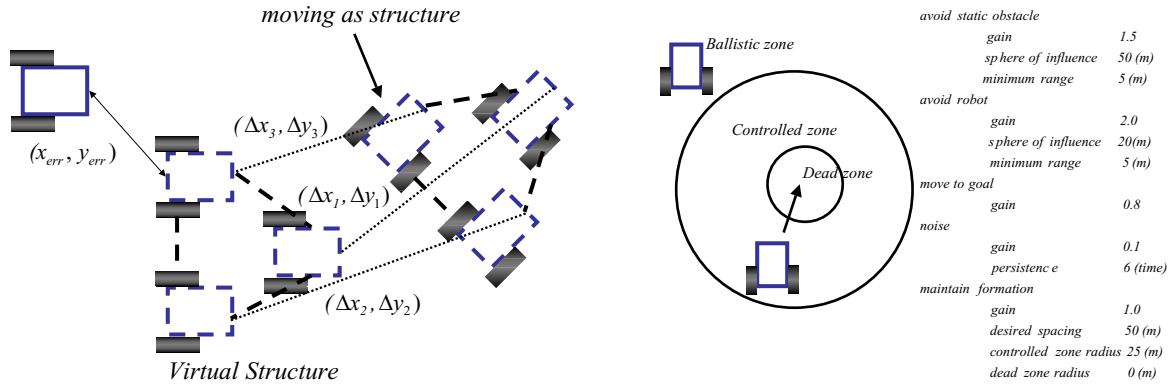


図 2.2: 隊列形成手法 (左: Virtual structure, 右: Schema based)

構造体までの誤差を計算し補正していく．この手法は，隊列全体を一つの塊として扱えるので，隊列をいったん組んでしまえば，その保守が非常に容易になるという利点がある．

一方，ビヘービオベースドアプローチでは，あらかじめ予想される状況に応じて記述された，行動規則に基づき，位置や速度の補正を行い，目標とする隊列を形成する．この方法では，予め設定されたリーダー，あるいは各ロボットに割り振られた ID 番号に基づき，番号に応じた目標位置へ移動して任意の隊列を形成する手法 [JF01][BA98] などが提案されている．

たとえば Arkin のスキーマベースド [BA98] は，図 2.2(右) のようにロボットの行動を予め記述された複数のスキーマ間の協調によって決定する．スキーマには，障害物回避や，ゴールへ向かう行動，そして隊列を形成する行動があり，それぞれ一定の重みづけがなされている．たとえば隊列形成スキーマは，ロボット間の相対距離によって，それぞれ “Dead zone”， “Controlled zone”， “Ballistic zone” に区別され，それぞれの zone に合わせて得られる value が変化する．このような複数のスキーマをうまく協調されることで，障害物回避と隊列行動を実現した．

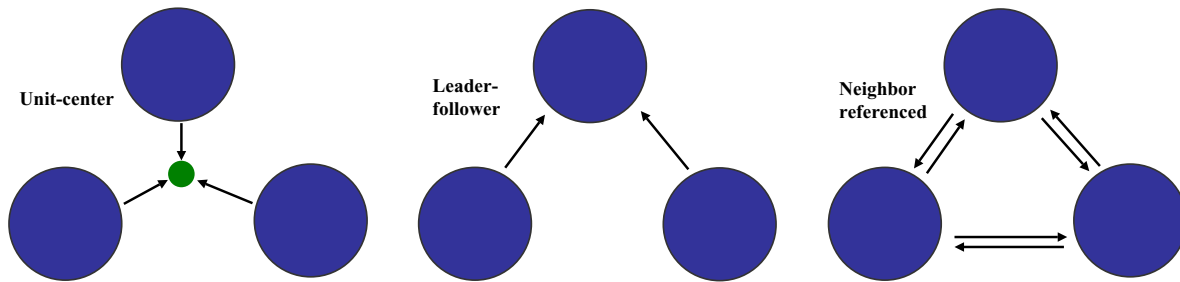


図 2.3: 情報伝達方法による分類 (左から中央集権型, リーダ参照型, 自律分散型)

2.2.2 情報伝達方法による分類

移動ロボット群の隊列形成について，各ロボット間の情報伝達方法による分類を行うと，以下のように定義できる．

- 中央集権型
- リーダ参照型
- 自律分散型

図 2.3 は情報伝達手法による分類である．中央集権型は，予め設定されたリーダーからの指令に基づいて，ロボットの行動が決定される制御法である．リーダー参照型は，従属機がリーダーの位置に基づいて，相対距離，相対角度を計測し，隊列を形成する．なお，このアプローチでは，リーダー機の現在の位置のみを従属機に提供している点で，中央集権型とは異なる．自律分散型は，隣接するロボットとの相対距離，相対角度を隊列の形態に合わせて補正することで，隊列を形成している．

これらはそれぞれ長所と短所がある．Arkin[BA98] によるシミュレーションと実機による実験や，中須賀の宇宙機のフォーメーションフライトのシミュレーション実験 [中須 01] によれば，中央集権型は情報伝達がうまくいけば，もっとも早く隊列を形成できるが，対故障性に弱い．また，自律分散型は，対故障性に優れるが，隊列を形成するまでに時間がかかる．リーダー参照型は，その中間に当たり，リーダー機が故障しても，別のロボットをリーダーとすることで，対故障性に対して強くなり，また隊列を形成する速度も中央集権型に次いでよいとのことであった．表 2.1 に，それぞれの特徴をまとめた．

本研究では，これらの結果を踏まえて，非ホロノミック拘束を有する移動ロボット，特にロボットだけでなく，自動車への応用も可能な劣駆動機械における隊列を考えるため，システム表現にはダイナミカルアプローチを用い，情報伝達にはリーダー参照型を用いた， $l-\psi$ 制御法による隊列形成を考える．

表 2.1: 情報伝達手法による分類

情報伝達手法	収束速度	対故障性
中央集権型	速い	非常に弱い
リーダ参照型	やや速い	やや弱い
自律分散型	遅い	強い

2.3 隊列形成問題の技術課題

隊列形成における技術課題として，Matarić[JF01] の提案によれば，

- 任意の隊列を形成させること
- 隊列を安定させること
- 隊列の大きさに影響されないこと
- 安定な隊列切り替えが可能であること
- 障害物回避が可能であること

が必要であるとしている．本研究においても，この基準を元に，隊列の安定性についての評価を行う．

第3章 $l - \psi$ 制御法

$l - \psi$ 制御法は，Desai ら [Des98], [DOK01] が開発した制御手法である．この制御法は軌道追従制御法 (付録 A 参照) の一つであり，目標軌道中のある一点との相対距離，相対角度を制御入力とし，連立微分方程式で記述される制御器を用いて，目標距離，目標角度へと収束させることができる．

3.1 制御則の詳細

図 3.1 のような 2 輪移動ロボットにおいて，進行方向への速度入力を v ，車体の回転角速度を ω とすると，

$$\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \quad (3.1)$$

$$\dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \quad (3.2)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \quad (3.3)$$

と表現できる．但し，車体前方のキャストはステアリングとしての機能を有していないため，2 輪劣駆動機械とみなせる．

この 2 輪劣駆動機械において，リーダと従属機を仮想的なリンク構造とみなして，リーダから見た従属機との相対距離を l ，同様に相対角度を ψ する．そして，そのキネマティクスを考慮すると，

$$\dot{l}_{12} = v_2 \cos \gamma_1 - v_1 \cos \psi_{12} + d\omega_2 \sin \gamma_1 \quad (3.4)$$

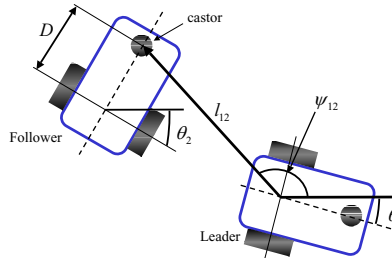


図 3.1: 2 輪移動ロボット

$$\dot{\psi}_{12} = \frac{1}{l_{12}} \{v_1 \sin \psi_{12} - v_2 \sin \gamma_1 + d\omega_2 \cos \gamma_1 - l_{12}\omega_1\} \quad (3.5)$$

$$\dot{\theta}_2 = \omega_2 \quad (3.6)$$

のように記述できる．但し，

$$\gamma_1 = \theta_1 + \psi_{12} - \theta_2 \quad (3.7)$$

および， $l_{12} > d$ である．

この非線形システムにおいて，入出力線形化を行う．新しいフィードバックを，

$$\omega_2 = \frac{\cos \gamma_1}{d} \{ \alpha_2 l_{12} (\psi_{12}^d - \psi_{12}) - v_1 \sin \psi_{12} + l_{12} \omega_1 + \rho_{12} \sin \gamma_1 \} \quad (3.8)$$

$$v_2 = \rho_{12} - d\omega_2 \tan \gamma_1 \quad (3.9)$$

のように選ぶ．但し，

$$\rho_{12} = \frac{\alpha_1 (l_{12}^d - l_{12}) + v_1 \cos \psi_{12}}{\cos \gamma_1} \quad (3.10)$$

また， l_{12}^d ， ψ_{12}^d はそれぞれ，目標相対距離，目標相対角度である．これによって，

$$\dot{l}_{12} = \alpha_1 (l_{12}^d - l_{12}) \quad (3.11)$$

$$\dot{\psi}_{12} = \alpha_2 (\psi_{12}^d - \psi_{12}) \quad (3.12)$$

という線形状態方程式が得られた．これにより，任意の相対距離，相対角度を設定すれば，目標軌道への追従が可能となる．但し， α_1 ， α_2 は係数であり，収束速度に影響 (α が大きくなると速く収束) する．

これによって，任意の隊列を形成する場合には，目標相対距離 l^d ，目標相対角度 ψ^d を隊列に合わせて設定しておけばよい．

なお，この場合の線形化に伴う零点周りの振る舞い (Zerodynamics) は， $v_1 = K_1$ ， $\omega_1 = K_2$ ， θ_2 を入力とすれば，

$$\theta_1(t) + \psi_{12}^d - \beta_2 - \arccos\left(\frac{K_2}{\beta_1}\right) \quad (3.13)$$

但し，

$$\beta_1 = \sqrt{\left(\frac{K_2 l_{12} + K_1 \sin \psi_{12}^d}{d}\right)^2 + \left(\frac{K_1 \cos \psi_{12}^d}{d}\right)^2} \quad (3.14)$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{K_1 \cos \psi_{12}^d}{K_2 l_{12} + K_1 \sin \psi_{12}^d}\right) \quad (3.15)$$

となる．

3.2 隊列形成への適用

本節では $l - \psi$ 制御則を用いて隊列形成を行い，その有効性について検証する．

3.2.1 シミュレーション環境

本節で行ったシミュレーションの環境および初期条件についてまとめる．シミュレーションは，図 3.1 のように，Pentium II 400MHz，メモリ 256 MB の PC に Linux(libc6 later) を搭載した環境で行った．また， $l - \psi$ 制御則における連立微分方程式を解くためのアルゴリズムには，4 次のルンゲクッタ法を用いて，C 言語で実装した．

表 3.1: シミュレーション環境

PC	CPU	Memory
HITACHI FLORA	Pentium II 400 (MHz)	256 (MB)
OS	Language	Method
Linux(Debian 3.0)	C, OpenGL(Mesa)	4th-order Runge-Kutta

また， $l - \psi$ 制御における各パラメータの初期値は，表 3.2 の条件で行った．

表 3.2: シミュレーションにおけるパラメータの初期値

V_1	ω_1	V_2	ω_2	D	l^d	ψ^d	α_1, α_2
1.0(cm/s)	0(rad/s)	1.0(cm/s)	0(rad/s)	2.75(cm)	5(cm)	90, 120, 180(deg)	1

このシミュレーション環境を用いて，以下で有効性を検証する．但し，評価は前章で挙げた Mataric[JF01] の基準に沿って行う．また，障害物回避行動に対しては，後述するロボットモデルのもとで行われるため，次章で論ずる．

なおここで安定とは，軌道や速度変化に大きな乱れがなく，実世界においても十分適用可能であるという意味とする．

3.2.2 任意の隊列の形成

まず最初に，任意の隊列の形成について実験を行った．ここでは，前節の定義に基づき，line，column，diamond，wedge，triangle の隊列が生成できればよいとした．なお実験は，表 3.3 に挙げる初期位置のもとで行い，隊列を形成するための移動ロボットは 3 台と

表 3.3: 各ロボットの初期位置

X-Y coordinates	Leader	Follower 1	Follower 2	Follower 3	Follower 4	Follower 5
x	0	-5	-8	-11	-15	-25
y	0	-1	3	-5	8	1

した．図 3.2 が生成した隊列である．この図は，左上から順に，line，column，diamond，wedge，triangle の隊列を形成している．それぞれ，右方向に直進しているリーダ機を参照しながら，目的の相対距離，相対角度へと収束させて，所望の隊列を形成する．この図から，line，wedge においてやや大きな軌道を描くものの，おおむね $X = 10(cm)$ 付近で，隊列を形成していることが分かる．これにより，任意の隊列については，問題なく形成できることがいえる．

この図より， $l - \psi$ 制御法を用いてリーダ機との相対距離，角度を調整することにより，多様な隊列を形成できることがいえる．

3.2.3 隊列の収束性

次に，隊列の収束性について評価を行う．ここでは，前項の実験において最もフィードバックの影響を受ける最後尾のロボットの目標相対距離との誤差を調べた．図 3.3 はその結果である．この図は，図 3.2 同様に，左上から line，column，diamond，wedge，triangle の隊列について，三台目のロボットにおける目標相対距離と現在の相対距離との差である．この図から，前項でやや大きな軌道を描いていた line，wedge で少し誤差が大きくなったものの， $T = 5(s)$ 付近で目標相対距離 $l^{desired} = 5(cm)$ に収束していることが確認される．これにより，隊列の収束性についても十分な結果を得られた．

3.2.4 隊列の大きさに対する影響

次は，隊列の大きさに対する影響についての実験を行った．ここでは，前項までの三台のロボットと比較するため，六台のロボットで実験を行った．図 3.4 はその結果である．

この図は，前項同様左上から，line，column，diamond，wedge，triangle を形成するようになっている．この実験においても，右方向へ直進しているリーダ機を参照しながら，五台のロボットが追従している．この図より，line では最後尾が大きな円弧を描き，大きく軌道を乱しており，また column では，軌道の大きさに関してはそれほどではないものの，左右に激しく動作している．そのため，安全な軌道とはいえない．diamond では，それほど大きな軌道の乱れはなく，この中ではもっとも安定しているといえる．また wedge では，最後尾が line の時よりも大きな軌道を描いてしまい，また，途中で小さな円弧を描

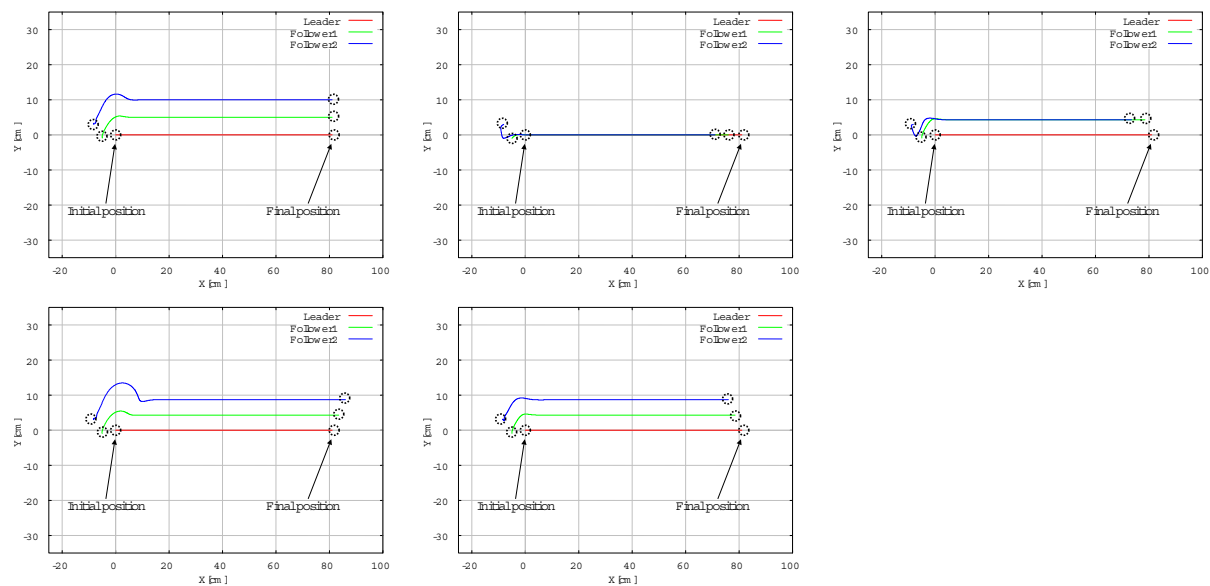


図 3.2: 生成した隊列の軌跡 (左上から line, column, diamond, wedge, triangle)

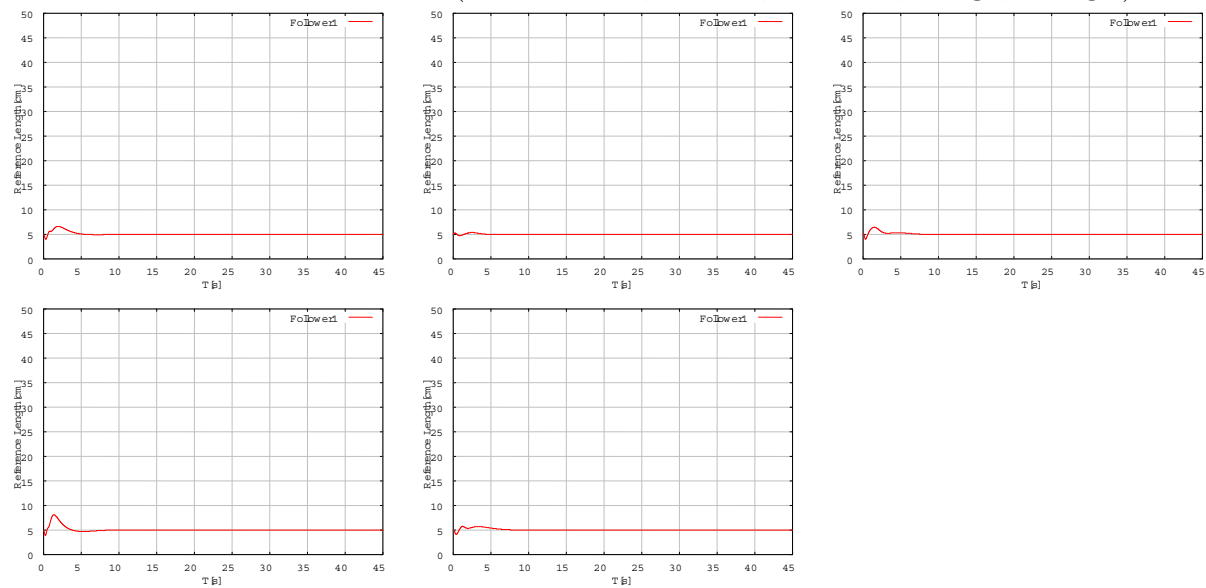


図 3.3: 図 3.2 における最後尾のロボットと目標距離との誤差 (図は図 3.2 と対応している)

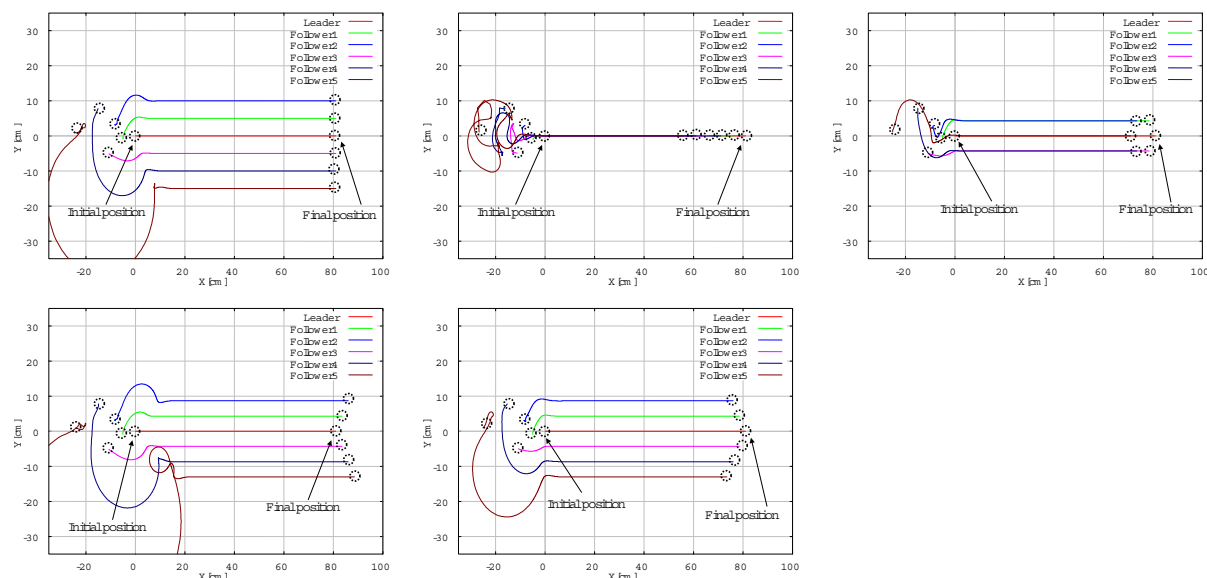


図 3.4: 隊列の大きさに対する影響 (6 台の場合: 図は 3 台での隊列形成と対応している)

くなど，収束はするものの決して安定であるとは言いがたい軌道を描いている．triangle では，やや大きな円弧を描くものの，安定しているといえる．

このように大きな軌道を描いたり，速度，角速度入力が非常に大きくなってしまいう現象は，特に後方のロボットほど顕著に見られる．このことから，隊列の要素数が大きくなればなるほど，誤差が急激に増大し，それによる過大なフィードバック入力の影響を受けるため，軌道が乱れてしまうことがいえる．

3.2.5 隊列切り替えの安定性

次に，隊列切り替えの安定性について評価を行う．ここでは，切り替えの様子を詳しく見るために，6 台のロボットを用いて，line，diamond，wedge，triangle の隊列を形成し，そこから任意のステップ後に column へと切り替えた．実験では，このような隊列切り替え動作において， $l-\psi$ 法がどれくらい追従できるのかについて調べる．

図 3.5 はその軌跡である．この図は，左上から順に line，column，diamond，wedge，triangle となっており，右方向へ直進するリーダを追従しながら，隊列の形態を変化させている．まず line からの切り替えは，四台目までは比較的小さな円軌道を描いているものの，五台目では大きな円軌道を描いてしまい，六台目では y 方向へ乱れた複雑な軌道を描いてしまっている．diamond からの変化も，やはり五台目から大きな軌道を描いている．また，wedge では，四台目までは非常に小さな軌道を描いているものの，五台目，六台目と目盛り枠からはみ出すほどに大きな軌道を描いてしまった．triangle では，diamond 同様に 5 台目以降が大きな円軌道を描いてしまい，六台目では，やはり目盛り枠からはみ出

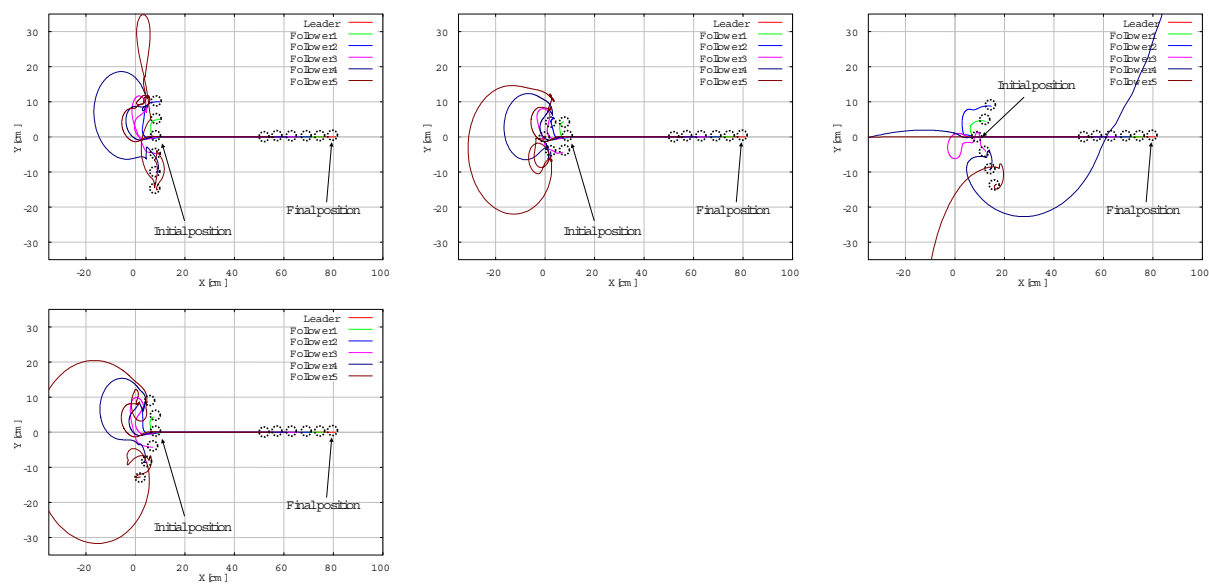


図 3.5: 隊列切り替え時の軌跡 (左から line, diamond, wedge, triangle)

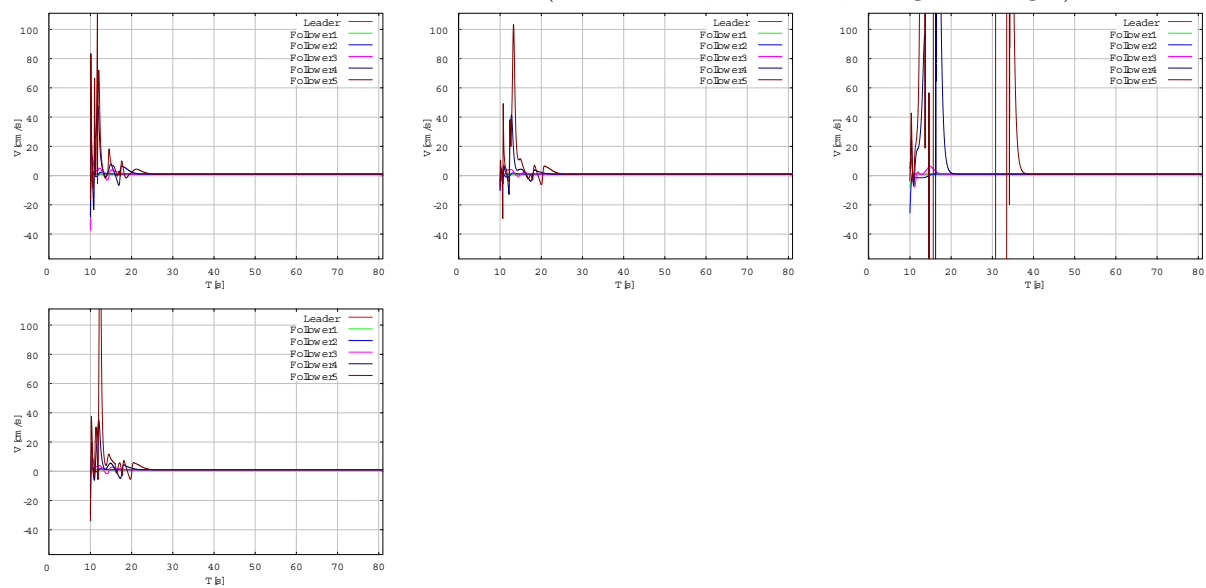


図 3.6: 隊列切り替え時の出力速度の変化 (図は図 3.5 と対応している)

すほどの軌道を描いている．

また，図 3.6 はそのときの速度変化である．この図は，図 3.5 同様，左上から line, column, diamond, wedge, triangle となっている．この図から，先の図で大きな軌道を描いているロボットには非常に大きな速度入力がかけられることが分かる．特に，wedge において，目盛り枠からはみ出すほどの大きな軌道を描いている部分に関しては，六台目が二度も大きな速度入力がかけられていることが分かる．このように隊列切り替えにおいては，後続のロボットになればなるほど，リーダの速度 $v = 1(cm/s)$ に対して，数十倍もの速度で移動することが確認された．以上の結果から，隊列切り替えにおいては $l - \psi$ だけでは十分ではないといえる．

3.3 隊列形成への課題

シミュレーションによる実験の結果から， $l - \psi$ 制御における隊列形成においては，

- 隊列の要素数の増加
- リーダ機の軌道変化

に対する安定化が必要であることがいえる．前者は，隊列の要素が増加すると，順に大きなフィードバックを受けてしまい，そのため全体の軌道が乱れてしまうことである．後者，隊列を切り替える動作において，参照するそれぞれのリーダ機の軌道が変化するため，それに追従するためには大きなフィードバック入力がかけられるために，前者同様に軌道が乱れてしまうことである．

このような状況の変化に起因する隊列の乱れは，外界環境で作業を行う移動ロボットにとって避けられない問題であり，また，解決しなければならない問題でもある．

次章においては，このダイナミカルアプローチである $l - \psi$ 制御の問題点を解決するために，ビヘービアベースドなアプローチを融合させたハイブリッドなアプローチを提案し，この問題の解決を試みる．

第4章 ハイブリッドアプローチ

3章の課題を解決するために，本研究ではハイブリッドアプローチを提案する．ハイブリッドアプローチは，連続系と記号 (離散) 系を組み合わせることで，システムの安定化を図るアプローチである [潮 02]．本研究では，このハイブリッドアプローチによる切り替え制御器を設計し，隊列形成における有効性を確認する．

4.1 状態切り替え部の設計

4.1.1 基本方針

本研究では，前章での隊列切り替え時の速度変化を抑えるため，リーダーとの相対角度 ψ を用いた，ハイブリッドなアプローチによる隊列切り替え安定化を図る．

4.1.2 切り替え動作の構成

リーダーとの相対角度 ψ に応じて，以下のような離散状態 q_i を考えた．

$$q_i = \begin{cases} q_1 & \text{if } (i < \psi < j) \\ q_2 & \text{if } (\alpha \leq \psi \leq i) \\ q_3 & \text{if } (j \leq \psi \leq \beta) \\ q_4 & \text{if } (\alpha < \psi < \beta) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで， $q_1 \sim q_4$ に対応する制御器として，図 4.1(左) のような $l-\psi$ コントローラ (LC) と，ビヘービアベースドなコントローラ (BC) を考える．

但し， BC は以下のように設定した．

- speed controller

$$v_{folloer} = \begin{cases} -v_{leader} & \text{if } (v_{follower} > 0) \\ +v_{leader} & \text{if } (v_{follower} < 0) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\omega = \begin{cases} 0 & \text{if } (\omega_{leader} = 0) \\ -0.01 & \text{if } (\omega_{leader} > 0) \\ +0.01 & \text{if } (\omega_{leader} < 0) \end{cases} \quad (4.3)$$

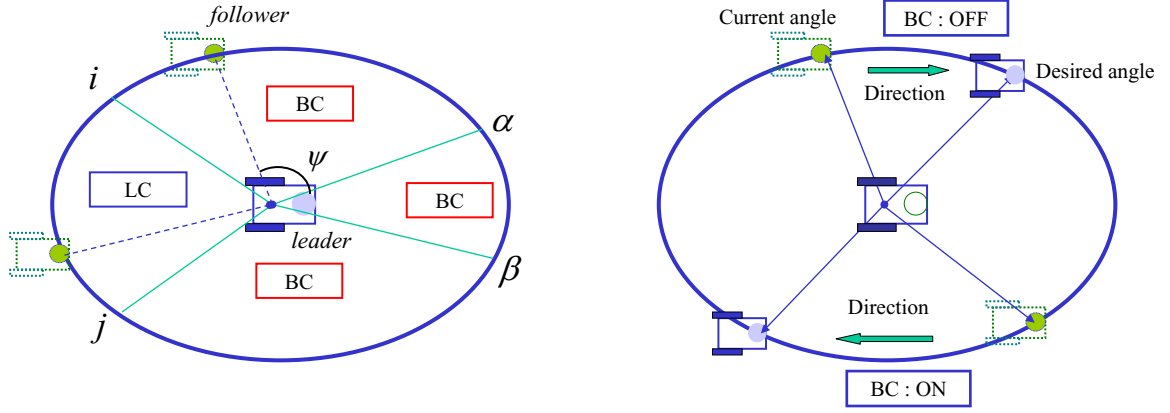


図 4.1: 切り替え制御部

- rotate controller

$$\omega = \begin{cases} -0.5 & \text{if } (\theta_{follower} > 0) \\ +0.5 & \text{if } (\theta_{follower} < 0) \end{cases} \quad (4.4)$$

これを前述の q_i に対応させると,

$$q_i = \begin{cases} LC & \text{if } (q_1) \\ speedcontroller & \text{if } (q_2, q_3) \\ rotatecontroller & \text{if } (q_4) \end{cases} \quad (4.5)$$

となり, 図 4.1(右) に示すような相対角度 ψ に応じた切り替えを行うことが可能となる.

4.1.3 切り替えのタイミング

この切り替え則におけるパラメータ α, β, i, j については, 以下の実験により決定された. 図 4.2 のように, 2 台のロボットの初期位置を相対角度に応じて設定し, そこから column 形態へ隊列組み換えを行わせた. 図 4.3 は実験の結果である. 初期相対角度を 90 度から 180 度へと 5 度ずつ変化させたときの軌跡, 入力速度, 入力角速度である. 本実験により, $l - \psi$ 制御を抑制するパラメータ i, j をそれぞれ 180 度から 30 度ずつずらした, 150 度, 210 度がフィードバックによる大きな入力を受けにくく適当であると判断した. また, α, β は, 同様に 30 度, - 30 度とした.

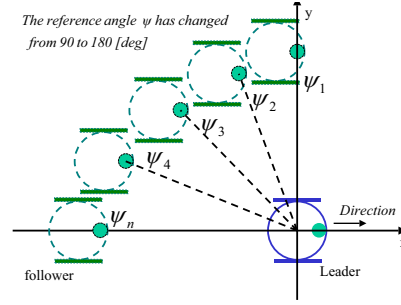


図 4.2: 初期相対角度による $l - \psi$ 制御側の影響 (概念図)

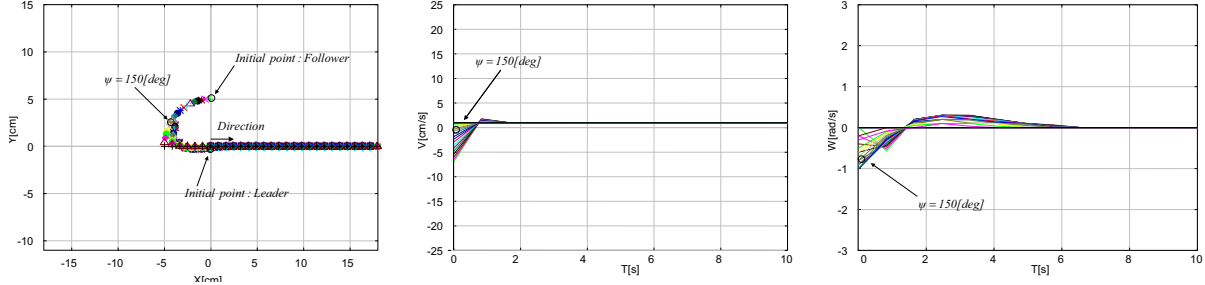


図 4.3: 初期相対角度による $l - \psi$ 制御側の影響 (実験結果: 左から軌跡, 入力速度, 入力角速度)

4.1.4 ステアリング角による拘束の導入

提案した制御則を実機へ応用することを考えたとき, 実験の結果より, 入力角速度量が大きすぎると, スピンターンのような軌跡を描いてしまうために危険である. この問題を解決するために, 自動車のステアリング角の概念を導入する. 自動車のステアリング角は, 通常左右共 30 度弱しか回転せず, それによって回転移動時において滑らかな軌跡を描くことができる. そこで, 本研究においても,

$$\omega = 30[\text{deg}](\text{if } \omega > 30) \quad (4.6)$$

としたステアリング角による抑制が必要であると考え, 次章で述べるシミュレーションによる実験では, このステアリング角による抑制の有効性についても, 検討を行う.

4.2 障害物回避モジュール

本研究では, 実ロボットへの応用も考えて, センサを有する仮想ロボットを用いて実験を行った. ここでは, その仮想ロボットと障害物回避行動について述べる.

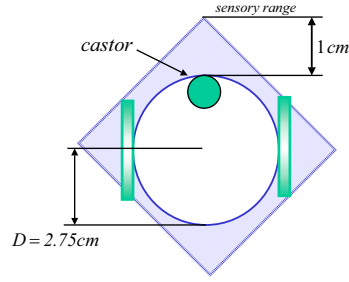


図 4.4: 仮想ロボットとセンサレンジ

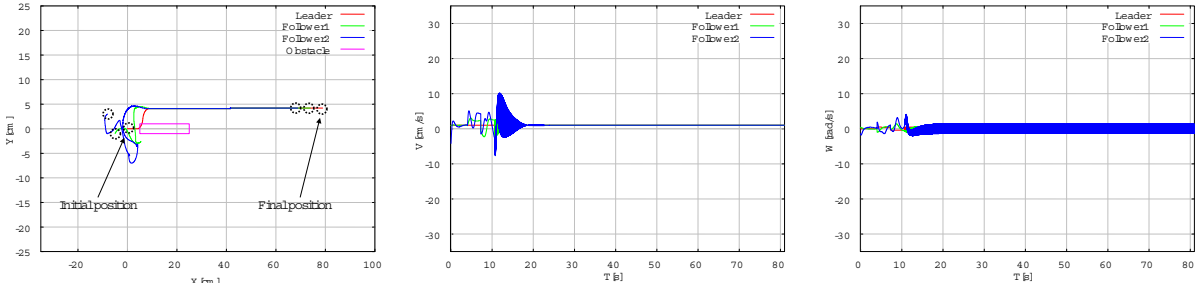


図 4.5: $l-\psi$ を用いた 3 台のロボットによる障害物回避行動 (左上から, 軌跡, 速度入力の変化, 角速度入力の変化)

4.2.1 仮想ロボットの構成

本研究では, センサ空間として図 4.4 のようなロボットを考える. このロボットは, 前後左右にセンサを持ち, その範囲は 1cm とした. このセンサにより障害物回避行動を行う.

4.2.2 障害物回避行動

前小節の仮想ロボットを用いて, $l-\psi$ 制御における障害物回避行動を実装した. 図 4.5 がその結果である.

この図は, 左から順に軌跡, 速度変化, 角速度変化である. この図より, リーダ機が障害物回避行動に入るとその軌道を変化させたとき, 後続するロボットもその軌道を乱してしまうことが確認できる. この結果から, $l-\psi$ 制御だけではリーダー機の行動の変化に対して, 追従することが困難であることがいえる.

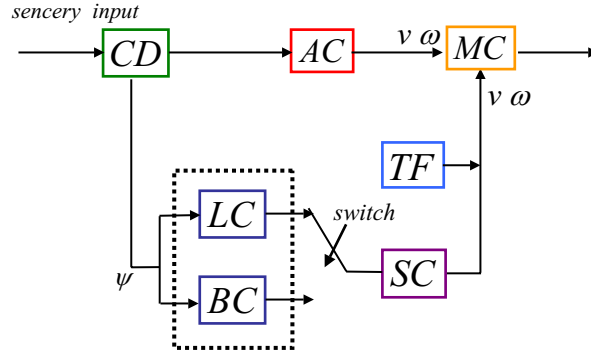


図 4.6: ハイブリッドアプローチを用いた制御アーキテクチャ

4.3 全体構成

図 4.6 は前項までで提案したハイブリッドアプローチの全体図である．この図で，SC(State Changer) は状態切り替え制御モジュール，CD(Collision Detactor) はセンサ入力に応じて，隊列形成かどうかを判別するモジュール，AC(Avoiding Controller) は障害物回避，TF(Types of Formation) は隊列の形態を指定するモジュール，MC(Motor Controller) は入力に合わせてモータを出力する部分である．シミュレーションでは，Runge-kutta モジュールがそれに相当する．

本研究では，このハイブリッドな制御アーキテクチャにより隊列形成問題への解決を試みる．次章では，この手法を用いて隊列を形成し， $l - \psi$ 制御法との比較を行う．

第5章 ハイブリッドアプローチと $l-\psi$ 制御法との比較

ここでは、本研究で提案したハイブリッドアプローチを $l-\psi$ 制御法で生成した隊列と比較する。また本章の一部は [FYF02] にて、発表済みである。

5.1 隊列切り替えにおける追従動作

$l-\psi$ 制御則では十分安全ではなかった隊列の切り替え動作について、ハイブリッドアプローチおよび、その発展であるステアリング角拘束との比較を行う。

5.1.1 line から column へ

図 5.1 は、line から column へと隊列を切り替えた結果である。この図は、左から右に軌跡、速度変化、角速度変化となっており、また、上から順に $l-\psi$ 、ハイブリッド、ステアリング拘束となっている。この図から、 $l-\psi$ では五台目以降が大きな軌跡を描いているのに対し、ハイブリッド、ステアリング拘束いずれも、無駄な動作をほとんど行わず、隊列を切り替えていることが分かる。また、速度変化を見ると、 $l-\psi$ ではリーダの速度に対して、非常に大きな速度入力がかけているのに対し、ハイブリッド、ステアリング拘束いずれも、収束こそ遅いものの、非常に小さな速度変化による隊列の切り替えが行われた。角速度変化に関しても、 $l-\psi$ では大きな変化があったものの、ハイブリッドでは非常に小さな変化で隊列を切り替えることができた。また、ステアリング拘束では、ほとんど変化することなく、全く無駄のない動作によって隊列を切り替えることができた。

5.1.2 diamond から column へ

図 5.2 は、diamond から column へと隊列を切り替えた結果である。この図は、5.1 同様に左からそれぞれ、軌跡、速度変化、角速度変化となっている。また、上から順に $l-\psi$ 、ハイブリッド、ステアリング拘束となっている。この図より、 $l-\psi$ では大きな軌道を描いている切り替え動作が、ハイブリッド、ステアリング拘束においては、全く無駄のない軌道を描いていることが分かる。また、速度変化に関しても、ハイブリッド、ステアリン

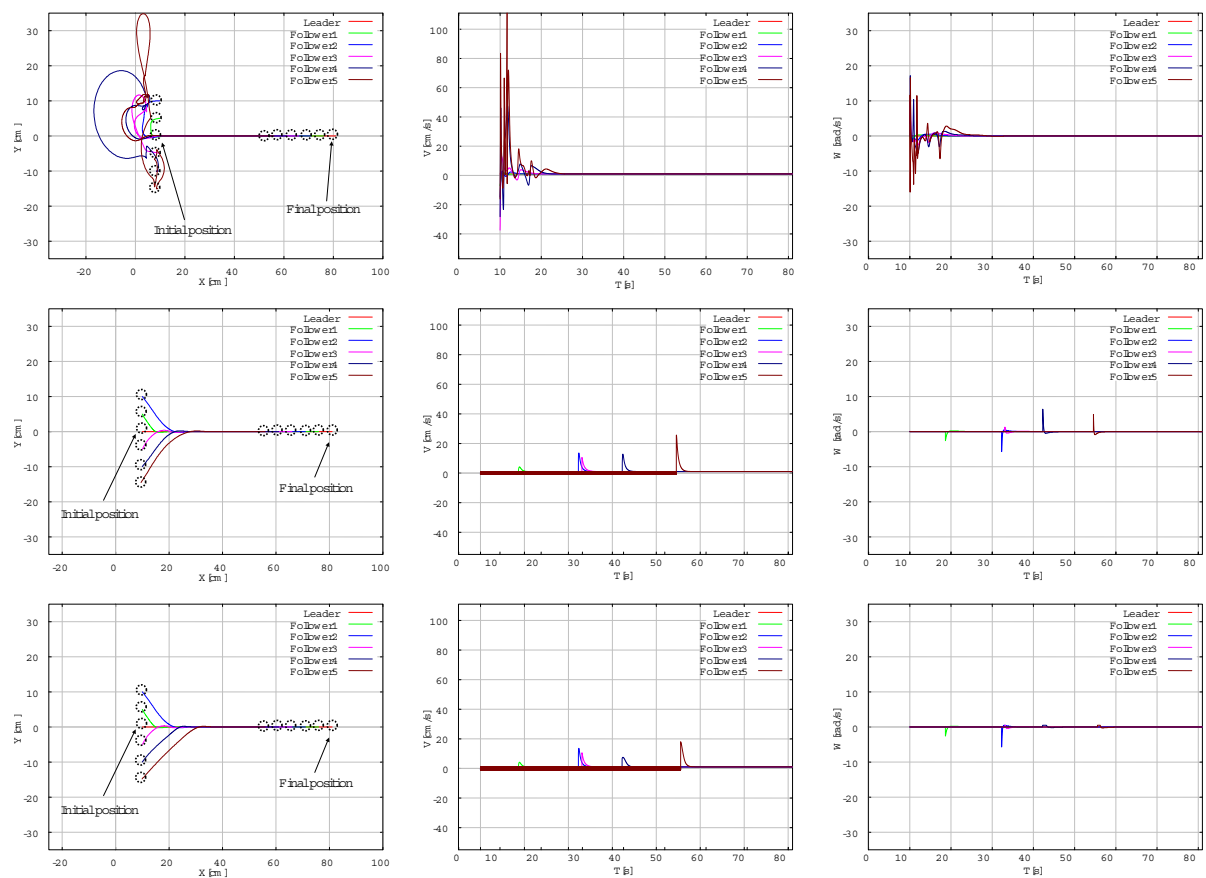


図 5.1: line から column(上段: $l - \psi$, 中段: ハイブリッド, 下段: ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度)

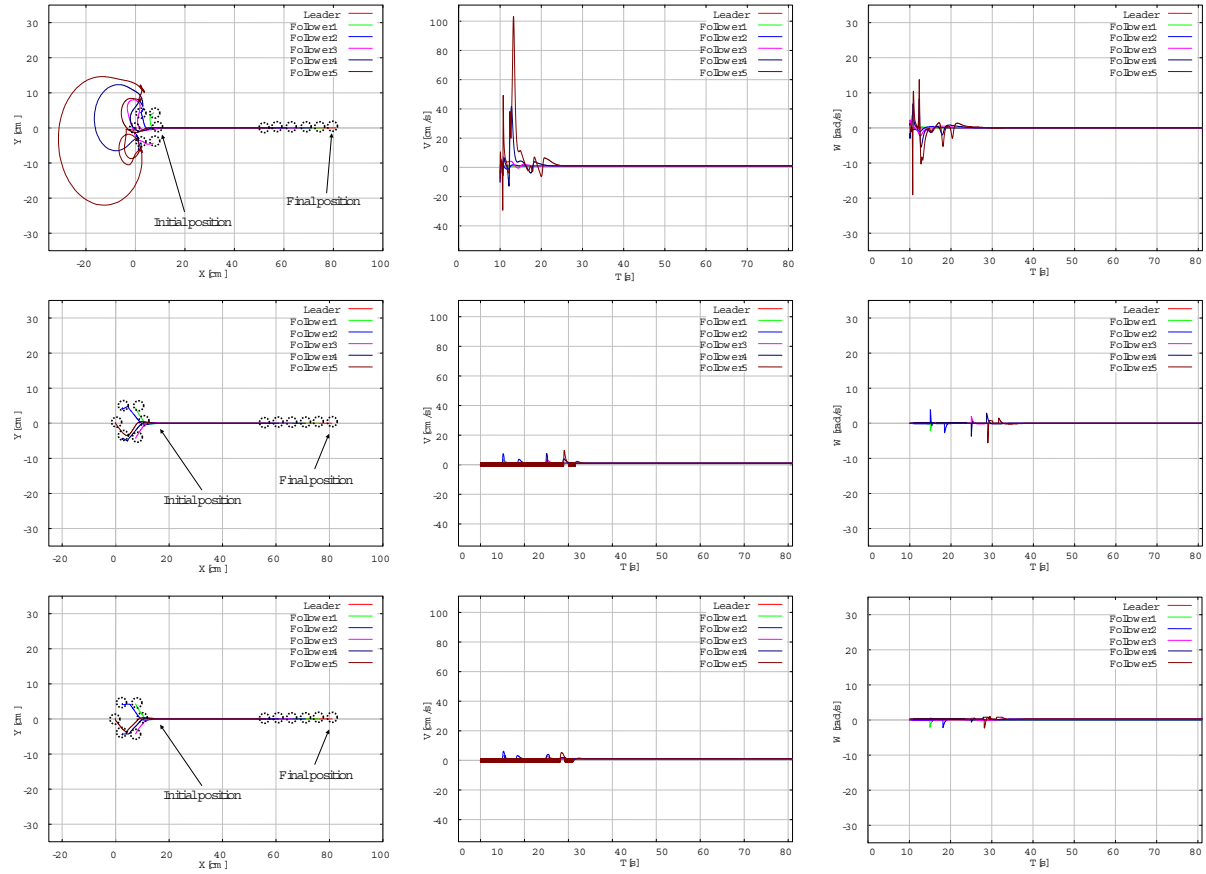


図 5.2: diamond から column(上段 : $l - \psi$, 中段 : ハイブリッド, 下段 : ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))

グ拘束においては, $l - \psi$ とほぼ同様の収束時間で, 小さな速度変化により隊列切り替えを実現している. また, 角速度変化においては, 特にステアリング拘束において, 非常に小さな変化によって, 隊列切り替えを実現していることが分かった.

5.1.3 wedge から column へ

図 5.3 は, wedge から column へと隊列を切り替えた結果である. この図も, 図 5.1 同様に, 左からそれぞれ, 軌跡, 速度変化, 角速度変化となっている. また, 上から順に $l - \psi$, ハイブリッド, ステアリング拘束となっている. この図から, $l - \psi$ では目盛り枠からはみ出すほどに大きな軌道を描いているのに対し, ハイブリッド, ステアリング拘束においては, ほとんど無駄のないきれいな軌跡が描かれている. 速度変化においては, $l - \psi$ では六台目が二度の非常に大きな速度変化を受けているのに対し, ハイブリッドでは, その数十分の一の速度変化で隊列切り替えを実現しており, また, ステアリング拘束

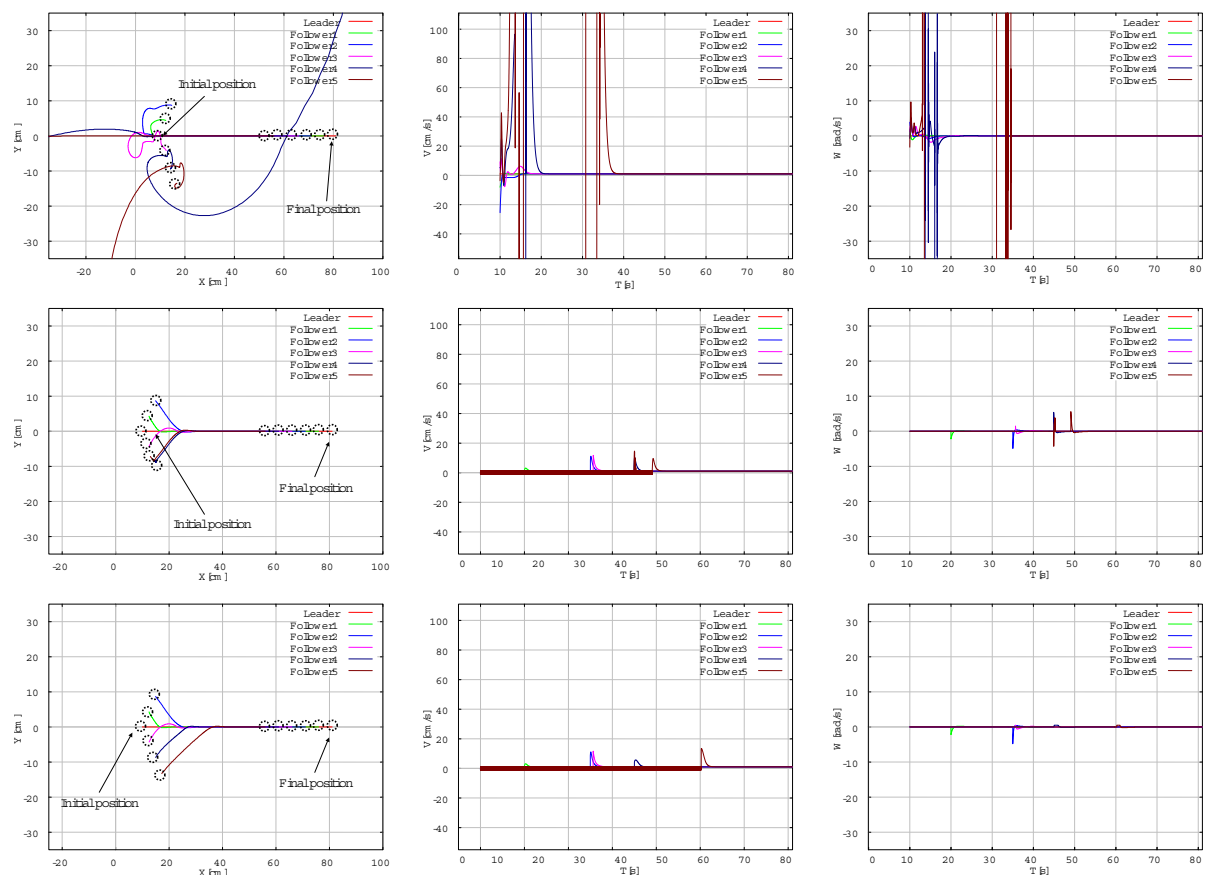


図 5.3: wedge から column(上段： $l-\psi$, 中段：ハイブリッド, 下段：ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))

においては, やや収束に時間がかかるものの, その速度変化はハイブリッド同様, 非常に小さい. また, 角速度変化においても, ハイブリッドでは, 収束時間をかけるものの, 非常に小さな変化によって, 隊列切り替えを行っている. そしてステアリング拘束においては, 変化量がほとんど 0 のままで切り替えを行っていることがわかった.

5.1.4 triangle から column へ

図 5.4 は, triangle から column へと隊列を切り替えた結果である. この図においても, 図 5.1 同様, 左からそれぞれ, 軌跡, 速度変化, 角速度変化となっている. また, 上から順に $l-\psi$, ハイブリッド, ステアリング拘束となっている. この図より, $l-\psi$ では, 五台目, 六台目が大きな軌道を描いているものの, ハイブリッド, ステアリング拘束においては, ほとんど軌道を乱すことなく, 隊列を切り替えていることが分かった. また, 速度変化においては, 収束時間にやや問題があるものの, 非常に小さな速度変化を受けている

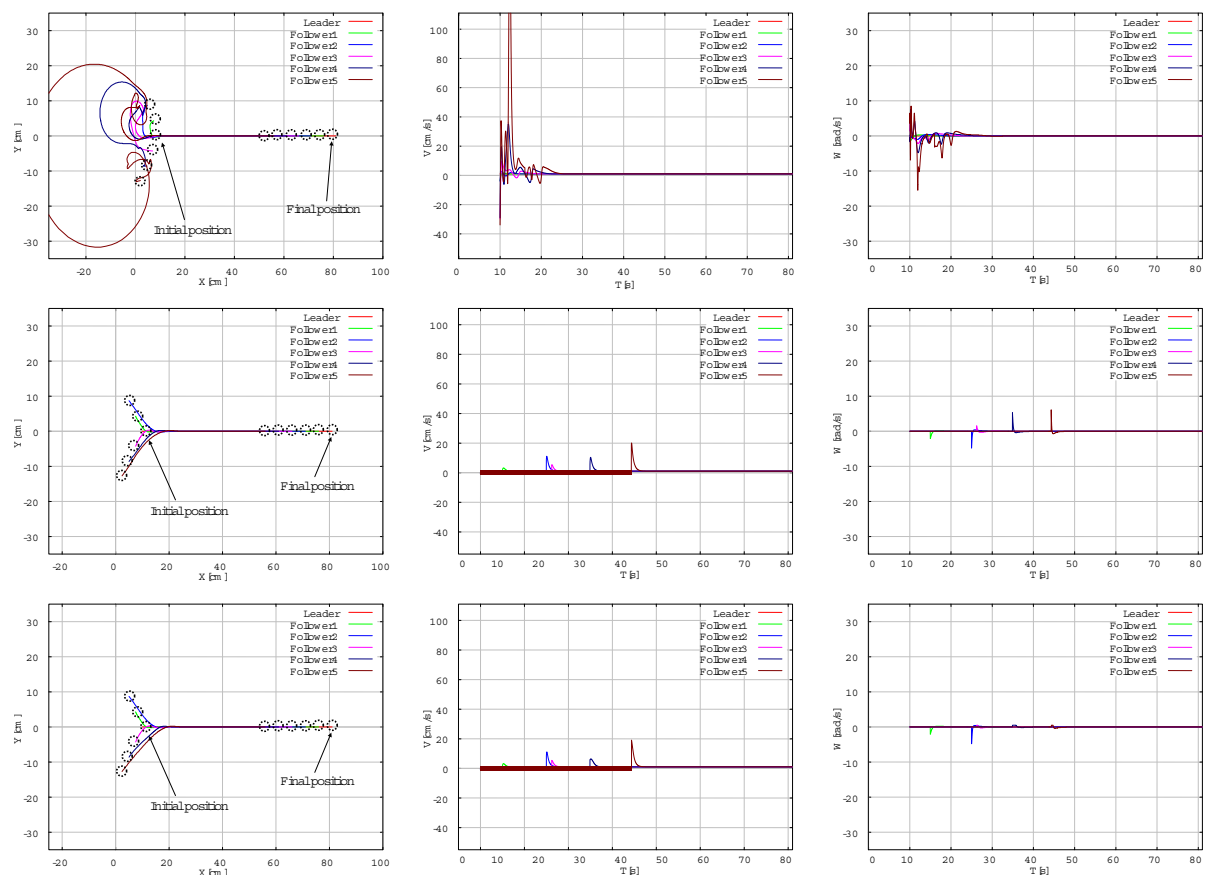


図 5.4: triangle から column(上段： $l-\psi$, 中段：ハイブリッド, 下段：ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))

ことが分かる．角速度変化においても，収束にかかる時間がやや大きいものの，ハイブリッド，ステアリング角同様に，小さな変化により，隊列切り替えを実現させている．

5.2 リーダの状況変化への対応

$l-\psi$ 制御則では，十分安全ではなかった障害物回避行動について，ハイブリッドアプローチとの比較を行う．

5.2.1 リーダ軌道切り替えにおける追従動作

まず，リーダー機が走行軌道を変化した状態に対して，ハイブリッドアプローチとの比較を行う．ここでは，リーダー機が左に 90 度回転し，しばらく直進した後に，右に 90 度回転するというタスクを与えた．図 5.5 がその結果である．

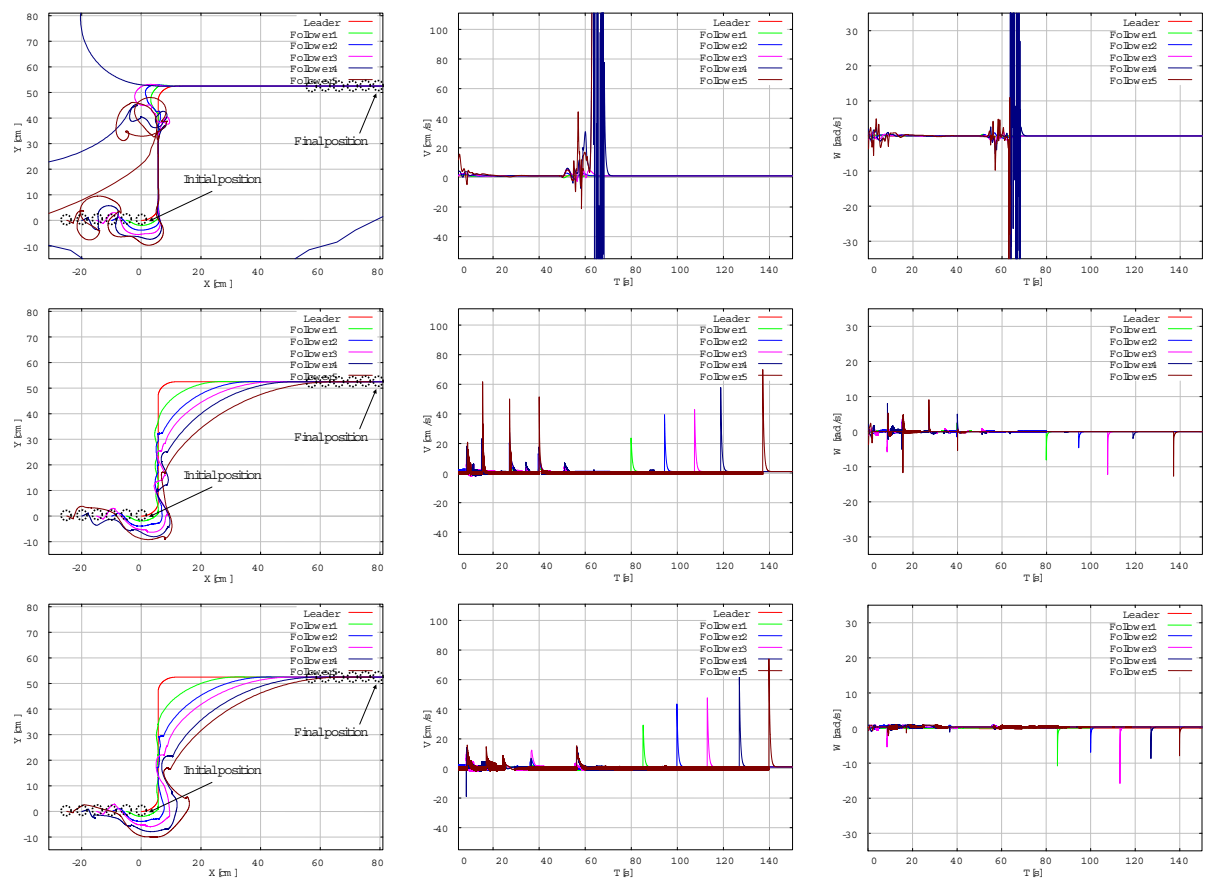


図 5.5: 6 台のロボットによる 2 回の 90 度回転に対する各手法の比較 (上段 : $l - \psi$, 中段 : ハイブリッド, 下段 : ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))

この図の構成も，図 5.1 同様，左から順に，軌跡，速度変化，角速度変化となっている．また同様に，上から $l-\psi$ ，ハイブリッド，ステアリング拘束となっている．このタスクにおいては， $l-\psi$ では非常に軌道が乱れ，六台目の速度，角速度入力が発散し，収束しなくなってしまった．このような $l-\psi$ では非常に困難な動作に対しても，ハイブリッド，ステアリング拘束両方とも，非常にきれいな軌跡を描いている．また，速度変化においても $l-\psi$ では発散してしまうが，ハイブリッド，ステアリング拘束においては，収束に時間がかかるものの，比較的小さな速度変化で追従していることが確認できる．また，角速度変化においては， $l-\psi$ では発散してしまうが，ハイブリッド，ステアリング拘束においては，ほとんど変化させずに隊列を維持したまま追従していることが確認できた．このような，リーダの軌道が変化する場合において，本アプローチは非常に良好な結果を得ることができた．

5.2.2 障害物回避における追従動作

障害物回避行動における，本アプローチの有効性を示す．ここでは隊列の要素数 n を 5 として， $l-\psi$ 制御則との比較を行った．図 5.6 は，その障害物回避行動の結果である．

この図も，図 5.1 同様左から順に，軌跡，速度変化，角速度変化となっている．また，上から順に $l-\psi$ ，ハイブリッド，ステアリング拘束となっている．この図より， $l-\psi$ 制御法では，収束こそするものの非常に大きな速度，角速度の変化が生じており，安定した軌道とはいえない．それに対して，ハイブリッドではやや軌道が乱れるところが見られるものの，速度変化も $l-\psi$ と比較して小さくなく，角速度変化も小さく，良好な結果を得ることができた．一方，ステアリング拘束では，速度変化，角速度変化は非常に小さく，良好であるものの，四台目以降の収束性が低くなってしまった．このことについては，六章で考察を行う．

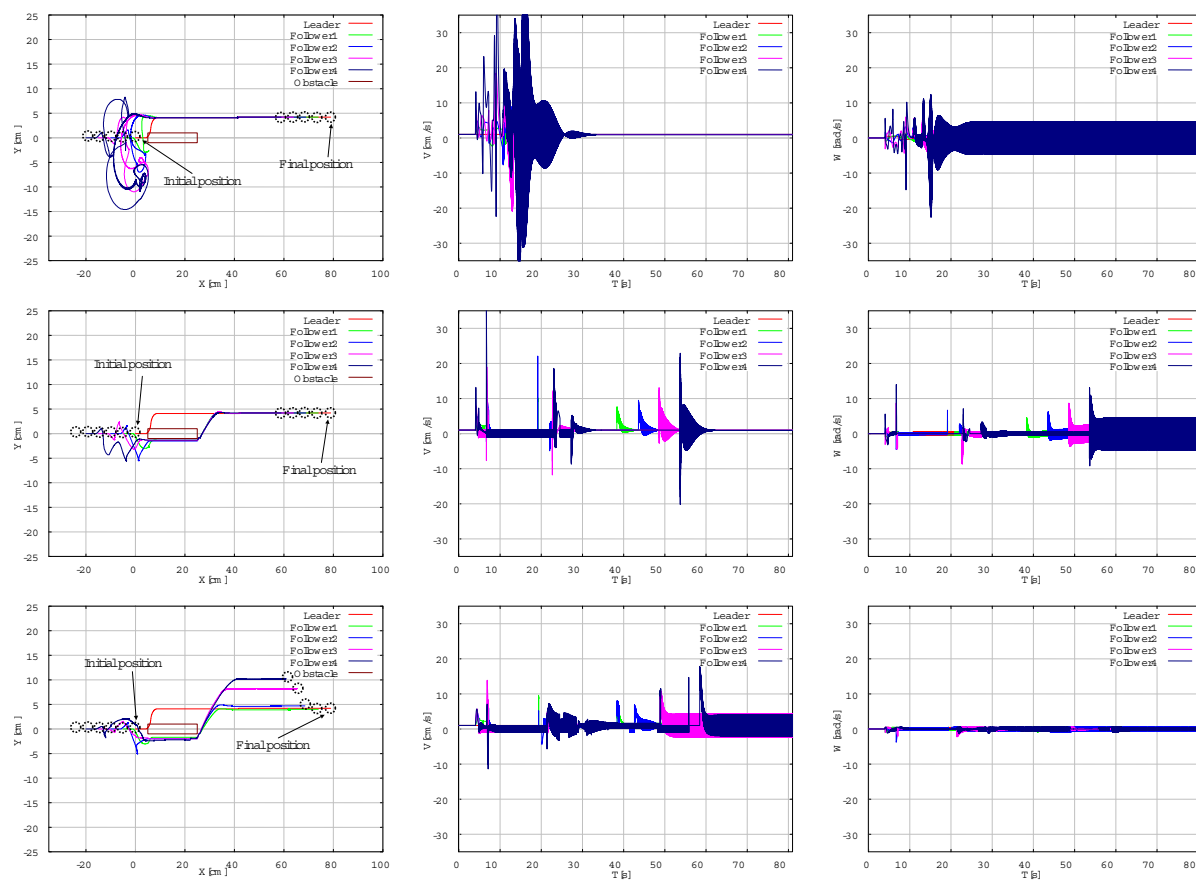


図 5.6: 5 台のロボットによる障害物回避行動における各手法の比較 (上段 : $l - \psi$, 中段 : ハイブリッド, 下段 : ステアリング拘束, また各段左から軌跡, 速度, 角速度))

第6章 評価と検証

本章では，前章までの実験を踏まえて，本アプローチについての評価・検証を行う． $l-\psi$ 制御法と比較した前章では，おおむね良好な成果を得ることができたハイブリッドアプローチについて，ここでは，そのシステム自体の有効性について考察を行う．

6.1 状態切り替え部の動作

設計したハイブリッドコントローラの挙動について，前述の図 5.5 の条件で調べた．図 6.1, 6.2 は，それぞれハイブリッド，ステアリング拘束での切り替えの様子を示している．この図は，縦軸が切り替えスイッチとなっており，0 が $l-\psi$ ，1 が turnright，2 が turnleft，3 が slow に対応しており，左から順に follower 1, follower 2, follower 3, follower 4, follower 5 における切り替え動作の振る舞いを示している．この図より，追従の困難な最初の 90 度角においてスイッチを小刻みに ON, OFF させながら隊列全体としての軌道を保っていることが確認された．また，ハイブリッドとステアリング拘束との比較については，follower 5 において顕著に見られた．ハイブリッドではスイッチが slow になったまましばらく動作を続けているのに対し，ステアリング拘束においては小刻みに ON, OFF させながら動作を行っていた．この結果から，切り替え動作における小刻みな ON, OFF 動作が隊列を安定かつ柔軟に形成することができた最大の要因であると考えられる．このことについては，次節で論じる．

6.2 切り替え則における速度設定の評価

本節では，切り替え則における speed controller について，前章で行った実験を基に，パラメータの有意性について考察する．

6.2.1 速度設定を変化させたときの振る舞い

本研究にて提案した切り替え側における speed controller の評価について，図 6.3 のような実験を行った．この図は，

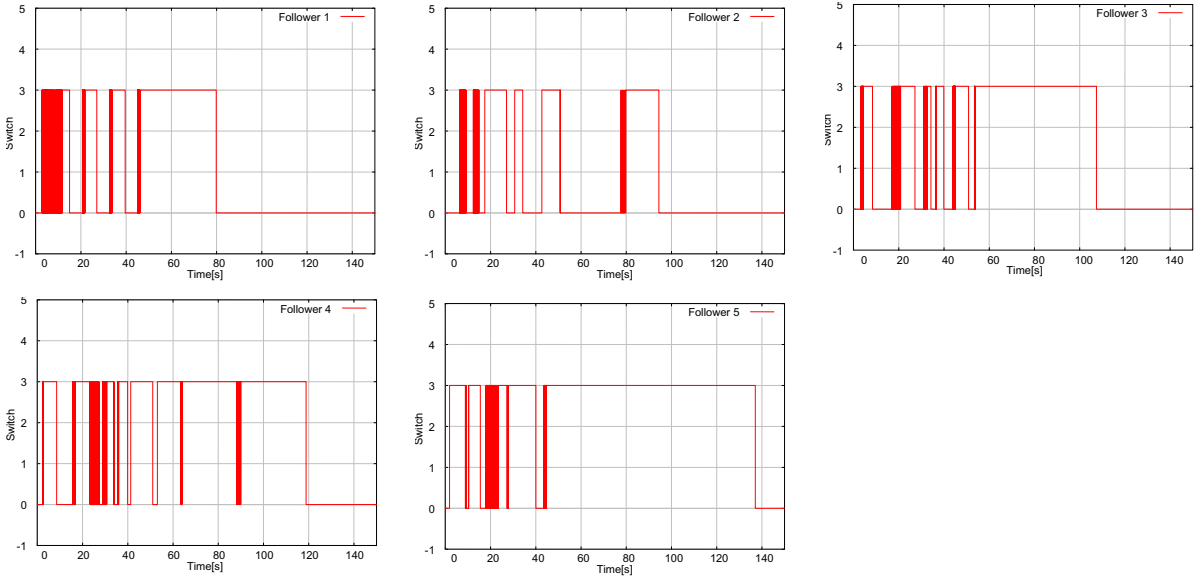


図 6.1: ハイブリッドコントローラを用いた時の図 5.5 におけるコントローラの切り替えの様子 (左から follower1, 2, ... 5)

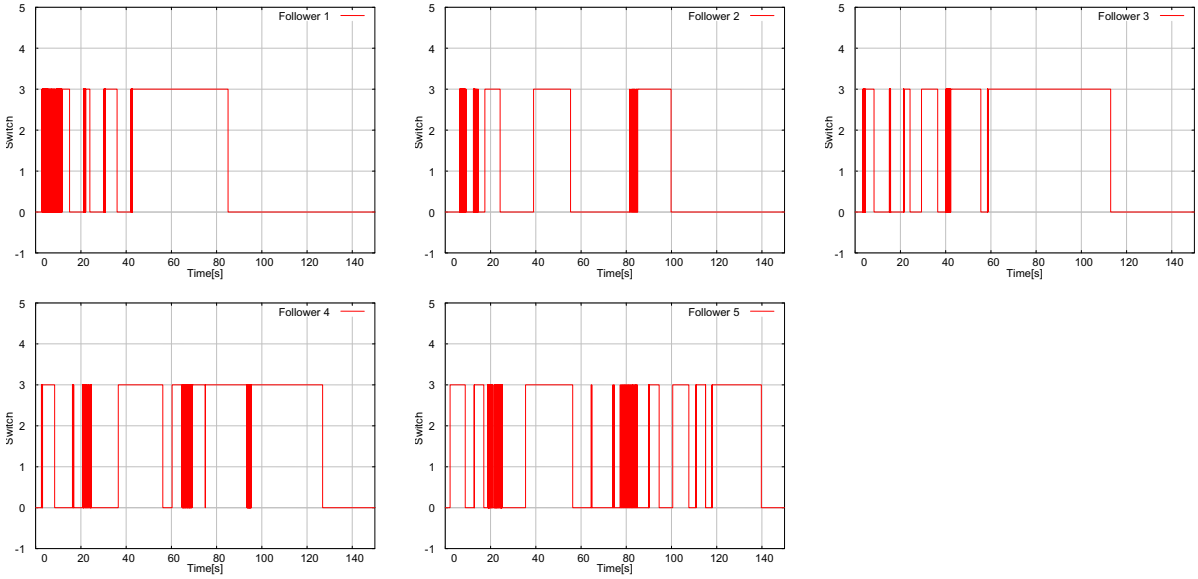


図 6.2: ステアリング角による抑制を用いたときの図 5.5 におけるコントローラの切り替えの様子 (左から follower1, 2, ... 5)

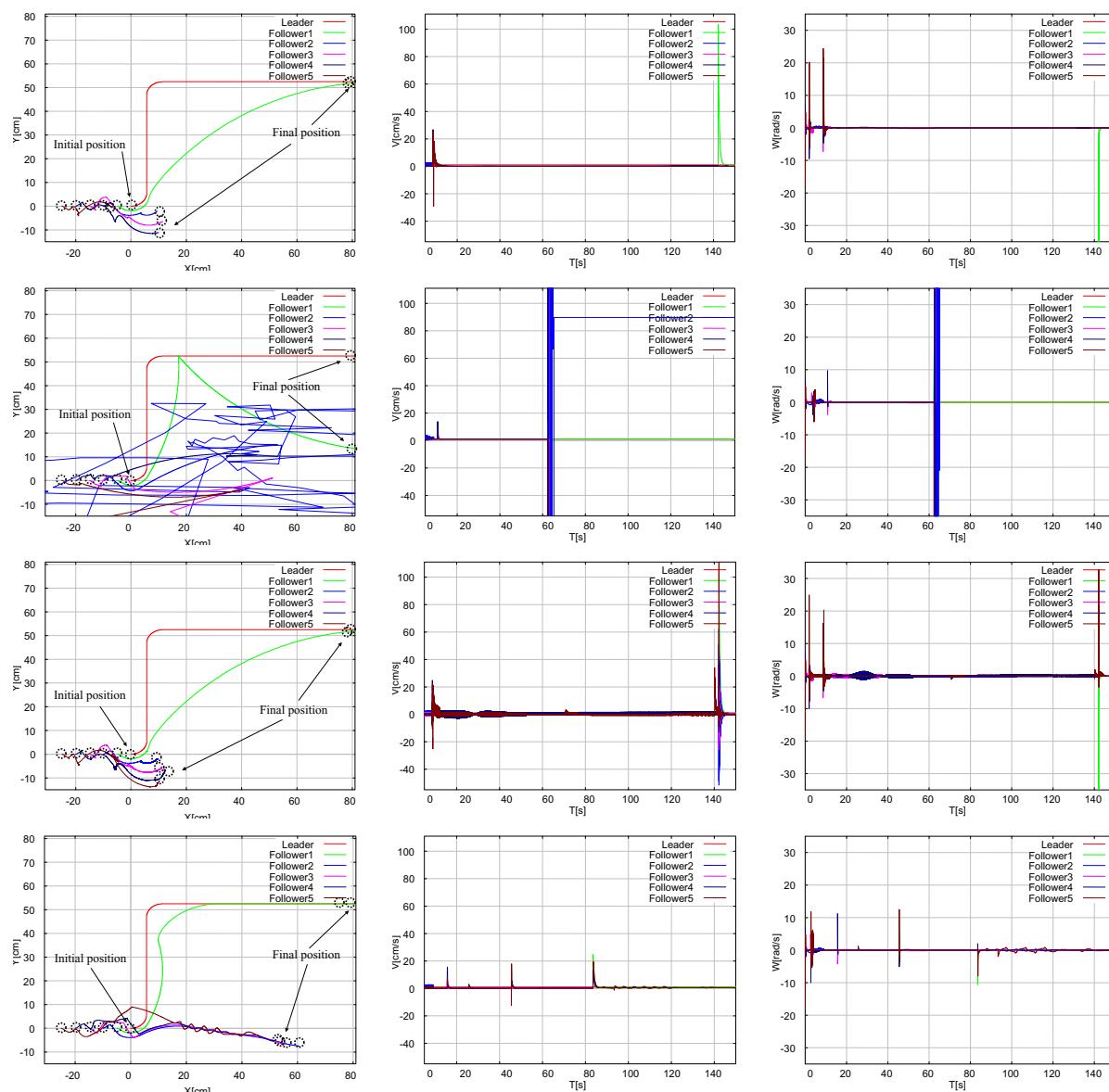


図 6.3: 図 5.5 における speedcontroller を変化させた時の振る舞い (各段左から軌跡, 出力速度, 出力加速度)

最上段:

$$v = \begin{cases} 0 & \text{if } (v_{follower} > 0) \\ 0 & \text{if } (v_{follower} < 0) \end{cases} \quad (6.1)$$

二段目:

$$v = \begin{cases} v_{leader} & \text{if } (v_{follower} > 0) \\ -v_{leader} & \text{if } (v_{follower} < 0) \end{cases} \quad (6.2)$$

三段目:

$$v = \begin{cases} -0.5v_{leader} & \text{if } (v_{follower} > 0) \\ 0.5v_{leader} & \text{if } (v_{follower} < 0) \end{cases} \quad (6.3)$$

四段目:

$$v = \begin{cases} 0.5v_{leader} & \text{if } (v_{follower} > 0) \\ -0.5v_{leader} & \text{if } (v_{follower} < 0) \end{cases} \quad (6.4)$$

となっている．また， ω に関しては第四章で設定した通りとし，図は左から順に軌跡，速度変化，角速度変化となっている．

この図より，リーダの行動に対して速度0で待っている動作（一段目）は十分追従し切れておらず，また収束にかかる時間も非常に長い．また，リーダと等速で追従する動作（二段目）においては，速度の抑制が全くないために $l - \psi$ へと切り替えた時に非常に大きな入力を受けるため，発散してしまった．本研究で提案した speed controller の二分の一の速度で追従する動作（三段目）については，やはり十分な追従性能を有しておらず，また収束にかかる時間も長い．そして，リーダ機の速度の二分の一で動作する場合においては，速度，角速度とも非常に小さく良好であるものの，追従するのに十分な角速度を得られないことが分かった．このように，本研究で提案した speed controller に対する他の手法においては，十分な結果を得られなかった．

6.2.2 speed controller の評価

このことは，本研究で提案した speed controller が常に小さな速度で逆方向にかけられていることが，隊列を安定にした原因であると考えられる．このように状態を切り分け，その境界で小刻みに小さい逆方向の入力がかけられることは，非ホロノミック系制御での制御手法の一つである，時間軸状態制御形 [中村 94][中村 97][美多 00] という繰り返し動作とよく似ていることが分かる．時間軸状態制御形は，安定化可能な状態方程式で記述されるシステムにおいて，時間軸制御部の入力を単調増加（前進），単調減少（後退）させながらすべての状態を0に収束させる手法である．車両系に適用した場合には，前進，後退を有限回繰り返して収束させていく手法である．しかし，本手法は繰り返し動作におい

表 6.1: ステアリング角の評価

制御手法	軌道の乱れ	収束性	入力速度変化	入力角速度変化
Hybrid	大変小さい	良好	小さい	小さい
Steering	きわめて小さい	障害物回避で困難	きわめて小さい	きわめて小さい

ては軌道追従をさせてはならず，また相対角度によるヒューリスティックな切り替えを行っているため，時間軸状態制御形とは異なる．しかし，実験により4章で提案したパラメータがもっともふさわしかったことの理由の一つとなると考えられる．また，上記の理由より，本手法をビヘービアベースドな（ヒューリスティックな）コントローラと呼ぶほうが適切であると考えられるため，この呼び方を適用した．

6.3 切り替え角度の評価

本節では，4章ですでに実験済みである切り替え角度について，前節の条件の元で再考し，その有意性について評価を行う．

6.3.1 切り替え角度を変化させたときの振る舞い

ここでは，4.2.2 項で設定した切り替え角度について，前節の条件のもとで評価を行った．図 6.4 はそのときの振る舞いである．この図は，上から順に $l - \psi$ の適用範囲が， $\psi = 130 \sim 230[deg]$ ， $\psi = 140 \sim 220[deg]$ ， $\psi = 160 \sim 200[deg]$ ， $\psi = 170 \sim 190[deg]$ ，としたときの隊列の振る舞いである．また，左から順に軌跡，速度変化，角速度変化となっている．

6.3.2 切り替え角度について

実験の結果から，図 6.4 において，切り替え角度 ψ が広く（一段目，二段目）なればなるほど $l - \psi$ の影響を受けやすくなるため，収束にかかる時間が短くなるが，その分大きな速度，角速度入力を受けてしまう．また， $l - \psi$ が狭くなればなるほど（三段目，四段目），速度，角速度入力の影響は小さくなるが，収束にかかる時間が非常に長くなってしまふことが分かった．

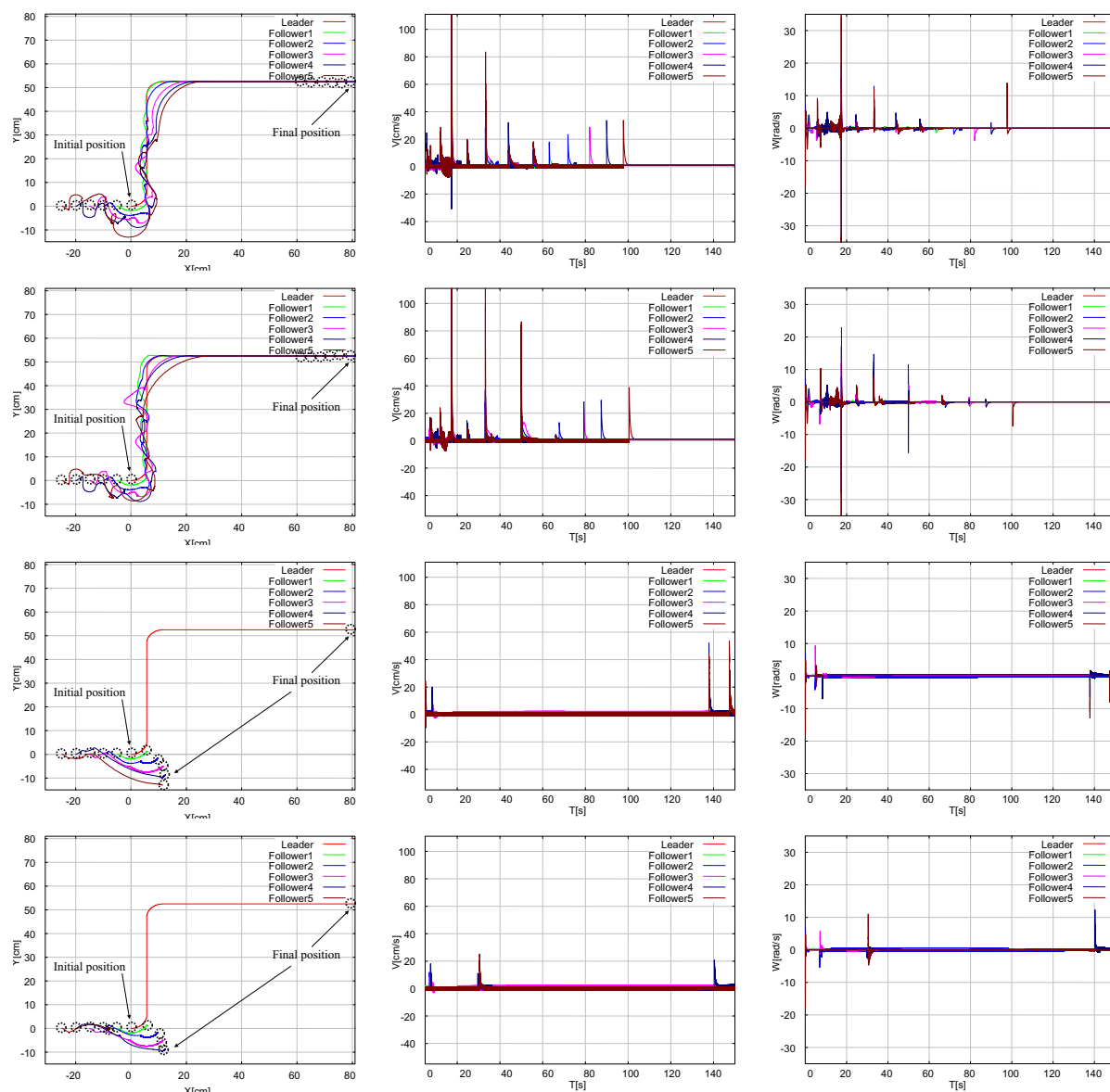


図 6.4: 図 5.5 における 切り替え角度 ψ を変化させた時の振る舞い (各段左から軌跡, 出力速度, 出力加速度)

6.4 ステアリング角の評価

前章で考慮したステアリング角による抑制について考察する．表 6.1 は，前小節までで行ったシミュレーションの結果を基にした，ハイブリッドアプローチと，ステアリング角による抑制との比較である．本研究の目標の一つである軌道の乱れや，入力速度，入力角速度の最小化については，ハイブリッドアプローチと比較しても非常に良好な結果を示した．しかし，収束性については障害物回避において保障されないことが判明した．この収束性の低下については，障害物回避においてのみ見られるため，このモジュール間の切り替えが十分でうまくいかないことが原因と思われる．

しかし，そのほかの点，特に隊列切り替えにおいては非常に良好な結果を得られているため，このステアリング角拘束による抑制は部分的には成功したといえる．

6.5 座標系の問題

本研究においては，リーダー機の座標系を基準とした，仮想リンク機構を用いて従属機の座標を決定した．ここでは，この座標系が及ぼす影響について考察を行う．

6.5.1 リーダ中心の座標系の弊害

$l - \psi$ 制御法では，図 3.1 のように，リーダー機の車輪からキャストへと伸ばした直線を基準線とし，相対角度 ψ における原点としている．従属機はそこから測定される ψ を任意の角度に収束させることで，隊列形成を実現させている．

このような座標系は，たとえば通信機構を有していないような実機においては，リーダー機の進行方向が変化したときに，どの点が原点になるのか把握しづらくなってしまう．また，リーダー機が何らかのトラブルを抱えてしまった時にも同様に原点の把握が困難となる．本研究におけるシミュレーションでは，リーダー機の原点を把握できるという条件のもとで行ったが，実機に展開する場合には，それぞれのロボットごとの座標系により ψ を決定する必要がある．

6.5.2 ビヘービアベースドの観点からの考察

本研究では，隊列形成の安定化のために，ロボットの振る舞いを中心に考えるビヘービアベースドな戦略を取り入れた．しかし，本来ロボットの振る舞いを考えるビヘービアベースドなアプローチは，ロボット個々の振る舞いを中心に考えるため，リーダー機を原点中心とする座標系のもとで，従属機の振る舞いを考える方法では十分であるとはいえない．実際，Matarić[JF01] や，Arkin[BA98] のビヘービアベースド戦略では，それぞれのロボットを中心にした振る舞いを考えている．そのため，ビヘービアベースドなアプローチで記述する場合， $l - \psi$ 法においても従属機を中心とする新たな制御法のもとで記述さ



図 6.5: 自律移動ロボット Khepera (左から本体, K213 視覚モジュール搭載, リーダ機)

れることが望ましいといえる．しかし，本研究ではダイナミカルなアプローチと，ビヘービアベースドなアプローチの融合による，ハイブリッドなアプローチの立場をとっており，本研究で提案した手法もその解の一つとして十分有効であるといえる．このような，ダイナミカルなアプローチとビヘービアベースドなアプローチの配合割合を考えることは，これからの研究において必要であるといえる．

6.6 実機への実装の試みと展望

ここでは前項までの考察を基に，実機へ展開する際の問題点を指摘し，展望とする．

6.6.1 自律移動ロボット Khepera

本章で考察する移動ロボットは，図 6.5(左) のような AAI 社製の Khepera である．このロボットは 2 輪独立に駆動することができ， $l-\psi$ 制御法が適用可能である．また，周囲に赤外線センサを有しており本研究で提案した仮想ロボットの条件も満たしている．

このロボットは C 言語で実装でき，シリアル通信を介して RAM 上に書き込むことにより，任意のプログラムを実行することができる．なお，本研究においては赤外線センサは利用せず，k213 視覚センサを用いた．

6.6.2 センサの問題

隊列形成における諸問題を解決するため，実機に搭載させるセンサには，以下のような条件が課せられる．

- リーダ機と障害物を混同せず認識できること
- リーダ機からの相対距離，相対角度を計測できること



図 6.6: 実験環境 (左: 照明を当てた状態, 右: グリッド)

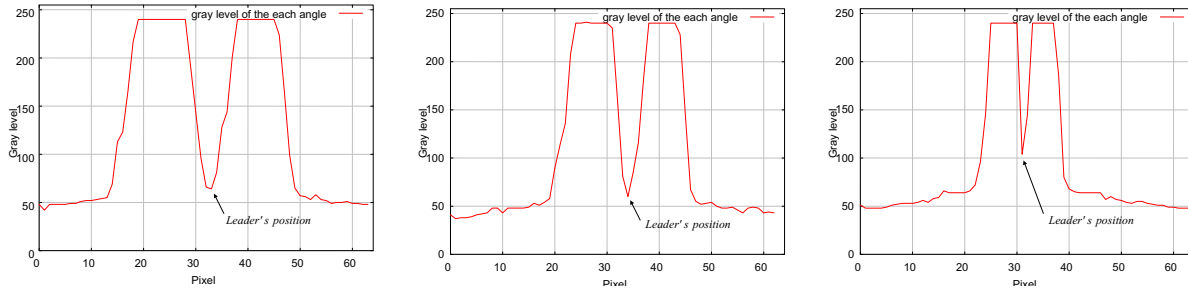


図 6.7: K213 視覚センサの適用範囲 (左から 3cm, 5cm, 10cm)

このような問題を単一のセンサにより解決するため，ここでは図 6.5 のような K213 視覚センサを用いた．この視覚センサは $1 \times 64[pixel]$ の視野を持ち，実測で視野角 36 度を認識することが可能である．また，それぞれのピクセルには，黒を 0，白を 255 とした，0 ～ 255 のグレイレベルを計測でき，物体の認識が可能となる．本研究ではリーダ機を認識するため，図 6.5(右) のような白黒のストライプを設定した．

この白黒のストライプを基準にして，リーダ機との距離と角度を測定する実験を行った．実験は図 6.6(左) のような環境で行い，白色蛍光灯の光を上部から均等に伝わるように照らし，高さ 15cm の黒色の枠の中に 2 台のロボットを置いて行った．実験の結果を図 6.7 に示す．この図は左から順に実験に用いた距離と角度の座標系，そしてリーダとの相対距離 5cm，10cm，15cm としてそのときのグレイレベルをプロットしたものである．この図より白黒のストライプは相対距離に応じてその大きさを変化させ，従属機が近づくと拡大し，離れると縮小することが確認できた．なお，リーダ機は中心から左右に塗られている白色の部分で，200 以上のグレイレベルで認識できることを利用して，実験の結果を基に以下のようなアルゴリズムにより認識させた．なお，前項で指摘した座標系の問題であるが，本実験では座標変換を考慮し，リーダ機を基準とした座標系のもとで行った．

相対距離，相対角度算出アルゴリズム

1. バッファリングした画像イメージを左から順に走査し，グレイレベル 200 以上の中で最も右端にある点を α とする．また，グレイレベル 200 以上が現れるピクセル数 θ をカウントする．

2. バッファリングした画像イメージを右から順に走査し，グレーレベル 200 以上の中で最も左端にある点を β とする．
3. α から β までの間を走査し，最もグレーレベルの低い値をリーダの位置 p ピクセルとする．
4. p 点での相対角度を $Angle$ を求める．中心の 32 ピクセルからの差分をとり

$$Angle = 180 - (18 - p \times 0.5625) \text{ (if } p < 32) \quad (6.5)$$

$$Angle = 180 + (p \times 0.5625 - 18) \quad (6.6)$$

6.5，6.6 式で示される計算によって，相対角度 $Angle$ を算出する．

5. 相対距離 $Distance$ を求める． θ の数を基にして，

$$\text{if}(\theta > 24) \text{ Distance} = 1 \text{ (cm)} \quad (6.7)$$

$$\text{if}(\theta > 22) \text{ Distance} = 2 \text{ (cm)} \quad (6.8)$$

$$\text{if}(\theta > 20) \text{ Distance} = 3 \text{ (cm)} \quad (6.9)$$

$$\text{if}(\theta > 18) \text{ Distance} = 4 \text{ (cm)} \quad (6.10)$$

$$\text{else Distance} = (20 - \theta) \text{ (cm)} \quad (6.11)$$

この式 6.11 を用いて相対距離を算出する．

この実験により，リーダ機との相対距離，相対角度を測定することができるが，実際に測定したところ，本アルゴリズムを適用した際には，白，黒，白と 3 色に色分けされた部分の面積が小さいため，視野角が 20 度ほどになってしまった．なおこの色分けされた部分を拡大しても，全体として認識する部分が広がるため，それほど大きな視野角の向上にはならなかった．

6.6.3 追従動作実験

前項での実験を基に，実機への展開を考える．実機へ展開する場合，四章六節で提案したハイブリッドなアーキテクチャだけでは，前節で指摘した実機へ展開するための問題点を解決できないため，CD(Collision Detector) の前に，回転して周囲の環境を認識するモジュールが必要となってくる．本実験においては，このモジュールを組み込んだ *khepera* において実験を行った．

実験の結果を図 6.8 に示す．この図 (左) ではカメラによるリーダの認識動作を行うため，回転している．リーダを発見して，相対距離，相対角度を前述のアルゴリズムを利用して求め，図 (中) のように追従制御へと移る．そして，追従制御で得られた速度や角速度が大きかった場合，再び図 (右) のようなリーダ認識動作へと移る．

実験から，切り替え動作についてはうまく動作していることが確認できた．なお本実験では，カメラの視野角が非常に狭いために $l-\psi$ 制御モジュールのみが起動していたた



図 6.8: 実験結果 (左から探索動作 (1), 追従動作, 探索動作 (2))

表 6.2: Khepera を用いた追従実験の結果

視野角	移動可能角度	切り替え動作
約 20 (deg)	左右方向に 10(deg) ずつ	探索, $l - \psi$, (Behavior は動作せず)

め, 急激な速度, 角速度入力を受けた. そのため, 追従動作後, リーダを見失うことが多かった.

6.6.4 実機への課題

先の実験から, 実機へと展開する場合の問題点についてまとめる.

表 6.2 が実験の結果をまとめたものである. 本実験では, 36 度であった視野角が, 白黒の目印の影響を受けて, 約 20 度となってしまった. そのため, リーダを認識しても, 相対角度が $\psi = 170 \sim 190(deg)$ となってしまった. また, 追従動作を行っても, $\omega = 10(deg/sec)$ を超えてしまった場合には, 探索動作に入ってしまうため, 十分な隊列を形成することができなかった.

この視野角の問題を解決するために, Das[DFK⁺ar] は視野角 360 度のオムニカメラを用いて, シミュレーションと同様の環境により, 隊列を形成している. また, Matarić[JF01] はパンとチルト角の調整により視野角の問題を補っている. このように視野角の問題は実機において, 非常に大きなウエイトをしめているといえる. 本実験においては, 視野角が狭かったために, 十分な隊列を形成できなかったが, 切り替え動作に関しては, 十分適用できることがいえた.

以上の結果より, 実機に展開する場合には, リーダを追従し隊列を形成するのに十分な角速度が得られる範囲の視野角を持つデバイスが必要であるということが確認できた.

第7章 結論

本章では，前章までの結果を元に，本論文の結論を述べる．

7.1 本研究の結論

本論文では，非ホロノミック拘束を有する移動ロボット群の隊列形成について，ダイナミカルなアプローチと，離散的なアプローチを融合させたハイブリッドアプローチを提案し，その有効性を示した．特に，隊列の変化や，障害物回避など，リーダ機の軌道が変化する状態においての安定な動作を実現させた．

- 隊列形成におけるアプローチ法

本研究では，隊列の形成手法として2種類のアプローチがあることを指摘した．まず，システム表現に関するアプローチである．このアプローチはダイナミカルな表現とシンボリックな表現があり，それぞれ Virtual structure とビヘービアベースドを採り上げて論じた．もう一方のアプローチは，情報伝達手法による分類である．隊列を形成するときには，情報を一極集中させる中央集権型，小集団のリーダを設定して追従させるリーダ追従型，そして近隣のロボットのローカルな距離，角度から全体の隊列を形成する自律分散型があることを指摘した．本研究においては，ダイナミカルな表現かつリーダ参照型の $l-\psi$ 制御法を隊列形成に用いた．

- $l-\psi$ 制御とハイブリッドアプローチ

本研究では前述の通り $l-\psi$ 制御法を隊列形成に適用した．この制御側を用いて隊列形成をシミュレートし，その問題点を改善点を明らかにした．そして，それを解決するために，ビヘービアベースドな戦略を取り入れたハイブリッドなアプローチを提案した．このハイブリッドアプローチは $l-\psi$ を補完，抑制し軌道や速度変化の安定化を図る手法である．ここではハイブリッドアプローチだけでなく仮想ロボットについても設計し，障害物回避行動に対しても対応できるようにした．

- ハイブリッドアプローチの評価

ハイブリッドアプローチの有効性を評価するために，シミュレーションによる実験を行った．表 7.1 はその結果である．この結果から，本研究で提案したハイブリッドアプローチは隊列形成におけるダイナミカルなアプローチである $l-\psi$ 制御法とビヘービアベースドなアプローチをうまく融合させることで，リーダの軌道変化と

表 7.1: ハイブリッドアプローチと $l-\psi$ 制御法との比較

制御手法	隊列形成	隊列の要素数の変化	リーダーの軌道変化	障害物回避
$l-\psi$	○	×	×	△
Hybrid	○	△	○	○

いう、移動ロボット特有の問題である軌道計画問題に対しても、柔軟に対応できることが示された。

7.2 今後の課題

7.2.1 ハイブリッドシステムとしての可能性

本研究では非線形システムとして、速度拘束のみを持つ一階対象アフィン系を対象とした。この対称アフィン系に関しては、Brockett の定理より非常に制御が難しい（付録 A 参照）。また、隊列問題のように軌道に追従するための目標軌道が状況に応じて変化してしまう場合においては、その状況を分類し、それぞれに行動を記述して対応したほうがよいと考えられる。

また、隊列というマクロに見れば幾何学図形を描くような問題は、たとえば3角形や4角形というように、それ自体が離散的である。このような、そもそもミクロ的にはダイナミカルな、マクロ的には離散的な隊列形成という問題に対しては、両者を配合することによってのみ解決されると考えられる。たとえば[DOK01], [Des98] は隊列の形をグラフとして扱い、状況に応じてふさわしいグラフを選択することで、切り替えのスイッチとしている。これも、上位のレベルで離散的なグラフを扱い、その形態に応じてロボットの移動を決定している、ハイブリッドなシステムである。

このような観点からみれば、本研究で提案したようなハイブリッドな解決方法という考え方は、妥当な考え方であるといえる。しかし、本研究における両者の配分に関しては、ダイナミカルなシステムからの配分が多かった。この点に関しては、現在のところは問題毎個別に対応するしかないと思われるが、シンボリックシステムの配分を増やしていけば、どれくらい変化するのは今後の研究を待ちたい。

7.2.2 今後の課題

本研究では、隊列切り替えに特化したハイブリッドアプローチを提案した。しかし、さらに上位の軌道計画や隊列の形態の選択などを組み込んで、より（有限個の）階層的な構造を採っていくことがよいと思われる。

また、同じ速度拘束を有する劣駆動系の自動車のような対象を扱う場合について、今回

はステアリング角による拘束を扱ったが、タイヤやブレーキなどの制動性や、気候などの路面環境の変化に対しても拘束を受けると考えられる。そのような非常にマクロな状況の変化に応じた軌道や速度の変化に対しても、実用上は考慮しなければならない課題と考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたって，常に暖かい視線で見守り続けて頂いた藤波努助教授，國藤進教授には大変感謝いたします．主テーマ指導教官の藤波先生には研究だけでなく公私共に多くのアドバイスを頂戴いたしました．先生のご支援がなければ本学での研究はなしえなかったと思います．また，非線型システム論の立場から多くのアドバイスを与えてくださった小長谷研究室の山本知幸助手にも大変感謝いたします．特に研究の方向性が見えなかったときには，お忙しい中でもお時間を割いて相談に乗って頂いたことは忘れられません．他にも常に同じ目線で多くのアドバイスを頂いた，藤波研究室の同僚である阿部真美子，村上直之両氏や後輩，そして國藤研究室の皆様にも大変感謝いたします．多様な視点を持つ研究科ならではのアドバイスは常に参考になりました．そして，この大学での研究生生活を常に支えて頂いた両親および家族にも感謝いたします．

付録 A：非ホロノミック拘束系

非線形系の一つである非ホロノミック拘束を有する系は，積分できない拘束を有することが特徴である．その判別には，微分方程式拘束を有するベクトル場の集合が張るディストリビューションが，インボリューティブでないことが用いられる．以下では，まず非ホロノミック拘束を有する系の制御問題について説明し，そして，特に非ホロノミック系の中でも，劣駆動機械という車輪を有する移動ロボットが持つ固有の問題について説明する．なお，本章については [美多 00] [石島 93] [中村 94] [中村 97] [三平 00] [鈴木 95] を参考にした．

A.1 数学的背景

非線形系において，状態空間 Δx が張る空間が， $x \in R_3$ で線形独立である場合，非ホロノミック拘束系という．

非ホロノミック拘束系であるためには，状態ベクトルの Lie 積をとった値が，インボリューティブでないことで判別される．ここで Lie 積とは，ベクトル場によるベクトル場への変換である．具体的には，状態ベクトルをそれぞれ g_1, g_2 とおいたとき，

$$[g_1, g_2] = \frac{\partial g_2}{\partial x} g_1 - \frac{\partial g_1}{\partial x} g_2 \quad (1)$$

によって定義される変換である．この積をとった結果が表わされるベクトル場 $\Delta(x)$ の行ベクトルが張る空間が，線形結合，すなわち， $\text{span}(\Delta(x)) : \Delta(x) = (g_1(x), g_2(x))$ で，あるとき，これをインボリューティブであるという． $\text{span}(\Delta(x))$ がインボリューティブである場合，次の Frobenius の定理によりベクトル g_1, g_2 についての積分が存在することがいえる．

- Frobenius の定理:

- $x \in U$ で正則な $\text{span}(\Delta(x))$ が完全に積分可能であるための必要十分条件は，それ自身がインボリューティブであることである．

この Frobenius の定理により，Lie 積がインボリューティブで場合，すなわち，状態ベクトル x が積分不可能である場合，非ホロノミック拘束であるという．

その中でも，一般化座標をまとめて状態変数 x とおいたとき，

$$\dot{x} = f(x) + P(x)u \quad (2)$$

$$\dot{x} = P(x)u \quad (3)$$

と帰着できるシステムにおいて，式 2 をアフィン系，式 3 を対称アフィン系と呼ぶ．

さて，非ホロノミック系の制御問題について考えるとき，次の Brockett の定理を用いると，対称アフィンな系については，すべて滑らかな状態フィードバック則が存在しないことが示される．

- Brockett の定理:

- アフィン系 (式 2) において，滑らかなディストリビューション (接平面場) $\Delta(x)$ が，正則かつ $\dim \Delta(x) < n$ (n : 状態量 x の次元) であるならば，滑らかな状態フィードバック則は存在しない．
- 対称アフィン系 (式 3) において，入力の数 $n-m$ が状態量の数 n に一致するとき，滑らかな状態フィードバック則が存在する．(m : 拘束条件の数)

対称アフィンな系 (式 3) において，拘束条件の数 m は $m > 0$ であるため，この系を制御する滑らかな状態フィードバック則は存在しないことが示される．これによって，非ホロノミック系の制御が非常に困難であることがいえる．以下では，このような非ホロノミック系の制御問題について，特に本研究で用いる 2 輪駆動系の制御問題について説明する．

A.2 劣駆動機械系とその制御方法

劣駆動機械とは，制御する次元が制御される次元より少なくて済む構造を有する機械のことを指す．すなわち， n 自由度の機械系において， n 個の一般化座標を $n-l$ 個の入力を用いることで制御できる機械のことをいう．たとえば，我々が通常利用する自動車においては，ハンドルとアクセルの 2 つの入力により，図 1 のように X-Y の 2 次元平面，および車体から見たヨー角という 3 つの次元を制御することができる．

A.2.1 2 輪駆動系の特性

ここでは，本研究で用いた 2 輪駆動系の劣駆動機械が，非ホロノミックであるということを，前節の定理を用いて説明する．

図 2 のような 2 輪車両系において，入力 u_1, u_2 をそれぞれ，推進力，操舵角とすると，

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

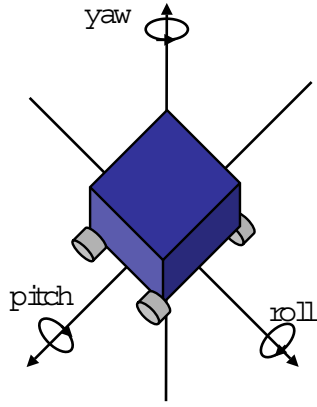


図 1: 自動車のロール, ピッチ, ヨー角

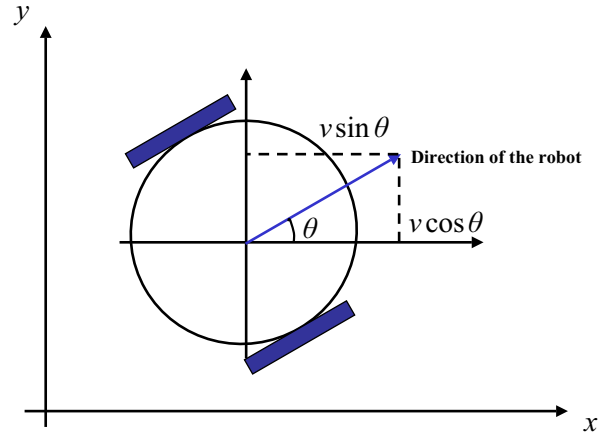


図 2: 2 輪車両系のモデル

と書ける．このモデルは，ドリフト項のない対称アフィン系である．この系を， $\dot{q} = g_1(q)u_1 + g_2(q)u_2$ とおき，Lie 積をとると，

$$[g_1, g_2] = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 0 & -\cos\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる．このとき， $q \in R_3$ において， g_1, g_2 が線形独立であるため，インボリューティブでない．よって，この 2 輪劣駆動機械系は，非ホロノミック拘束を有していることが示された．

A.2.2 フィードバック制御

非ホロノミック拘束を有する劣駆動機械は，前述の Brockett の定理より，滑らかな状態フィードバックを形成することは困難であるとされているが，その定理に抵触しない範囲内で，様々なフィードバック制御法が提案されている．たとえば，目標点（集合）収束，経路追従制御，軌道追従制御など [LOS98] がある．

これは，中村ら [中村 94][三平 00] によれば，

1. 目標を状態空間の一点ではなく点の集合である多様体に設定する．
2. 目標を状態空間の静止した一点ではなく運動する点とする．
3. 滑らかでない（区分解析的な）状態フィードバック則とする．
4. 時変状態フィードバックとする．

ことによって，対称アフィンな系の閉ループ制御系が設計できることと一致している．

ここでは，本論文で展開する隊列形成の基礎となる軌道追従制御についての，予備実験として Kanayama らの軌道追従制御 [中村 94][美多 00] を実装した．

この制御法は，山彦 11 号において実装されており，軌道追従制御法として良好な結果が得られることで知られている．

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) のような 2 輪モデルに対して，入力を次のように決定する．

$$v = v_d \cos\theta_e + K_x x_e \quad (7)$$

$$\phi = \psi_d + v_d(K_y y_e + K_\theta \sin\theta_e) \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) \quad (8)$$

但し， x_e, y_e, θ_e ：目標軌道に対する誤差， x_d, y_d ：目標軌道軌道の一点， K_x, K_y, K_θ ：係数である．

図 3 はこの制御側を本論文で述べた実験環境において，シミュレーションしたものである．このように軌道追従制御法は，目標軌道との誤差をとりながら，フィードバック補正をかけていくことで，追従していく．

なおこの系は，リアプノフ関数として

$$V = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_e^2 + y_e^2) + \frac{1}{K_y}(1 - \cos\theta_e) \quad (9)$$

を持つため，目標軌道に収束することが示される．

このシミュレーションにより，非ホロノミック拘束を持つ劣駆動機械系のフィードバック制御による軌道追従制御法が確認された．

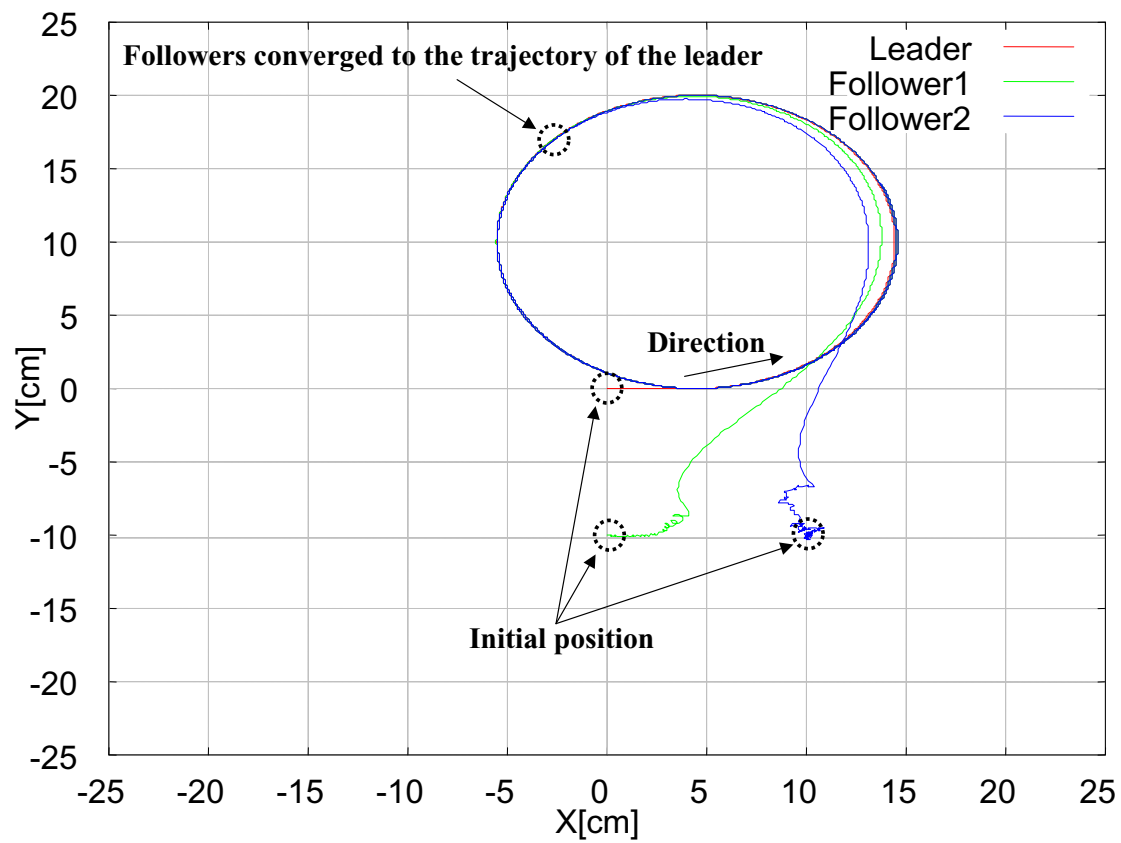


図 3: 軌道追従制御のシミュレーション

参考文献

- [APS97] J. Almeida, F. Lobo Pereira, and J. Borges Sousa. A hybrid feedback control system for a nonholonomic car-like vehicle. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.
- [BA98] Tucker Balch and Ronald C. Arkin. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, pp. 1–15, 1998.
- [BGH⁺02] Martin Buss, Markus Glocker, Michael Hardt, Oskar von Stryk, Roland Bulirsch, and Günther Schmidt. Nonlinear hybrid dynamical systems: Modeling, optimal control, and applications. In S. Engell, G. Frehse, and E. Schnieder, editors, *Modelling, Analysis and Design of Hybrid Systems*, No. 279 in Lecture Notes in Control and Information Science (LNCIS), pp. 311–335. Springer-Verlag, 2002.
- [BLH00] Randal W. Beard, Jonathan Lawton, and Fred Y. Hadaegh. A feedback architecture for formation control. In *American Control Conference*, pp. 4087–4091, 2000.
- [Bro86] R. A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14–23, 1986.
- [Des98] Jaydev P. Desai. *Motion Planning and Control of Cooperative Robotic Systems*. PhD thesis, University of Pennsylvania, 1998.
- [DFK⁺ar] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor. A framework for vision based formation control. *Multi-Robot Systems: A Special Issue of IEEE Transactions on Robotics and Automation*, To appear.
- [DOK01] Jaydev P. Desai, James P. Ostrowski, and Vijay Kumar. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 905–908, 12 2001.
- [FSDK02] R. Fierro, P. Song, A. Das, and V. Kumar. Cooperative control of robot formations. In R. Murphey and P. Pardalos, editors, *Cooperative Control and*

Optimization, Vol. 66 of *Applied Optimization*, chapter 5, pp. 73–93. Kluwer Academic Press, 2002.

- [FYF02] Masanori Fujii, Tomoyuki Yamamoto, and Tsutomu Fujinami. Stable formation driving of mobile robots with hybrid strategy. In *Dynamic Systems Approach for Embodiment and Sociality, Proceedings of the Third International Symposium on Human and Artificial Intelligence Systems*, pp. 238–242, 2002.
- [HV98] Kwun Han and Manuela Veloso. Reactive visual control of multiple non-holonomic robotic agents. In *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [JF01] Maja J Matarić Jakob Fredslund. A general, local algorithm for robot formations. Technical report, USC-IRIS, March 2001.
- [LBYar] Jonathan Lawton, Randal Beard, and Brett Young. A decentralized approach to formation maneuvers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, To appear.
- [LM99] D. Liberzon and A. S. Morse. Basic problems in stability and design of switched systems. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 5, pp. 59–70, 10 1999.
- [LOS98] A. De Luca, G. Oriolo, and C. Samson. Feedback control of a nonholonomic car-like robot. In J. P. Laumond, editor, *Robot Motion Planning and Control*, No. 229 in Lectures Notes in Control and Information Sciences, pp. 171–253. Springer-Verlag London, 1998.
- [MBK01] Timothy W. McLain, Randal W. Beard, and Jed M. Kelsey. Experimental demonstration of multiple robot cooperative target intercept. Technical report, MAGICC Lab, 2001.
- [MLGV02] François Michaud, Dominic Létourneau, Matthieu Guilbert, and Jean-Marc Valin. Dynamic robot formations using directional visual perception. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2740–2745, 2002.
- [TL96] Kar-Han Tan and M. Anthony Lewis. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996.
- [TPKar] Herbert G. Tannar, George J. Papas, and Vijay Kumar. Leader-to-formation stability. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, To appear.

- [YYFT90] Kanayama Y., Kimura Y., Miyazaki F., and Noguchi T. A stable stacking control of an autonomous mobile robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990.
- [三平 00] 三平満司. Sice セミナー 現代制御理論入門 (第 6 章). 計測自動制御学会, pp. 38–51, 2000.
- [石島 93] 石島, 島, 渡辺. 非線型システム論. 計測自動制御学会, 1993.
- [中須 01] 中須賀真一. 宇宙機のフォーメーションフライト. システム/制御/情報, Vol. 45, No. 10, pp. 574–579, 2001.
- [中村 94] 中村仁彦. 講座 非ホロノミックロボットシステム (講座全 5 回). 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4-7, 12-2, 1993-1994.
- [中村 97] 中村仁彦. 展望: ミニ特集 非ホロノミック系制御研究の展望. 計測と制御, 計測自動制御学会, Vol. 36, No. 6, pp. 384–425, 1997.
- [潮 02] 潮. ハイブリッドシステムへの期待. システム/制御/情報, Vol. 46, No. 3, pp. 105–109, 2002.
- [美多 00] 美多. 非線型制御入門-劣駆動ロボットの技能制御論-. 昭晃堂, 2000.
- [鈴木 95] 鈴木, 中村. 非ホロノミック現象の制御. 第 1 回日本 IFToMM 会議シンポジウム, pp. 13–18, 1995.